



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

**PROPUESTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS METALÚRGICOS NO  
FERROSOS**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:  
I.Q. JESÚS FIDEL GONZÁLEZ SÁNCHEZ**

**TUTOR PRINCIPAL  
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA  
COMITÉ TUTOR  
DRA. IRMA C. GAVILÁN GARCÍA, FACULTAD DE QUÍMICA  
DR. ENRIQUE CESAR VALDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA**

**México, Cd. Mx., septiembre de 2016**

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. César Valdez Enrique

**Secretario:** Dra. Gavilán García Irma Cruz

**Vocal:** Dr. Lucho Constantino Carlos A.

**1<sup>er.</sup> Suplente:** M. en E. Romero Mares Patricia I.

**2<sup>d o.</sup> Suplente:** Dra. Fernández Villagómez Georgina

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis:** Facultad de Ingeniería UNAM, Facultad de Química UNAM, Facultad de Ciencias de la Universidad de Navarra y en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Georgina Fernández Villagómez

-----  
**FIRMA**

## **Dedicatorias**

*Dedico esta tesis a Dios y a la vida misma que han orientado mi andar al pasar el tiempo.*

*A mis Padres que han sido la base para que yo logré cumplir los proyectos que me propongo.*

*Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la materia.*

*Cuando se separan, el hombre no existe.*

*Nikola Tesla*

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer en primera instancia a mi familia, a mis padres que han estado en todo momento de mi vida apoyándome, brindándome su amor, cariño y confianza, también a mis hermanos que alegran mis días al llegar a casa y me han ayudado cuando lo he necesitado.

A mi tutora la Dra. Georgina Fernández Villagómez, quién más que una tutora la considero una amiga incondicional y que me ha aconsejado y enseñado muchas cosas, durante el transcurso de mis estudios de maestría que me han hecho madurar en demasía y ver la vida de diferente manera.

A mis amigos Osiel, Liz, Martin, Aurora, Adrián y Zulma, que me han ayudado y soportado estos dos años de maestría, que aun siendo nuevos amigos pareciese que han sido amigos de toda la vida, por su apoyo en momentos difíciles y el haber compartido viajes y momentos muy agradables en esta etapa de mi vida.

A Jorge, Caro, Álvaro, Javier, Erick, José Luis, Roxana, Iván, Rayner, y demás compañeros de la generación por dar alegría organizando las fiestas que nos unían y nos hacían convivir como generación, compartiendo momentos geniales y de mucho baile.

A la Dra. Irma Gavilán, por su apoyo y confianza para la elaboración de las pruebas de este trabajo de investigación, y su apoyo incondicional durante mi estancia en la Universidad de Navarra.

Al Dr. Enrique César por su ayuda y tiempo dedicado a este trabajo, durante estos dos años de investigación, ya que fueron de suma importancia para lograr concluir este proyecto.

Al Dr. Carlos Lucho y la Maestra Patricia Romero que, aunque el tiempo que convivimos con el proyecto fue poco, fue muy productivo y gracias a su ayuda y tiempo dedicado este trabajo pudo llevarse a cabo.

Al Dr. Iñigo Navarro de la Universidad de Navarra, en Pamplona España, y su equipo de trabajo por su confianza y que me ayudaron bastante para poder complementar este trabajo de investigación y que hicieron que durante mi estancia me sintiera como en casa.

A la Presidencia Municipal de Hidalgo del Parral, Chihuahua, en especial al alcalde el Ing. Miguel Jurado Contreras y al Lic. Samuel Martínez, por su apoyo incondicional y su interés en este trabajo de investigación. Así como a la familia Barraza por abrirme las puertas de su casa y enseñarme más cosas de Hidalgo del Parral Chihuahua durante mi muestreo.

A mis amigos Carlos, César y Florentina que me escucharon y apoyaron durante esta etapa y que no se han olvidado de este servidor.

Gracias al Posgrado de Ingeniería de la UNAM por brindarme esta oportunidad y así cumplir una meta más de mi vida realizando algo que me gusta y permitirme dejar otro granito de arena para la ayuda del ambiente tanto en México como a nivel mundial.

Y por último, gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada para realizar estos estudios, así como de la beca mixta otorgada para realizar la estancia académica en España.

# Índice

Capítulo 1	Introducción .....	1
1.1	Justificación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos particulares .....	2
1.3	Hipótesis.....	3
1.4	Alcances y limitaciones .....	3
Capítulo 2	Marco teórico .....	4
2.1	Antecedentes.....	4
2.1.1	Residuo .....	4
2.1.2	Residuos peligrosos.....	4
2.1.3	Generación de los residuos peligrosos .....	5
2.1.4	Generación de jales mineros en México.....	6
2.1.5	Manejo de residuos peligrosos .....	8
2.1.6	Manejo de residuos peligrosos a partir de los jales mineros.....	8
2.1.7	Gestión de residuos peligrosos .....	11
2.1.8	Tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos .....	11
2.1.9	Estabilización/Solidificación .....	14
2.2	Estudios previos.....	17
2.2.1	Estabilización y solidificación de los residuos peligrosos, Barth E., et. al. Tecnología de la Contaminación revisión. No.186. Noyes Data Corporation. Nueva York, NY. 1990 .....	17
2.2.2	Capacidad de materiales de cemento en el proceso de inmovilización de residuos peligrosos, Poellmann, H. En Actas de la 15ª Conferencia internacional de la microscopía Cemento. Dallas, TX. 1993.....	17
2.2.3	El actual estado del arte de la inmovilización de metales pesados peligrosos en materiales a base de cemento. Actas de una conferencia de la Fundación de Ingeniería sobre Avances en Cemento y Concreto. American Society of Civil Engineers. Durham, NH. 1994.....	18

2.2.4 Permanencia de metales de contención en los desechos estabilizados y solidificados, Klich, I. Tesis de doctorado. Texas A&M University. 1997.....	18
2.2.5 Estabilización/solidificación de residuos utilizando Cemento Portland. Adaska A., et. al. Segunda edición. Portland Cement Association. Skokie, IL. PCA Publication No.: EB071.1998.....	18
2.2.6 Estabilización/solidificación con cemento portland para el tratamiento de residuos peligrosos. Wilk, C.M. Actas del IV Simposio y Exhibición Internacional sobre Contaminación Ambiental en Europa Central y Oriental. 1998.....	19
2.2.7 La zeolita en la mitigación ambiental, Fáber D., et. al., Revista Lasallista de Investigación, enero-junio, año/vol. 3, número 001, Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia, 2006.....	19
2.2.8 Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales. González A., Tesis de Maestría, UNAM, 2012 .....	20
Capítulo 3 Marco Jurídico .....	22
3.1 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).....	23
3.2 Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR).....	24
3.3 Normas Oficiales Mexicanas .....	25
Capítulo 4 Caso de estudio .....	27
4.1 Ubicación.....	27
4.2 Clima .....	28
4.3 Geología .....	29
4.4 Uso del suelo .....	31
4.5 Demografía .....	32
4.6 Caracterización de los jales .....	32
4.7 Plan de muestreo.....	34
Capítulo 5 Metodología .....	39
5.1 Diseño de experimentos .....	41
5.1.1 Definición de la unidad experimental .....	41
5.1.2 Definición de las variables de respuesta .....	41
5.1.3 Definición de factores y niveles .....	42
5.1.4 Diseño experimental .....	42

5.2 Muestreo.....	43
5.3 Caracterización de los jales.....	45
5.4 Elaboración de los monolitos.....	48
5.4.1 Mezcla Jal-CPC-Zeolita.....	48
5.4.2 Mezcla Jal-OPC-Arena.....	50
5.4.3 Mezcla Jal-CAC-Arena.....	51
5.5 Prueba de intemperismo acelerado.....	52
5.6 Extracto PECT.....	53
5.7 Prueba de Tanque.....	54
5.8 Prueba de compresión simple.....	55
5.8.1 Monolitos fabricados en la UNAM.....	55
5.8.2 Monolitos fabricados en la Universidad de Navarra.....	57
Capítulo 6    Resultados.....	58
6.1 Caracterización de los jales.....	58
6.2 Preparación de los monolitos.....	59
6.3 Prueba de intemperismo.....	60
6.4 Prueba PECT.....	62
6.5 Prueba de Tanque.....	65
6.6 Prueba de compresión simple.....	67
6.6.1 Monolitos fabricados en la UNAM.....	67
6.6.2 Monolitos fabricados en la Universidad de Navarra.....	69
Capítulo 7    Análisis de resultados.....	71
7.1 Caracterización de los jales.....	71
7.2 Solidificación/estabilización.....	73
7.2.1 Análisis estadístico de la prueba PECT.....	74
7.2.2 Análisis estadístico de la prueba de intemperismo acelerado.....	76
7.2.3 Análisis estadístico de la prueba de compresión simple.....	78
7.3 Aprovechamiento.....	81
Capítulo 8    Conclusiones y recomendaciones.....	83
Referencias.....	85



## Lista de figuras

Figura 2.1 Generación de residuos peligrosos por región (SEMARNAT, 2004).....	5
Figura 2.2 Generación de residuos peligrosos por tipo de industria y sector en México (SEMARNAT, 2008).....	6
Figura 2.3 Capacidad de manejo de residuos peligrosos industriales, 2012 (SEMARNAT, 2012).....	8
Figura 2.4 Interrelación de las alternativas de tratamiento para residuos peligrosos (Becerril y Navarrete, 1993). ....	13
Figura 3.1 Jerarquía jurídica en México, elaboró Jesús Fidel González .....	23
Figura 4.1 Ubicación de Hidalgo de Parral en Chihuahua (INEGI, 2009). ....	27
Figura 4.2 Temperaturas en Chihuahua del año 2012 (CLIMATE-DATA.org, 2015). ....	28
Figura 4.3 Regiones climáticas de Hidalgo de Parral Chihuahua (INEGI, 2009). ....	29
Figura 4.4 Geología en Hidalgo de Parral, Chihuahua (INEGI, 2009). ....	30
Figura 4.5 Uso del suelo en Hidalgo de Parral Chihuahua (INEGI, 2009). ....	31
Figura 4.6 Niveles de plomo los puntos de muestreo realizado por Barraza en 2015. ....	33
Figura 4.7 Niveles de arsénico en los puntos de muestreo por Barraza en 2015. ....	33
Figura 4.8 Niveles de mercurio en los puntos de muestreo por Barraza en 2015. ....	34
Figura 4.9 Localización de puntos a muestrear.....	35
Figura 5.1 Metodología.....	40
Figura 5.2 Puntos de muestreo. ....	44
Figura 5.3 Paisaje de la zona: A) Jales Blancos, B) Jales Rojos, C) Cuerpo de agua que cruza la presa de jales.....	45
Figura 5.4 a) Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110, b) Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 100. ....	48
Figura 5.5 A) Mezcla de los ingredientes para la creación de monolitos, B) Vaciado y fraguado del monolito. ....	49
Figura 5.6 A) Monolito sumergido en agua. B) Monolitos envueltos con película plástica impermeable.....	49
Figura 5.7 Molde para monolitos cilíndricos. ....	50
Figura 5.8 Monolitos hechos con OPC, en la Universidad de Navarra.....	51
Figura 5.9 Probetas que no fraguaron elaboradas con CAC.....	52
Figura 5.10 A) Monolitos en la cámara de intemperismo, B) Monolitos irradiados por la lámpara de rayos UV, C) Sensores de humedad y de concentración respectivamente de la cámara de intemperismo. ....	53

Figura 5.11 A) Muestra molida sometida a lavado con ácido acético B) Máquina agitadora empleada en la prueba, C) Filtrado de las muestras para su posterior análisis. ....	54
Figura 5.12 Monolitos sometidos a la prueba de tanque. ....	54
Figura 5.13 Muestras recolectadas durante la prueba de tanque. ....	55
Figura 5.14 Cortadora .....	56
Figura 5.15 A) Puesta del monolito bajo el cabezal de la máquina, B) Falla y ruptura de los monolitos. ....	57
Figura 6.1 Niveles de arsénico en ppm encada punto muestreado.....	59
Figura 6.2 Niveles de plomo en ppm en cada punto muestreado. ....	59
Figura 6.3 Brillo del monolito debido al acabado espejo. ....	60
Figura 6.4 Niveles de arsénico en partes por billón en el lixiviado generado por el lavado de las pruebas de intemperismo. ....	61
Figura 6.5 Niveles de plomo en partes por millón en el lixiviado generado por el lavado de las pruebas de intemperismo. ....	61
Figura 6.6 Concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales. ....	62
Figura 6.7 Concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales sometidos a intemperismo acelerado.....	63
Figura 6.8 Concentraciones de plomo lixiviado de la prueba de extracto PECT. .	65
Figura 6.9 Concentraciones de arsénico lixiviado de la prueba de extracto PECT. ....	65
Figura 6.10 Concentraciones medias de Pb del lixiviado de la prueba de Tanque. ....	66
Figura 6.11 Concentraciones medias del As del lixiviado de la prueba de Tanque. ....	66
Figura 6.12 Monolitos de CAC blanco colapsados al pasar 2.25 días. ....	67
Figura 6.13 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo acelerado. ....	68
Figura 6.14 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo acelerado. ....	69
Figura 6.15 Carga máxima media resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos fabricados en la Universidad de Navarra.....	70
Figura 7.1 Concentraciones de arsénico y su límite máximo permisible. ....	72
Figura 7.2 Concentraciones de plomo y su límite máximo permisible. ....	72
Figura 7.3 Gráfica quantil-quantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de As en lixiviado de la prueba PECT. ....	75
Figura 7.4 Gráfica quantil-quantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de Pb en lixiviado de la prueba PECT. ....	76

Figura 7.5 Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de As en lixiviado de la prueba de intemperismo acelerado.....	78
Figura 7.6 Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los datos experimentales de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo.....	79
Figura 7.7 Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los datos experimentales de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo.....	81

## Lista de tablas

Tabla 2.1 Procesos de tratamiento para la disposición final de los residuos peligrosos (Becerril, y Navarrete, 1993) .....	12
Tabla 3.1 Normas aplicables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (González, 2012).....	26
Tabla 4.1. Periodos geológicos en la zona de estudio .....	30
Tabla 4.2 Tipo de jal de acuerdo al punto de muestreo.....	36
Tabla 5.1 Niveles del factor concentración para el diseño de experimentos .....	42
Tabla 5.2 Efectos y variable de respuesta a considerar .....	42
Tabla 5.3 Coordenadas de los puntos muestreados .....	44
Tabla 5.4 Parámetros del equipo de absorción atómica para la cuantificación de arsénico.....	47
Tabla 5.5 Parámetros del equipo de absorción atómica para la cuantificación de plomo.....	47
Tabla 5.6 Masa y porcentajes considerados para la elaboración de monolitos con la mezcla Jal-CPC-Zeolita.....	48
Tabla 5.7 Masa para la elaboración de monolitos de la mezcla Jal-OPC-Arena...	50
Tabla 5.8 Masa para la elaboración de monolitos de la mezcla Jal-CAC-Arena...	51
Tabla 5.9 Parámetros para la prueba de compresión simple .....	56
Tabla 6.1 Concentraciones de plomo y arsénico totales de las muestras tomadas en Hidalgo del Parral, Chihuahua.....	58
Tabla 6.2 Resultados de las concentraciones de los lixiviados de la prueba de intemperismo.....	60
Tabla 6.3 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales. ....	62
Tabla 6.4 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales sometidos a intemperismo acelerado.....	63
Tabla 6.5 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT.....	64

Tabla 6.6 Concentraciones medias de Pb y As del lixiviado de la prueba de Tanque. ....	66
Tabla 6.7 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo acelerado. ....	67
Tabla 6.8 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo acelerado. ....	68
Tabla 6.9 Carga máxima media resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos fabricados con arena en la Universidad de Navarra. ....	69
Tabla 7.1 Medias de los resultados de las pruebas realizadas a los monolitos. ...	73



## Capítulo 1 Introducción

Conforme al crecimiento que experimenta la humanidad se ha creado un ciclo imparables y, al parecer, sin marcha atrás para fabricar productos que buscan satisfacer “necesidades” que han aparecido a medida que el mismo hombre ha ido organizando su sociedad. El aumento de la actividad industrial del sector químico, la extracción de petróleo, la actividad minera y los residuos que ésta genera, entre otras actividades, han dado origen a la problemática de los residuos peligrosos. Desde los primeros incidentes relacionados con este tipo de residuos en el canal de LOVE en la ciudad de Niágara Falls (EE. UU) (Kiely, 2003) en donde varios cientos de personas enfermaron por estar expuestas a residuos peligrosos, por otra parte, el envenenamiento con mercurio de varios habitantes de la ciudad japonesa de Minamata (Kiely, 2003), y recientemente el derrame de jales mineros en el río Sonora, que afectó a 7 municipios de ese Estado (Sánchez, 2014).

Cabe mencionar que los residuos peligrosos en México son cada vez más, y la industria genera los desperdicios más nocivos y crea otros nuevos (SEMARNAT, 2008). Por lo que es de suma importancia encontrar o proponer alternativas para su tratamiento y su disposición final.

La presente tesis aborda una alternativa para tratamiento de residuos peligrosos, que se han generado a lo largo del tiempo debido a una de las principales actividades económicas de México y una de las más antiguas, en concreto la minería. Este estudio está enfocado al tratamiento de los metales no ferrosos contenidos en los jales mineros, de la mina “La Prieta” localizada en Hidalgo del Parral municipio del estado de Chihuahua. El proceso de la solidificación-estabilización, que se ha comprobado anteriormente, es una buena alternativa para el tratamiento de este tipo de residuos, es viable y además es una técnica económica (González, 2012).

### 1.1 Justificación

Actualmente en México existe una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos (Volke, 2002).

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química



y electrónica). De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, de la Secretaría de Economía, declara que la industria minera nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo.

En general, todas las etapas que incluye un proceso minero, con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares, causan impactos ambientales de importancia y magnitud altas. En todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera. Sin embargo, dos de las etapas que más impactos ambientales producen son las de explotación de los minerales y la de fundición/refinación.

Para considerar el uso de una tecnología de tratamiento para un sitio en particular. Es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y en la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

- Realizar propuestas para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos considerando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

### 1.2.2 Objetivos particulares

- Llevar a cabo una revisión bibliográfica de la normativa nacional, así como de artículos específicos considerando los planes de manejo de este tipo de industrias.
- Caracterizar las muestras provenientes de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua, mediante pruebas analíticas en el laboratorio.
- Realizar la solidificación/estabilización de los residuos peligrosos encontrados en las muestras provenientes de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua, utilizando como matriz diferentes tipos de mezclas como: Cemento Portland Compuesto (CPC)/ zeolita basándose en un diseño de experimentos y Cemento Portland Ordinario (OPC)/Arena en la Universidad de Navarra, Pamplona, España.
- Formular un diseño estadístico del experimento para la realización de pruebas con los monolitos obtenidos de las muestras, provenientes de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua.



- Someter a diferentes pruebas físicas, mecánicas, de lixiviación, así como de intemperismo acelerado a las estructuras monolíticas resultantes de la estabilización/solidificación.

### 1.3 Hipótesis

La estabilización/solidificación es una alternativa de disposición final y reutilización ambientalmente segura de los residuos metalúrgicos no ferrosos provenientes de los jales mineros.

### 1.4 Alcances y limitaciones

- Se ensayarán muestras de jales mineros de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua.
- La cuantificación de los metales no ferrosos que se analizó están sujetos a la capacidad del equipo disponible para su estudio.
- Los elementos inmovilizados son los metales contenidos en los residuos y son los más peligrosos según la normatividad mexicana.
- Solo se analizó los bloques elaborados con cemento, zeolita y arena con diferentes concentraciones basado en un diseño de experimentos.
- Se realizó pruebas de ensayo a compresión, erosión, lavado para determinar lixiviación y de intemperización acelerada.
- Se aplicó la prueba de tanque de acuerdo a la Norma EA NEN 7375:2004, como una garantía de que el tratamiento funciona eficazmente.



## Capítulo 2 Marco teórico

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Residuo

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a un residuo como:

“Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.”

#### 2.1.2 Residuos peligrosos

Según SEMARNAT son: aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

Los residuos peligrosos se clasifican para su tratamiento de la siguiente manera (Rich, 1987):

- 1) Compuestos inorgánicos sin metales pesados
- 2) Compuestos inorgánicos con metales pesados
- 3) Compuestos orgánicos sin metales pesados
- 4) Compuestos orgánicos con metales pesados
- 5) Compuestos radiactivos
- 6) Compuestos biológicos
- 7) Compuestos inflamables
- 8) Compuestos explosivos
- 9) Mezcla aceite/agua

Esta clasificación coincide también a la NOM-052-SEMARNAT-2005, sólo que dicha norma no incluye a la mezcla aceite/agua, y no tiene una clasificación amplia en los compuestos orgánicos, ya que los considera dentro su clasificación de Toxicidad ambiental; además no considera los compuestos radiactivos. Los jales mineros se pueden considerar dentro de la clasificación 2 compuestos inorgánicos con metales pesados. Sin embargo, considerando el tipo de tratamiento que se pretende dar es recomendable clasificarlos de la siguiente manera (Kiang, et. al., 1982):





A. De acuerdo al estado físico

Esta clasificación es necesaria para la selección y diseño del sistema de tratamiento del residuo, el sistema de alimentación y la elección del equipo de proceso.

Con base en las características físicas, los materiales residuales se clasifican como: gases, líquidos, sólidos y suspensiones.

B. De acuerdo con el estado químico

Es necesario para la selección de los parámetros apropiados de diseño, la selección de materiales de construcción, el diseño y la posibilidad de recuperación de productos o subproductos, los requerimientos energéticos o consumibles y los sistemas de tratamiento para sus efluentes.

### 2.1.3 Generación de los residuos peligrosos

La problemática asociada a los residuos peligrosos (RP) tiene dos grandes líneas; por un lado, la que se deriva de la presencia de sitios ya contaminados y que requieren su remediación y la otra referente a la prevención de la contaminación proveniente de las fuentes en operación. En el país, para el periodo 2004-2011, se tenían 68 733 empresas registradas y generaron 1.92 millones de toneladas (Semarnat, 2012); además se tenían identificados 297 sitios contaminados con RP, de los cuales 119 se habían caracterizado -esto es, se clasificaron y priorizaron de acuerdo al grado de riesgo que representan para la salud y el ambiente-, y 12 se consideraban como rehabilitados o en proceso de rehabilitación. Los estados que concentran el mayor número de sitios con RP son San Luis Potosí (15%), el Estado de México (10%), Aguascalientes (9.4%), Coahuila (7.1%) y Veracruz (6.7%). Cinco entidades no reportan ningún sitio con RP: Baja California Sur, Ciudad de México, Guerrero, Quintana Roo y Tabasco, como se muestra en la figura 2.1.

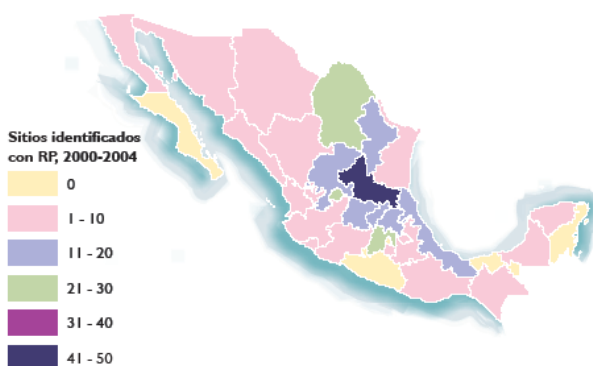


Figura 2.1 Generación de residuos peligrosos por región (SEMARNAT, 2004).



No existe certeza sobre la generación de residuos peligrosos (RP) en México. En 1999 se estimó una generación de casi 3.2 millones de toneladas (de 12 mil 514 empresas que lo manifestaron), en el año 2000 se estimó una generación de 3.7 millones de toneladas (27 mil 280 empresas) y en 2004 esta cifra subió a 6.17 millones de toneladas (35 mil 304 empresas). En México los principales generadores de pasivos ambientales son: PEMEX con contaminación debida a hidrocarburos y por el otro la industria minera debida a la generación de los jales y a su lixiviación, en algunas partes de la República Mexicana la principal actividad económica es la explotación minera, figura 2.2 (SEMARNAT, 2008).

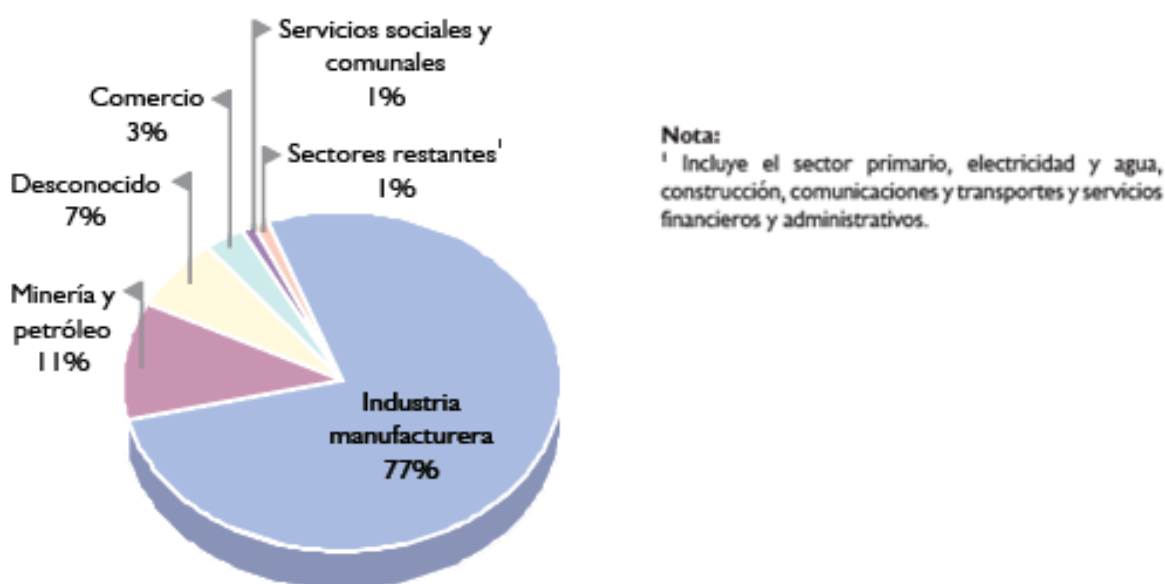


Figura 2.2 Generación de residuos peligrosos por tipo de industria y sector en México (SEMARNAT, 2008).

#### 2.1.4 Generación de jales mineros en México

La industria minera, una de las más antiguas y de mayor utilidad para el hombre, tiene un alto impacto, en virtud de que afecta el ambiente desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Genera una gran cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos, principalmente en forma de gases, humos, partículas, aguas residuales y jales -colas y escorias-, además de aceites, llantas, plásticos, etcétera. (Gutiérrez y Moreno, 2007).

La minería en México tiene una larga historia, si se considera que antes de la época prehispánica ya se realizaban actividades mineras y metalúrgicas en lo que hoy es Taxco, Guerrero, en las Sierras de Querétaro, Oaxaca y Chiapas, así como en la



Cuenca del Río Balsas. Durante el Siglo XVI, cobró auge esta actividad constituyéndose en polo de desarrollo y dando lugar a la creación de ciudades como Chihuahua, Durango, Guanajuato, Saltillo, San Luis Potosí y Zacatecas. Al mismo tiempo, las formas de producción empleadas en la minería fueron causa de graves tensiones sociales, mismas que contribuyeron a desencadenar la Revolución de 1910 y al establecimiento en la Constitución de 1917 del precepto sobre el dominio original de la nación sobre los recursos del subsuelo, en el que se basa la normatividad sobre el aprovechamiento de los minerales y metales (Cortinas, 2007).

Generalmente, estos jales contienen sulfuros metálicos residuales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $(\text{Fe}_{1-x}\text{S})$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero, et. al., 2008).

La minería en México explota depósitos a cielo abierto o subterráneos, más no aprovecha el mineral presente en la plataforma marina. Para separar el mineral de todos aquellos materiales sin valor se utilizan básicamente dos métodos: la flotación y la hidrometalurgia. Las afectaciones al ambiente, incluida la generación de residuos peligrosos, se relacionan con todos o alguno de los siguientes fenómenos (Gutiérrez y Moreno, 2007):

- Destrucción de la capa de suelo, flora y fauna durante el descapote.
- Formación de movimientos de sedimentos hacia cuencas del área.
- Oxidación de los minerales insolubles y formación de sustancias solubles ácidas con alto contenido de metales (drenaje ácido).
- Alto consumo de agua.
- Descarga de lixiviados con presencia de iones metálicos y reactivos tóxicos. En el caso de la hidrometalurgia el pH es muy ácido y la toxicidad mucho más elevada que en la flotación.
- Generación de jales como remanente del beneficio.
- Generación de aceites gastados, llantas, disolventes, polímeros, etcétera.
- Generación de ruido y emisiones (polvos, gases y humo).
- Generación de basura doméstica.
- Lodos de plantas de tratamiento de agua doméstica.

La industria minera de México agrupa una diversidad de empresas, desde el minero que explota individualmente yacimientos, hasta empresas de gran envergadura. Los procesos de beneficio son generalmente realizados por empresas de tamaño mediano o grande. Aun cuando se supone que todas las minas cuentan con presa de jales, es posible que se presenten casos de minas pequeñas que no las tienen, y que envíen las colas directamente a los cuerpos de agua cercanos. Hay otras



minas en las que sus presas de jales no están preparadas para manejar volúmenes grandes, regímenes de lluvia extremos o eventos sísmicos (Gutiérrez y Moreno, 2007).

Por lo tanto, el sector minero se enfoca en mejorar las condiciones en que se encuentran las presas de jales, y se ha propuesto la normatividad que regulará el diseño, construcción y operación, con base en la topografía del terreno, la hidrología de la zona y la sismicidad de la región.

### 2.1.5 Manejo de residuos peligrosos

El manejo y/o la disposición segura de los residuos peligrosos (RP) se aborda mediante la prevención orientada a la reducción de los volúmenes de generación, reciclaje y reúso y finalmente al tratamiento de los residuos para reducir su peligrosidad o volumen. Los mayores avances se han registrado en la capacidad de reciclaje y tratamiento. A nivel de entidad federativa, en 2011 los únicos con infraestructura autorizada para la recolección y transportación de RP fueron el Distrito Federal (500 t; 66.5% de la infraestructura total), estado de México (246 t; 32.7%), Nuevo León (4 t; 0.5%) y Jalisco (2 t; 0.3%) por lo que hace falta trabajar en este aspecto ya que su capacidad de manejo es baja como se muestra en la figura 2.3.

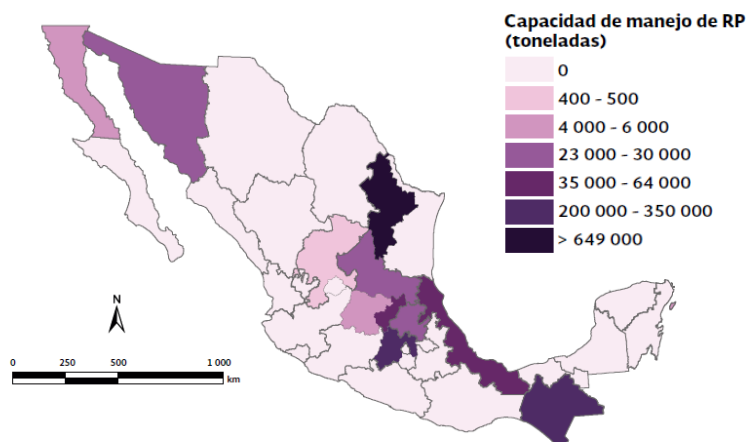


Figura 2.3 Capacidad de manejo de residuos peligrosos industriales, 2012 (SEMARNAT, 2012).

### 2.1.6 Manejo de residuos peligrosos a partir de los jales mineros

A fin de facilitar la comprensión de los procesos que intervienen para lograr el manejo ambiental de los residuos mineros y su disposición segura, se resumen a continuación algunos aspectos básicos (Cortinas, 2007).



Los residuos mineros son los conocidos como colas (tailings), relaves o jales; los cuales son generados durante los procesos de recuperación de metales a partir de minerales metalíferos tras de moler las rocas originales que los contienen y mezclar las partículas que se forman con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de los metales. Por ejemplo, un mineral típico puede contener alrededor de 6 por ciento de zinc y 3 por ciento de plomo, que al ser concentrados generan alrededor de 850 kilogramos de residuos sólidos y una cantidad equivalente de agua conteniendo cerca de un kilogramo de sustancias químicas residuales, por cada tonelada de mineral procesado (Gutiérrez y Moreno, 2007).

La mayoría de los relaves o jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos que en cierta manera se comporta como un suelo, por lo que aplican para su caracterización los principios de la mecánica de suelos; a condición de que se reconozcan los procesos de consolidación que tienen lugar y la forma en que fluyen los lodos. Entre las diferencias que tienen estos residuos con respecto de los suelos comunes, se encuentran el hecho de que su densidad y cuerpo son inicialmente bajos y crecen con el tiempo (Cortinas, 2007).

Frecuentemente, para conservar y reusar el agua de proceso, así como para concentrar los lodos, se suele someterlos a un proceso de deshidratación hasta que alcancen una consistencia tal que facilite su transporte hacia las instalaciones de depósito, lo que ocurre cuando el contenido de sólidos es de 40 a 50 por ciento y el de agua de 150 a 100 por ciento, respectivamente; lo cual constituye un lodo con propiedades de fluido. Los lodos son transportados a las presas o depósitos mediante ductos, ya sea por gravedad o con ayuda de bombeo, y a través de descargas o por métodos de descarga por inyección subacuosa, bajo el agua superficial. También, puede ocurrir que se remueva agua adicionalmente, para crear una descarga engrosada o densa. La forma en que se depositan los relaves en las presas influyen de manera importante en su comportamiento y en la constitución de capas con diferente grosor de partículas y humedad (Gutiérrez y Moreno, 2007).

A medida que las partículas de los relaves se empaquetan bajo el efecto de la gravedad, se provoca el fenómeno de *consolidación*, el cual aporta tres beneficios: aumento de sólidos que pueden ser almacenados en un volumen dado; aumento del cuerpo del suelo por eliminación de agua; y disminución de la cantidad de filtraciones hacia el subsuelo. Cuando el proceso se completa, es común encontrar contenidos de 20 por ciento de agua unida a las partículas, aún en medios muy áridos con elevada evaporación. La permeabilidad de los relaves depositados en una presa es utilizada como un indicador de consolidación y potencial de filtraciones. Como resultado del depósito segregado de partículas por influencia de la gravedad, la permeabilidad es mayor cerca del punto de depósito y disminuye progresivamente.



Un grave peligro, como consecuencia de fuerzas dinámicas como las que ocurren durante un terremoto, es la posibilidad de licuefacción de los relaves por la vulnerabilidad que les ocasiona el que se trate de depósitos débiles de partículas en un estado libre y saturado. En tales condiciones, y de ocurrir una fuga, los relaves pueden fluir a distancias considerables, a gran velocidad, y con consecuencias desastrosas. Dichas consecuencias se agravan cuando los metales en los relaves se encuentran en forma de sulfuros y existe un gran potencial de generación de ácidos en presencia de oxígeno y agua. También, requieren particular atención los relaves que contienen otros elementos potencialmente tóxicos como el arsénico, los que presentan altas concentraciones del cianuro empleado en el beneficio de metales o los que pueden provocar la contaminación por sales utilizadas en los procesos salinos (Gutiérrez y Moreno, 2007).

Diversos esquemas de regulación directa y de promoción de la autorregulación, como los que se citan a continuación, son aplicables y de hecho son aplicados por empresas mineras en México.

Como todas las empresas que tienen emisiones al aire, descargas al agua y generan residuos peligrosos, las empresas del sector minero requieren obtener licencias de funcionamiento, permisos de descargas y autorizaciones de manejo de residuos peligrosos, así como informar de manera regular acerca del cumplimiento de las disposiciones normativas en la materia. A la vez, estas empresas pueden recurrir a la obtención de una Licencia Ambiental Única (LAU), lo que reduce a un sólo trámite la obtención de todas las autorizaciones antes mencionadas. Así mismo, en lugar de reportes o manifiestos semestrales, pueden llenar una Cédula de Operación Anual (COA) y llevar de esta manera un control multimedia de la liberación al ambiente de sustancias tóxicas (Cortinas, 2007).

La normatividad en la materia requiere consolidarse con la publicación y entrada en vigor de los diversos proyectos de Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) en las cuales se ha venido trabajando, tales como las que se mencionan a continuación (Cortinas, 2007):

- Indican los criterios para la selección de sitios para ubicar las presas de jales.
- Establecen los requisitos para el diseño y construcción de presas de jales.
- Señalan las especificaciones para la operación y cierre de las presas de jales.
- Plantean el relleno hidráulico con jales de las minas.
- Hacen referencia al beneficio de minerales por lixiviación

La autorregulación, por su parte, es promovida a través de las auditorías voluntarias, la adhesión a los programas voluntarios de Protección Ambiental y Competitividad





Industrial o de Gestión Ambiental de la Industria en México, actividades todas ellas en las que se alienta la certificación de conformidad con la normatividad ISO 14000.

### **2.1.7 Gestión de residuos peligrosos**

Hay varias alternativas para el manejo de los residuos peligrosos. Las principales opciones de manejo son las siguientes (PROFEPA, 2010):

**Reciclaje:** La alternativa más productiva es la que después de un proceso específico convierte a los residuos peligrosos en materia prima que se puede utilizar después en otro proceso productivo diferente.

**Destrucción:** También existe la opción de destruir los residuos peligrosos, al hacerlo las cenizas generadas pueden ser confinadas de una manera mucho más práctica y así ser clasificados como residuos estabilizados. Un ejemplo son medicamentos caducos o fuera de especificaciones.

**Confinamiento:** Los residuos peligrosos se detoxifican, se separan y concentran los componentes peligrosos en volúmenes reducidos y finalmente se estabilizan para evitar la generación de lixiviados.

### **2.1.8 Tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos**

El principal objetivo del tratamiento y disposición de un residuo, es el de minimizar la exposición de los seres humanos a dichos materiales tóxicos o peligrosos. Es conveniente aclarar que ninguna ruta de disposición ofrece una seguridad absoluta y cualquier tecnología de tratamiento tiene un nivel asociado de riesgo (Griffin, 2009)

Las principales maneras de disposición final para los residuos peligrosos son las siguientes (Sakurai, 1984):

- ✓ Incineración
- ✓ Pirólisis
- ✓ Relleno industrial o confinamiento controlado
- ✓ Esparcimiento sobre el suelo como composta (cuando son biodegradables)
- ✓ Inyección en pozos profundos

De las alternativas disponibles de disposición final de residuos peligrosos, la más importante en México es principalmente la utilización del confinamiento controlado y la inyección en pozos profundos geológicamente estables (Cortinas, 2014)

Aun así, muchos de los residuos peligrosos a disponerse en rellenos químicos deben ser tratados, procesados o preparados de alguna manera antes de su disposición, a fin de reducir sus efectos adversos sobre la salud humana y el medio



ambiente. Por lo que es conveniente analizar las principales alternativas para su preparación para disponer de ellos.

- **Solidificación**

El término solidificación define colectivamente aquellas tecnologías de tratamiento que fijan o encapsulan residuos dentro de la matriz sólida del producto final. La técnica de fijación ata los residuos química y físicamente usando agentes de solidificación. El método de encapsulación cubre los residuos físicamente por agentes de solidificación. Ambas técnicas reducen la permeabilidad de los residuos y crean productos finales de significativa resistencia al deslizamiento (Sakurai, 1984).

- **Reducción de volumen**

El proceso más usado en la reducción del volumen de residuos peligrosos es la incineración. Normalmente los residuos peligrosos orgánicos pueden ser destruidos y/o destoxificados mediante la incineración. Muchos de ellos se destruyen completamente y otros dejan un poco de residuos sólidos que pueden o no ser peligrosos.

Como procesos de destoxificación se pueden considerar los térmicos, químicos o biológicos, en la tabla 2.1 se muestran los procesos de tratamiento de los residuos peligrosos antes de su disposición final (Becerril y Navarrete, 1993).

Para seleccionar el proceso más apropiado es necesario considerar las características de los residuos a procesar, su cantidad, costo, necesidad de operadores especializados, etc.

**Tabla 2.1 Procesos de tratamiento para la disposición final de los residuos peligrosos (Becerril, y Navarrete, 1993)**

Procesos	Ejemplos
<b>Térmicos</b>	Incineración
	Pirólisis
<b>Procesos químicos</b>	Intercambio de iones
	Neutralización
	Oxidación
	Reducción
<b>Procesos biológicos</b>	Lodo Activado
	Filtro biológico
	Lagunas aireadas
	Lagunas de estabilización





### ▪ Degradación

Algunos métodos de degradación química, tales como la hidrólisis, dechloración, fotólisis y oxidación, están en proceso de desarrollo y/o se usan principalmente para los plaguicidas. La hidrólisis es el mejor método para destruir plaguicidas organofósforos. La dechloración química puede utilizarse para degradar plaguicidas policlorados. El uso de oxidantes fuertes puede ser conveniente para algunos plaguicidas y herbicidas. Sin embargo, estas alternativas son generalmente más costosas que otras disponibles, y en muchos casos no han sido demostradas todavía a gran escala (Sakurai, 1984). En el esquema que aparece en la figura 2.4, se muestra la interrelación de las diferentes alternativas de tratamiento que se pueden aplicar para el manejo de residuos peligrosos (Becerril y Navarrete, 1993).

Uno de los procesos más económico y fácil de utilizar para dar tratamiento a los jales mineros es la estabilización/solidificación (E/S) que emplea aditivos para la reducción de movilidad de los contaminantes como resultante de este tratamiento se obtiene un producto que puede ser utilizado en el ámbito de la construcción y además hace al residuo aceptable a los requerimientos actuales para la disposición en el suelo (González, 2012).

La E/S es un proceso de tratamiento designado para mejorar el manejo de residuos y las características físicas, disminuir las áreas superficiales a través de la cual los contaminantes se pueden transferir o filtrar, limitar la solubilidad o desintoxicar los constituyentes peligrosos (Walters, 1989) .

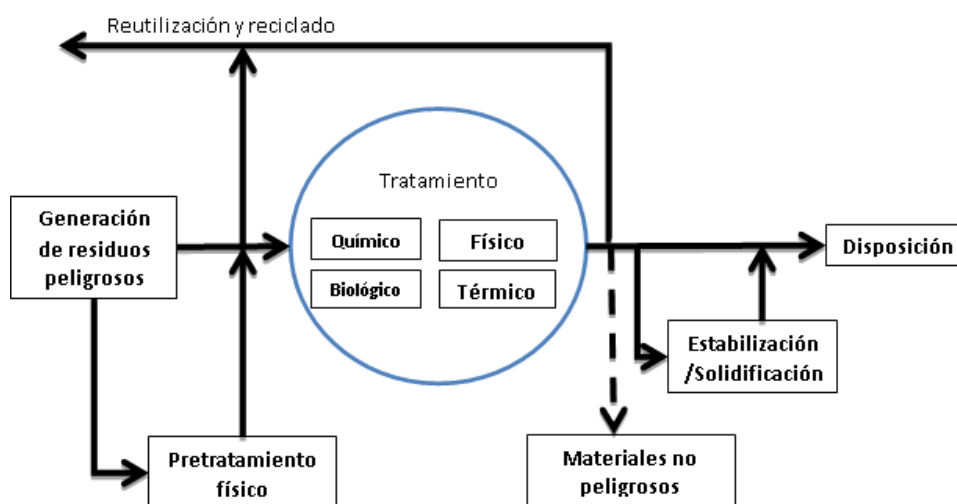


Figura 2.4 Interrelación de las alternativas de tratamiento para residuos peligrosos (Becerril y Navarrete, 1993).



Refiriéndose a las técnicas que inmovilizan los residuos en una masa sólida. La solidificación hace que la masa solidificada pueda ser el residuo original o el residuo previamente estabilizado. La adición de reactivos facilita la solidificación de dicha masa con una mayor resistencia, menor compresibilidad y menor permeabilidad del residuo (Romero et al., 2007)

### **2.1.9 Estabilización/Solidificación**

Por su composición elemental, varios residuos, como los metales pesados, no se pueden destruir o cambiar por medios físicos o químicos. Por lo que, una vez que se ha separado de la solución acuosa y concentrado en ceniza o lodo, los constituyentes peligrosos se deben confinar en compuestos estables que cumplan con las restricciones establecidas en la reglamentación para la disposición en el suelo (Mackenzie y Cornwell, 2012).

El proceso de solidificación convierte al residuo (líquido o semilíquido) en otra forma física que se pueda manejar, almacenar y disponer de manera más segura y conveniente. De esta manera, se reduce también el volumen del residuo al remover a los líquidos presentes. Existe una gran variedad de materiales de solidificación y de técnicas disponibles. En todos los casos, el método de solidificación no debe ser un proceso reversible que pueda permitir que el sólido se convierta en líquido nuevamente. Una de las consideraciones más importantes para evaluar el método de solidificación, es medir la cantidad de lixiviado que produce la matriz sólida, lo cual también determinará el grado de tratamiento, contención y vigilancia que se requiera (Pojasek, 1982).

El proceso de fijación más simple es la absorción, el cual como su nombre lo indica absorbe líquido libre que contiene metales peligrosos disueltos hasta obtener un producto final seco. Algunos medios de sorción típicos son: cenizas muy finas, cal, arcilla, vermiculita y zeolita.

Entre los sorbentes más sofisticados que también involucran reacciones puzolánicas (endurecimiento acuoso), se encuentra la cal-ceniza muy fina y el cemento portland. Los sistemas de puzolana cemento portland se comenzaron a utilizar en residuos nucleares e industriales. En ocasiones se necesitó modificar esta tecnología ya que algunos materiales inhiben la acción aglutinante. Este problema se resolvió adicionando silicato soluble, arcilla seleccionada, sustancias emulsivas o surfactantes (González, 2012).

La selección de materiales solventes involucra entre otros factores a los efectos químicos, costos y cantidades requeridas para producir un producto sólido



adecuado para disposición en el suelo. El criterio de selección incluye el pH del residuo, la cantidad de sorbente necesario para eliminar todos los líquidos solubles, la compatibilidad por reactividad del residuo y sorbente, el nivel y carácter de la contaminación que se introduzca en el sorbente y las propiedades del aglutinante químico para algunos contaminantes específicos (Becerril y Navarrete, 1993).

Varios materiales inmovilizan a los residuos peligrosos por medio de la encapsulación, en lugar de la sorción o reacción química. Los polímeros orgánicos, agentes vítreos como el vidrio y asfaltos son ejemplos de dichos materiales.

Existen también agentes patentados inorgánicos, inorgánicos/orgánicos y orgánicos disponibles comercialmente para los procesos de estabilización y solidificación. En estos casos, se requiere equipo mecánico especializado para el proceso de encapsulación, con el fin de asegurar un mezclado completo antes del endurecimiento del producto final. Estos costos se deben considerar junto con los costos de los reactivos. En la selección del material estabilizante y del equipo de mezclado la principal consideración es la compatibilidad del residuo y la matriz (el material de torsión o encapsulación) (Becerril y Navarrete, 1993).

El problema más serio de estos procesos es la incertidumbre acerca de su efectividad a largo plazo. Con base en la experiencia e inferencia sobre el carácter químico, los agentes inorgánicos parecen ser más confiables que los orgánicos. Ya que en un estudio anterior resultó con mejor resultado la solidificación con jales mineros que contienen principalmente metales que con lodos provenientes de una refinera que contenían una gran carga de materia orgánica (González, 2012).

Muchas de las propuestas empleadas en la estabilización y solidificación de residuos industriales, se originaron en el área de manejo de residuos radiactivos. La principal razón para estabilizarlos, fue la necesidad de producir un material sólido que cumpliera con los requerimientos del Departamento de Transportes (DOT, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos de América, de que se convirtieran a una forma sólida antes de embarcarse. Por lo que se trabajó en desarrollar materiales sólidos que fueran apropiados con la contención de residuos radiactivos a largo plazo. Los procesos resultantes se diseñaron para producir un material que cumpliera con los siguientes objetivos (Pojasek, 1982):

- Evitar escurrimientos con el material empleado
- Que no existiera degradación.
- Disminuir la posibilidad de exposición a la radiación
- Utiliza un método de producción fácil y barato



Se logró cumplir con los requerimientos anteriores, por medio de sistemas que emplean mezclas de cemento, material bituminoso, resinas de urea formaldehído o vidrio. Muchos de los procedimientos para evaluar las técnicas de contención de residuos radiactivos se han utilizado para probar los procesos de fijación de lodo industrial y se han obtenido resultados favorables (González, 2012).

La solidificación de residuo industrial difiere de la contención de residuos radiactivos, en que frecuentemente los procesos industriales producen volúmenes muy grandes de residuo que presenta una toxicidad relativamente baja. Resultaría innecesario y antieconómico aplicar a estos residuos las rigurosas propuestas para la contención de un residuo nuclear, por lo que para estos casos se ha logrado adoptarlo, convirtiéndolo en una manera económica y recomendable para tratar los residuos peligrosos, como en este caso los provenientes de los jales mineros. Ya que específicamente, el proceso de solidificación asegura mecánicamente a los contaminantes dentro de una matriz sólida (un bloque monolítico de residuo con una alta integridad estructural). La estabilización, por otro lado, involucra la adición de materiales que limitan la solubilidad o la movilidad de los constituyentes del residuo, aun cuando las características físicas del manejo del residuo no se mejoren. Su intervalo de aplicación varía ampliamente desde residuos de sulfato/sulfito hasta metales y solventes, dependiendo de la metodología particular que se utilice. La USEPA constantemente evalúa nuevas técnicas de estabilización/solidificación (Becerril y Navarrete, 1993).

Los procesos de estabilización y solidificación tienen como objetivo: mejorar las características físicas y de manejo de residuos, disminuir el área superficial a través de la cual los contaminantes pueden transferirse a un lixiviado, limitar la solubilidad y o reducir la toxicidad de los constituyentes peligrosos.

Los residuos de baja toxicidad como los lodos de sulfato de calcio, de hidróxido de aluminio, entre otros, se solidifican por lo general con la adición de un material puzolánico como la ceniza muy fina, cal y polvo del horno de cocción.

Debido a la reglamentación estricta en la disposición de residuos industriales peligrosos se puede considerar a esta tecnología como una alternativa económicamente factible para la disposición en rellenos sanitarios (Pojasek, 1982).



## 2.2 Estudios previos

### **2.2.1 Estabilización y solidificación de los residuos peligrosos, Barth E., et. al. Tecnología de la Contaminación revisión. No.186. Noyes Data Corporation. Nueva York, NY. 1990**

Este manual ofrece una visión detallada del estado de la técnica de solidificación y estabilización de residuos peligrosos que se realizó en la década de los 90's e incluye los procesos inorgánicos y orgánicos, así como los procedimientos físicos y químicos de pruebas que se utilizan para evaluar las tecnologías de solidificación y estabilización. También brinda orientación sobre la selección y el uso de las tecnologías de solidificación y estabilización a través de una detección y evaluación comparativa a escala piloto. Se presenta el tratamiento a escala real con numerosos ejemplos de tecnologías in situ y ex situ. Además, se muestran aspectos del control de calidad, la seguridad y consideraciones ambientales para el tratamiento de residuos, así como los equipos, costos y requisitos reglamentarios para este tipo de tratamiento.

### **2.2.2 Capacidad de materiales de cemento en el proceso de inmovilización de residuos peligrosos, Poellmann, H. En Actas de la 15ª Conferencia internacional de la microscopía Cemento. Dallas, TX. 1993.**

En este trabajo se investiga y se resumen las capacidades de los materiales de cemento en la inmovilización de los materiales de desechos peligrosos, incluyendo los contaminantes orgánicos e inorgánicos. Se discute la fijación de cloro, aniones, metales pesados, y algunos compuestos orgánicos que dependen fuertemente del tipo de residuo y cemento utilizado. Dependiendo de las composiciones químicas y minerales, diversos sistemas deben ser utilizados, y es necesario realizar las investigaciones detalladas son necesarias para cada material de desecho. En la mayoría de los casos, la fijación en la red cristalina juega un papel importante, y la formación de una estructura microporosa del material hidratado intensifica la calidad del proceso de fijación y la solidificación. La combinación de diferentes depósitos de minerales, por ejemplo, de material anhidro y productos de hidratación, puede aumentar el proceso de inmovilización de materiales peligrosos. En el proceso de fijación, una sustancia tóxica se incorpora en redes cristalinas que son necesarias para la inmovilización, pero una microestructura densa puede afectar la lixiviación.



### **2.2.3 El actual estado del arte de la inmovilización de metales pesados peligrosos en materiales a base de cemento. Actas de una conferencia de la Fundación de Ingeniería sobre Avances en Cemento y Concreto. American Society of Civil Engineers. Durham, NH. 1994**

En este trabajo se analiza el estado del conocimiento en la década de los 90 que implica la solidificación/estabilización de metales en materiales a base de cemento. La noción común de que ninguna otra reacción se produce entre los residuos y el aglutinante después de la solidificación/estabilización no se sostiene para el cemento portland, porque no se considera el posible deterioro a largo plazo debido a la corrosión causada por el medio ambiente. El informe analiza los distintos tipos de ataque químico que los materiales a base de cemento Portland están propensos a la corrosión, entre ellas por el agua blanda, agua subterránea, agua y dióxido de carbono que soporta. Este documento está dirigido a estimular la conciencia sobre la complejidad de los residuos de inmovilización en materiales de este tipo.

### **2.2.4 Permanencia de metales de contención en los desechos estabilizados y solidificados, Klich, I. Tesis de doctorado. Texas A&M University. 1997.**

Esta tesis doctoral examina la literatura que había disponible en la década de los 90 sobre el contenido de metales en los residuos solidificados y estabilizados tratados con ligantes inorgánicos, tales como el cemento Portland, cenizas volantes, y otros silicatos solubles. La investigación examina las alteraciones mineralógicas de siete metales que fueron estabilizados/solidificados, los cuales se depositaron y se almacenaron como residuos en vertederos durante un periodo de 6 años. Pasado ese periodo de tiempo, se observó que el grado de degradación fue de ligero a moderado y el agrietamiento fue observado desde una escala submicroscópica hasta una escala macro. Además, se documentaron características químicas de las muestras sometidas a la intemperie. La investigación verificó que los desechos tratados con cemento, como el concreto endurecido, tanto física como químicamente en condiciones ambientales son metaestables.

### **2.2.5 Estabilización/solidificación de residuos utilizando Cemento Portland. Adaska A., et. al. Segunda edición. Portland Cement Association. Skokie, IL. PCA Publication No.: EB071.1998**

Este boletín de ingeniería aclara el papel de cemento Portland en la estabilización/solidificación de los desechos peligrosos y está dirigido a ingenieros consultores, proveedores de materiales, funcionarios gubernamentales, los propietarios de sitios



de residuos, y el público en general. La publicación resume la química del cemento Portland y los procesos de hidratación del cemento, así como la influencia de aditivos de tratamiento de estabilización/solidificación, y contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, el informe analiza la base reguladora para el uso del tratamiento y describe los diversos métodos de prueba para la caracterización de tratamiento.

### **2.2.6 Estabilización/solidificación con cemento portland para el tratamiento de residuos peligrosos. Wilk, C.M. Actas del IV Simposio y Exhibición Internacional sobre Contaminación Ambiental en Europa Central y Oriental. 1998**

En este trabajo se discute la aplicabilidad de la tecnología de estabilización/solidificación a base de cemento portland a diversos residuos; la química del cemento de base relativa al tratamiento de estabilización/solidificación; pruebas utilizadas para diseñar los estudios de trazabilidad y para verificar el tratamiento; conceptos básicos sobre la aplicación de la tecnología en el campo; y ejemplos de proyectos reales.

### **2.2.7 La zeolita en la mitigación ambiental, Fáber D., et. al., Revista Lasallista de Investigación, enero-junio, año/vol. 3, número 001, Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia, 2006**

En este artículo se resume que la zeolita es un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, que se caracteriza por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, intercambian cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^1$ , así como diversos compuestos de fosfatos, amonio y componentes de la materia orgánica. Posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando una amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la adsorción de humedad. Además, se menciona que la materia orgánica puede entrar y salir del armazón tridimensional sin variar la estructura de la arcilla.

También explica que existen cerca de 50 tipos de zeolitas, cada una de ellas con diferentes propiedades físicas y químicas originando diversas densidades, selectividades catiónicas y distintos tamaños de poros. Por ejemplo, la Clinoptilolita, la cual es una de las zeolitas más comúnmente utilizadas, tiene un 16% más de





volumen de poros que la Analcima. Estas características redundan en que no todos los objetivos de los tratamientos pretendidos con zeolitas resultan adecuados si no se conoce el tipo de material a utilizar para cada actividad en particular.

En este trabajo se dice que la adición de zeolita en cantidad de 2.5 g por cada 250 g de suelo es suficiente para remover la contaminación causada con Pb, Cu y Zn hasta niveles inocuos para plantas y otros organismos. Menciona trabajos dirigidos a investigar la eficiencia de la zeolita, ya no en el suelo, sino como filtro purificador de agua provenientes de sistemas de alto consumo de agroquímicos (Faber, 2006).

Y se concluye que la zeolita tiene características y propiedades muy variadas y mismas que pueden ser utilizadas, por ejemplo, para:

- La descontaminación de medios edáficos y acuáticos, entre otros. Por su alto poder adsorbente.
- El tratamiento benéfico de suelos y aguas con presencia de metales pesados.
- El aumento en la retención de iones en el suelo, y así tener una disminución de los niveles de contaminación en los lixiviados generados en las actividades agropecuarias y con ello tener menor contaminación de aguas subsuperficiales.
- Modificar favorablemente propiedades químicas, como la capacidad de intercambio catiónico, sin alterar otras propiedades físicas de los suelos.

### **2.2.8 Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales. González A., Tesis de Maestría, UNAM, 2012**

En este estudio se propuso una metodología para la elaboración de los bloques buscando las mejores características para hacer el reúso de este residuo y transformarlo en un material aprovechable y sustentable, encontrando que el curado dentro de los bloques les provee una característica estética adicional.

Además fueron efectuadas diversas pruebas de compresión mecánica que dieron como resultado resistencias superiores, en contraste con bloques o tabiques convencionales, los cuales también se probaron en el laboratorio para conocer su resistencia real, obteniendo valores de 75 kg/cm<sup>2</sup> mismos que no cumplen con las especificaciones mínimas y blocks de concreto con resistencias de 130 kg/cm<sup>2</sup>, por ende al comparar con estos materiales, se encontró que los bloques creados en este estudio son más resistentes que los bloques convencionales o muy cercanos a lo que se reporta que resisten.





Posteriormente se realizaron pruebas hídricas para conocer el estado de reacción del residuo con el agua, así como del bloque, concluyendo que, en el caso de los jales, estos pueden retener una gran cantidad de agua.

Se descubrió que los monolitos son de cierta manera impermeables, y esto ayudará a evitar la lixiviación presente en los bloques misma que se comprobó en la cámara de intemperismo acelerado.

También se llevó a cabo la prueba de lixiviación tomando como referencia la NOM 053 SEMARNAT 1993, se reportaron valores traza de elementos, donde las concentraciones más altas fueron de aluminio mismos que se le atribuyen a la zeolita, siendo éste un micronutriente no tóxico. La eficiencia de retención promedio es de un 99.99% con niveles máximos de lixiviación de cadmio en todos los bloques de máximo 82 µg/L. Esto indica una alta fijación al cuerpo de la zeolita, por lo que se puede deducir que si el resto de metales no son detectables por el equipo su lixiviación es tan baja que se puede considerar una eficiencia del tratamiento cercana al 100%.

Se realizó una prueba de intemperismo acelerado con el fin de conocer lo que sucedería con el pasar del tiempo, estas pruebas dieron como resultado concentraciones traza muy bajas, como para ser detectadas en cada año simulado. Por lo que se tomó una muestra compuesta para conocer lo que sucedió durante los 10 años en condiciones extremas, y se obtuvo un promedio de eficiencia en inmovilización para el caso de los jales de 99.99% para el cadmio, 99.95% cromo, y 88.67% para el plomo, cabe mencionar que el resto de metales quedaron por debajo del límite de detección, lo cual permite inferir una eficiencia del 100%.

Además, en esta investigación se realizó un estudio de viabilidad económica, con ayuda de personas de tabiqueros zacatecanos, encontrando que el precio de producción de un bloque convencional de jal está en \$3.5 M.N. del tipo convencional, y en una empresa de venta de blocks con un precio de producción de \$5.50 M.N.

Por último, se buscaron posibles aplicaciones para los bloques finales acorde con su rendimiento y viabilidad, proponiendo hacer monolitos tipo “block” en moldes de plástico, los cuales no deberán ser desmoldados hasta terminar su curado para garantizar su acabado estético.



## Capítulo 3 Marco Jurídico

En México, al igual que en otros países, el proceso de industrialización que se intensificó a partir de la segunda mitad del Siglo XX, derivó en una mayor demanda de materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población en aumento; entre otras consecuencias se incrementó la generación de residuos tanto urbanos como industriales. De manera especial, estos últimos se han depositado inadecuadamente a lo largo del territorio, impactando directa o indirectamente la salud de la población y la calidad de los recursos naturales. (SEMARNAT, 2008)

Como la generación de residuos peligrosos afecta directamente a la población que vive cerca del punto donde son producidos, esto conlleva a que las autoridades, en este caso el estado, debe mantener y regular, mediante leyes y reglamentos condiciones de seguridad y de protección, dependiendo de qué circunstancias se encuentre la población tanto en los ámbitos económico social e incluso temporal, ya que si la sociedad evoluciona, estas normas deben ser reformadas, esta actividad es exclusiva del poder legislativo, mismo que está encargado de crear, derogar o abrogar esas normas las cuales tienen un carácter que es obligatorio. (Vázquez, 2004)

Para poder saber qué legislación aplica para el caso de los residuos peligrosos en México se debe partir de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos donde en su artículo 133 “Disposiciones Generales” se puede deducir la jerarquía que ocupa cada tipo de normas, ya que enuncia lo siguiente: esta Constitución, las leyes del Congreso de la Unión que emanen de ellas y todos los tratados que estén de acuerdo con las misma, celebrados y que se celebren por el Presidente de la República, con aprobación del Senado serán la ley suprema de toda la Unión”. Los jueces de cada Estado se apegan a esta última elaborando y modificando sus normas locales, siempre manteniendo a la constitución, tratados internacionales y Normas oficiales por encima de sus leyes y jamás contradiciéndolas o interponiendo valores inferiores a los que en ellos se estipula.

De donde surge la siguiente jerarquía (González, 2012):

I. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la norma suprema y de la cual emanan todas y cada una de las demás clasificaciones de normas, en esta se encuentran preceptos para la protección de los ciudadanos y una parte orgánica que no es más que la estructura del estado, sus alcances y funciones.

II. Los convenios internacionales.

II. Las leyes del Congreso de la Unión y los tratados internacionales sean una norma suprema siempre y cuando no atente con los preceptos constitucionales. Existe jurisprudencia de la SCJNA acerca de la superioridad de los Tratados Internacionales a las leyes federales.

III. Constituciones locales



IV. Las leyes estatales.

V. Los reglamentos que establecen los métodos que se deben llevar a cabo para el cumplimiento de algún precepto legal o algún derecho (Constitución Política, 1917). En la fig. 3.1 se muestra esta jerarquía.

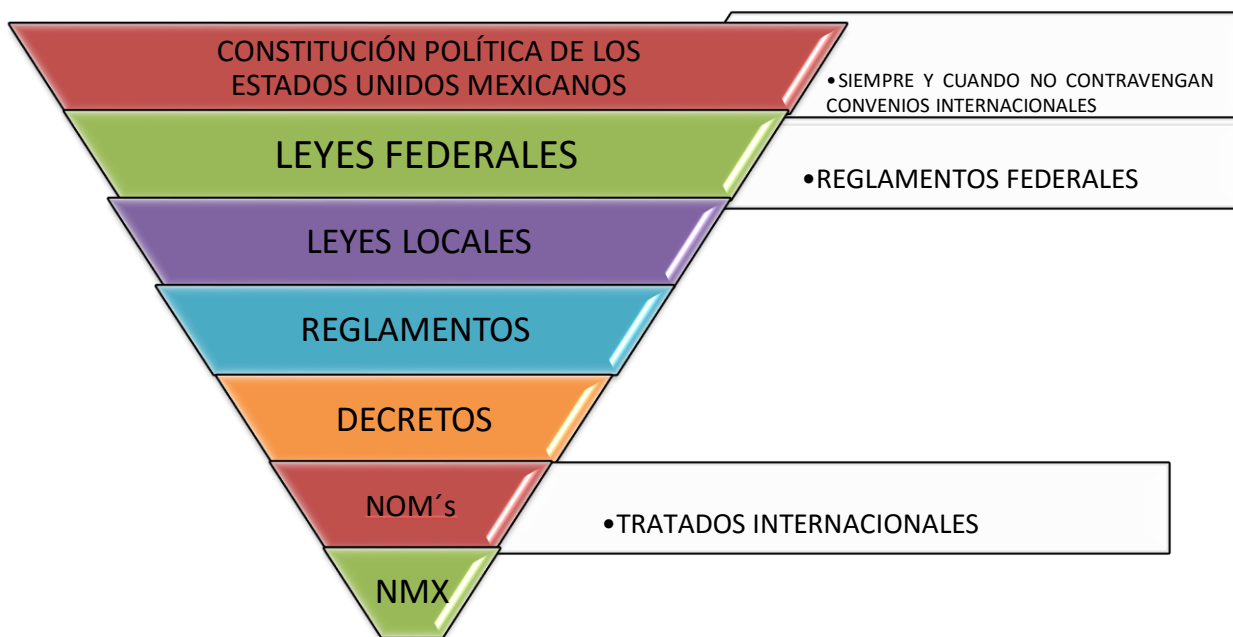


Figura 3.1 Jerarquía jurídica en México, elaboró Jesús Fidel González

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

Los residuos peligrosos, dotados de propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológico-infecciosas (características CRETIB), han estado sujetos a regulación ambiental en México desde 1988, año en el que se publicaron disposiciones al respecto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), su Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos y siete Normas Técnicas Ecológicas en la materia (hoy Normas Oficiales Mexicanas o NOMs).

De manera que, para octubre de 2003, fecha en que se publicó la Ley en la que se basa actualmente su regulación – la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), ya se habían acumulado 15 años de



experiencias positivas y negativas al respecto, que dieron lugar a los cambios introducidos en la materia en la LGPGIR y en su Reglamento publicado el 30 de noviembre de 2006.

Entre los avances logrados a la fecha en la gestión de los residuos peligrosos, gracias a su regulación, se encuentran el que numerosos generadores se han dado de alta como tales para su registro por la autoridad ambiental con competencia en la materia (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales o SEMARNAT); numerosas empresas privadas prestadoras de servicios han sido autorizadas para ello; se cuenta con datos de la generación y manejo de estos residuos basados en los informes presentados ante la autoridad por generadores y empresas de servicios; además de haberse establecido numerosos programas educativos para formar especialistas en la materia, entre otros.

Sin embargo, también ha habido problemas serios que han obstaculizado el fortalecimiento de capacidades de manejo de los residuos peligrosos, que se han traducido en el bloqueo de la instalación y/ u operación de confinamientos controlados y de otro tipo de instalaciones, como consecuencia de la legítima preocupación de algunos ciudadanos; de la desinformación; de la falta de recursos asignados a dichos proyectos e intereses personales, por citar algunas posibles causas (Cortinas, 2007).

En respuesta a tal situación, la Ley General se basa en el reconocimiento de que se generan residuos peligrosos en el hogar y en todas las actividades productivas y sociales, por lo cual establece pautas de conducta para reducir su generación, fomentar su reutilización, reciclado y co-procesamiento, así como para lograr su manejo seguro y ambientalmente adecuado a lo largo de su ciclo de vida integral, en todo tipo de fuentes y en todo el país, aplicando la responsabilidad común, pero diferenciada, de todos los sectores en el logro de sus objetivos, de manera acorde a lo previsto en el capítulo 20 de la Agenda 21 de las Naciones Unidas en la materia.

### **3.2 Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR)**

El reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR), en sus artículos 11 y 12; establece los criterios básicos que las normas oficiales mexicanas tienen que seguir, cuando estén sujetas a planes de manejo para residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de determinar el plan de manejo más apropiado y la elaboración de listados de los residuos sujetos a estos planes, según las características de los desechos y sus mecanismos de control.



Con la publicación del Reglamento de la Ley General, y su entrada en vigor el 30 de diciembre de 2006, todos los generadores de residuos peligrosos, incluyendo los que ya se habían registrado ante la autoridad competente, tendrán que notificar de nuevo dicha generación y determinar a cuál de las categorías de generadores establecidas en estos ordenamientos (grandes, pequeños o microgeneradores) pertenecen. Esta última obligación la tienen que cumplir los generadores de residuos peligrosos que ya se habían dado de alta como tales previamente, veinte días hábiles después de la entrada en vigor del citado reglamento.

### 3.3 Normas Oficiales Mexicanas

Las bases legales en las que se sustenta la clasificación de los residuos peligrosos en la actualidad están plasmadas no solo en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y en su Reglamento, sino también en las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

- NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos.
- NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. Protección Ambiental- Salud ambiental- Residuos peligrosos biológico-infecciosos- Clasificación y especificaciones de manejo.
- NOM-133-SEMARNAT-2000, Protección Ambiental-Bifenilos Policlorados (BPC's)- Especificaciones de manejo.
- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación
- NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales
- 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.

Además de tener las NOMs de SEMARNAT en materia de residuos peligrosos se cuenta con normas por parte de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes



(SCT), que también se consideraron para el desarrollo del presente trabajo las cuales están citadas en la tabla 3.1 (González, 2012)

**Tabla 3.1 Normas aplicables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (González, 2012)**

Secretaría de Comunicaciones y Transportes		Relación con el proyecto y su cumplimiento
NOM-002-SCT2-1994	Listado de sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.	Los residuos que tienen un tratamiento, se encuentran en su mayoría previstos en este listado.
NOM-010-SCT2-1994	Disposiciones de compatibilidad y segregación, para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.	En el transporte, se exigirá el cumplimiento de no mezclar residuos y se deberá evaluar esta condición en los bloques.
NOM-018-SCT2-1994	Disposiciones para la carga, acondicionamiento y descarga de materiales y residuos peligrosos en unidades de arrastre ferroviario.	Se considera como una posibilidad, debido es una de las maneras más comunes de transporte
NOM-043-SCT2-1994	Documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos	El generador debe de poder ver, etiquetar y contralar los residuos que dispone al tratamiento.



## Capítulo 4 Caso de estudio

El estudio realizado en esta tesis fue elaborado con jales provenientes de la mina “La Prieta” en Hidalgo del Parral, Chihuahua, México y en este capítulo se describen las características del sitio, así como información de los jales mineros a tratar.

### 4.1 Ubicación

El sitio donde se tomarán las muestras de jales a solidificar se localiza en el municipio de Hidalgo del Parral se encuentra ubicado al sur del estado de Chihuahua, entre los paralelos 26°51' y 27°23' de latitud norte; los meridianos 105°23' y 105°59' de longitud oeste, con una altitud entre 1,300 y 2,400 m. colinda al norte con los municipios de Valle de Zaragoza y Allende; al este con el municipio de Allende; al sur con los municipios de Allende, Matamoros, Santa Bárbara y San Francisco del Oro; al oeste con los municipios de San Francisco del Oro, Huejotitán y Valle de Zaragoza. Ocupa el 0.8% de la superficie del estado, Figura 4.1 (INEGI, 2009).

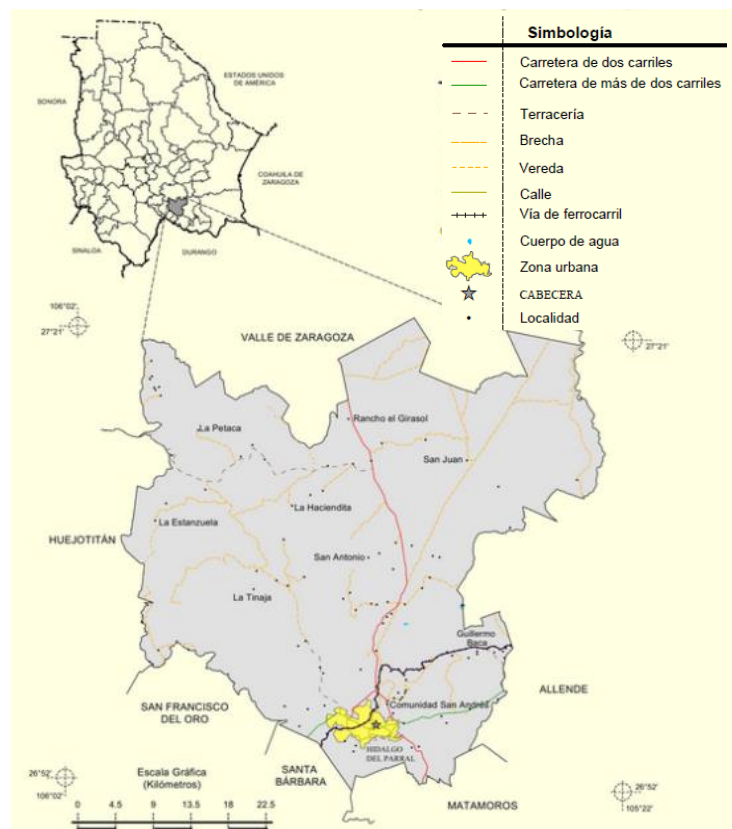


Figura 4.1 Ubicación de hidalgo de parral en chihuahua (INEGI, 2009).





## 4.2 Clima

El clima en la región de muestreo, comprende a varias categorías como se muestra en la figura 4.3, donde se muestran los climas existentes en la zona. Es de transición al clima húmedo-seco tropical en el lado ecuatorial y al clima mediterráneo en su margen hacia los polos, con un invierno más frío, más húmedo que resulta de la mayor actividad ciclónica frontal latitud y de latitudes medias. Los totales anuales de precipitación son mayores que en los climas desérticos tropicales y subtropicales. Variación anual de la cantidad no es tan extrema como en los verdaderos desiertos, pero son sin embargo de gran tamaño.

El subtipo de clasificación climática de Köppen para este clima es "BSk". (Tropical y Subtropical Estepa Climático). La temperatura promedio del año en Chihuahua es 19.4 ° C. El mes más cálido, en promedio, es de junio, con una temperatura media de 26.7 ° C. El mes más frío es enero, en promedio, con una temperatura media de 12.2 ° C. La temperatura más alta registrada en Chihuahua es 40 ° C, el cual fue grabado en junio. La temperatura más baja registrada en Chihuahua es de -10 ° C, la cual fue reportada en diciembre (CONEVyT, 2014). La cantidad media de precipitación para el año en Chihuahua es de 447 mm. El mes con más precipitaciones en promedio es de agosto con 104.1 mm de precipitación. El mes con la menor precipitación en promedio es de marzo con un promedio de 5,1 mm. Hay un promedio de 37,0 días de precipitación, con la mayoría de la precipitación ocurre en agosto con 7,0 días y la menor precipitación presentes en marzo con 1,0 día. En términos de precipitación líquida, hay un promedio de 58,9 días de lluvia, con la mayor cantidad de lluvia que ocurre en agosto con 12,9 días de lluvia, y la menor lluvia se produce en febrero con 1,7 días de lluvia. Esta información se puede observar en la figura 4.2, (CLIMATE-DATA.org, 2015).

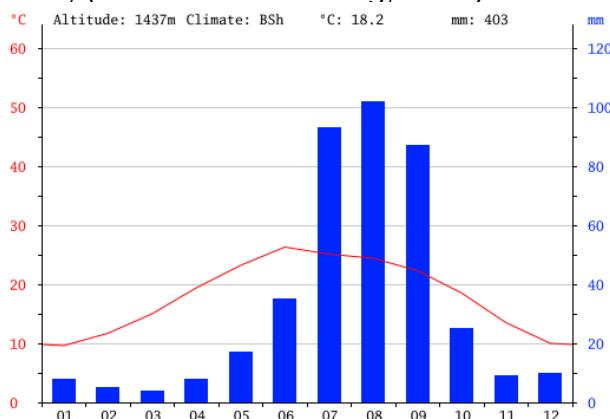


Figura 4.2 Temperaturas en Chihuahua del año 2012 (CLIMATE-DATA.org, 2015).



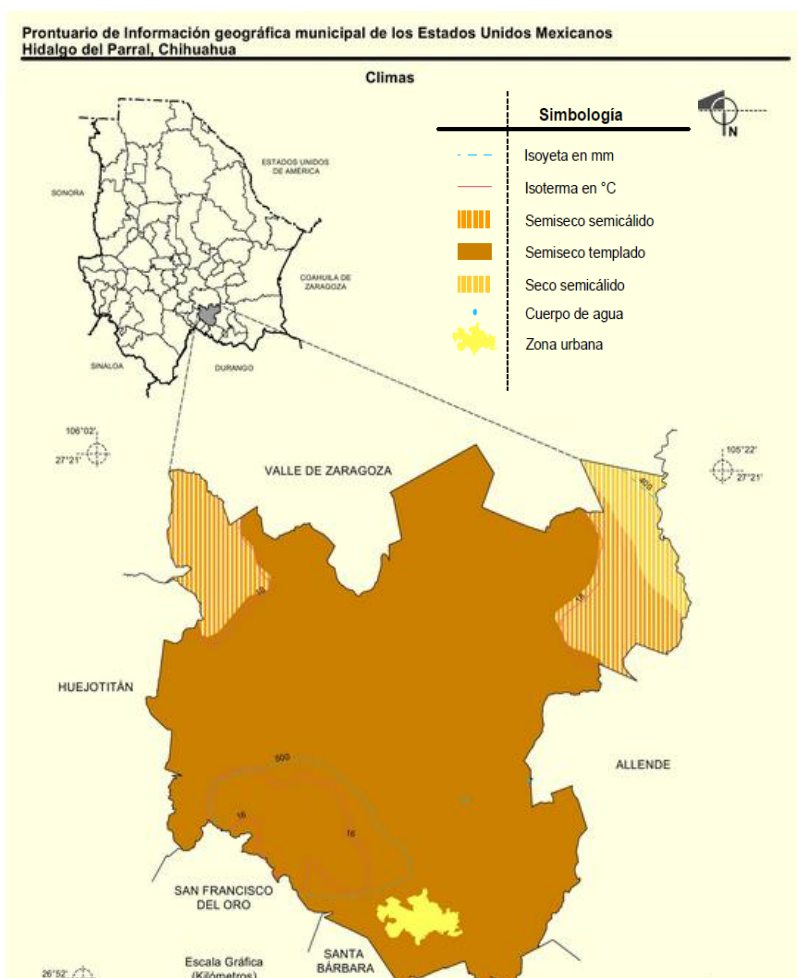


Figura 4.3 Regiones climáticas de Hidalgo del Parral Chihuahua (INEGI, 2009).

### 4.3 Geología

La información acerca del origen, clasificación y edad de las rocas, indica la existencia de minerales metálicos y no metálicos que se pueden explotar económicamente, por lo que es útil en la exploración minera, petrolera y de aguas subterráneas, ubicación de explotación de minerales y rocas, construcción de obras civiles, planeación, ordenamiento territorial e investigación, se puede observar en la figura 4.4 (INEGI, 2014).

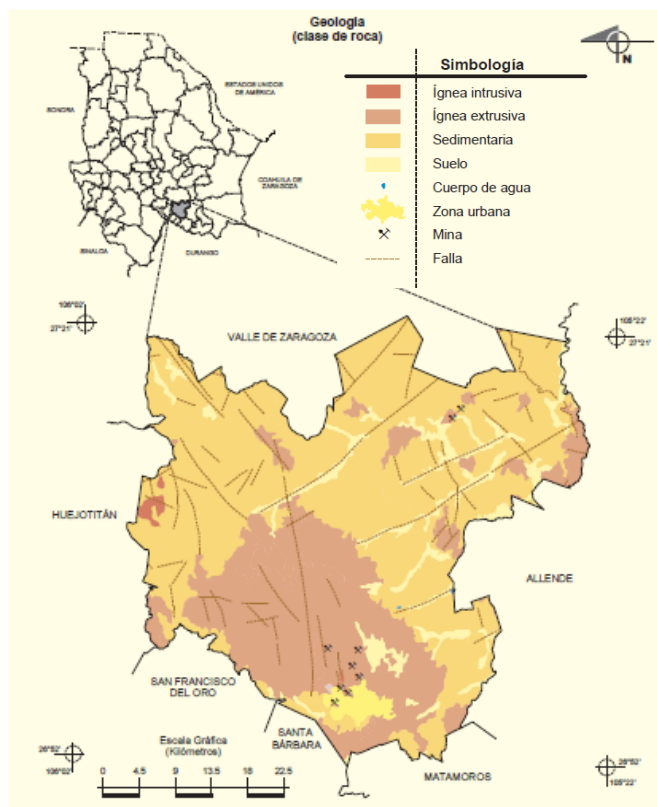


Figura 4.4 Geología en Hidalgo del Parral, Chihuahua (INEGI, 2009).

En la zona de estudio, se observa en la Tabla 4.1, que el periodo del que datan las rocas del sitio es del Neógeno, perteneciente a la Era Cenozoica, esto da a entender, que la roca existente en la zona es de aproximadamente hace 23 millones de años (INEGI, 2009).

Tabla 4.1. Periodos geológicos en la zona de estudio

PERIODO GEOLÓGICO	VALOR (INEGI, 2009)
Terciario	27.1 %
Neógeno	33.7 %
Cuaternario	6.8 %
Cretácico	30.2 %
Paleógeno	0.9 %

La zona de estudio de Hidalgo del Parral está creciendo sobre roca ígnea del Terciario y rocas sedimentarias del Cretácico y del Neógeno; sobre áreas



originalmente ocupadas por suelos denominados Leptosol y Phaeozem (INEGI, 2009).

#### 4.4 Uso del suelo

En su parte occidental, predominan los kastañozemslúvicos, este término es derivado del vocablo latino "castanea" que significa castaño y del ruso "zemlja" que significa tierra, haciendo alusión al color pardo oscuro de su horizonte superficial, debido al alto contenido en materia orgánica. Con textura media en pendientes de nivel o cerril, con asociación de litosoles, sin inclusiones y en su base lítica (INEGI, 2009).

El uso predominante del suelo es ganadero, agrícola y minero. En la tenencia de la tierra predominan el régimen de propiedad privada con 155,034 hectáreas equivalentes a 73.64%. El régimen ejidal está constituido con 5,517 hectáreas que representan el 2,63%; a usos urbanos corresponden 2,825 que significan el 1.35% del suelo total. En la figura 4.5 se puede apreciar el uso de suelo para esta región.

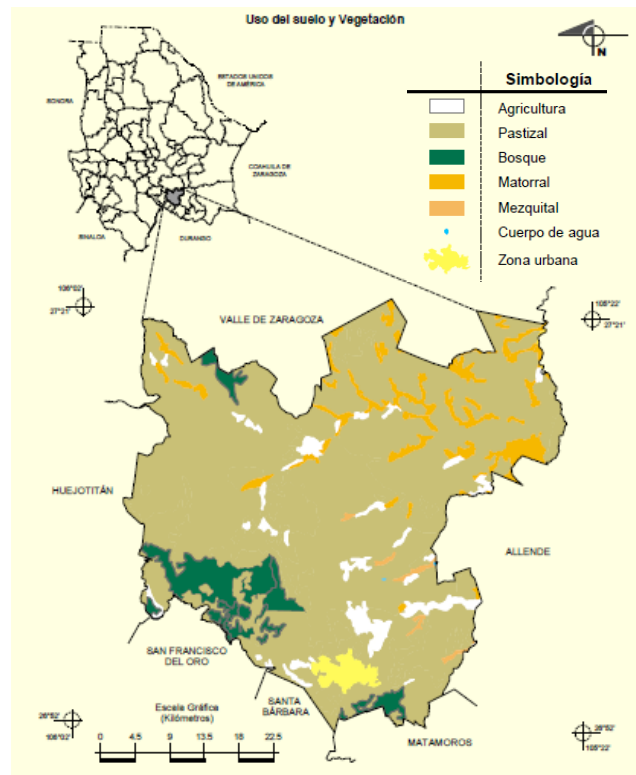


Figura 4.5 Uso del suelo en Hidalgo del Parral Chihuahua (INEGI, 2009).



## 4.5 Demografía

La presa de jales del sitio de análisis está ubicada cerca de asentamientos humanos, esto data desde que las minas empezaron su funcionamiento, ya que es común que la población esté cerca del área de trabajo.

De acuerdo con datos del INEGI (2010), cuando fue el último censo de la población en México, en Hidalgo del Parral existía una población de 107,061 habitantes, de los cuales 51,883 son hombres y 55,178 son mujeres, con una extensión territorial de 1,750 kilómetros cuadrados, se obtiene una distribución de 61.17 habitantes por kilómetro cuadrado.

En comparación la población del estado de Chihuahua, existía una población de 3,406,465 habitantes, de los cuales 1,692,545 son hombres y 1,713,920 son mujeres, con una extensión territorial de 247,455.29 kilómetros cuadrados, se obtiene una distribución de 13.76 habitantes por kilómetro cuadrado.

## 4.6 Caracterización de los jales

Para la toma de muestras inicialmente se planeó de acuerdo con la Norma Técnica Mexicana, NMX-AA-132-SCFI-2006, que establece las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, entendiendo por éstos el arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio. Para el caso de estudio se retomará el muestreo realizado por Barraza en 2015, tomando en cuenta los puntos en donde él caracterizó principalmente arsénico, plomo y mercurio, y que fueron caracterizados mediante Fluorescencia de rayos X, esto es para tener un preámbulo de los niveles de contaminantes que se mitigarán con el tratamiento, además se sabe que esta presa de jales como lo indica Barraza, tienen una edad mayor a 300 años, las piedras solo se fundían y solo se aprovechaba el metal precioso, este caso la plata, y el desecho se depositaba al aire libre, entre ellos se encuentra el mercurio; cuando se integró la flotación selectiva, se incrementó la concentración de plomo y arsénico en las presas de jales.

Para el muestreo a realizar se considera el tipo de jal, las concentraciones obtenidas, a través de dos análisis diferentes realizados por Barraza en 2015, absorción atómica y fluorescencia de rayos x, en este caso para el análisis se realizó enfocado a plomo, mercurio y arsénico, esta información es reciente y puede ser



ocupada como referencia para los análisis posteriores en esta tesis. En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8, se muestran las concentraciones de los contaminantes, plomo arsénico y mercurio respectivamente (Barraza, 2015).

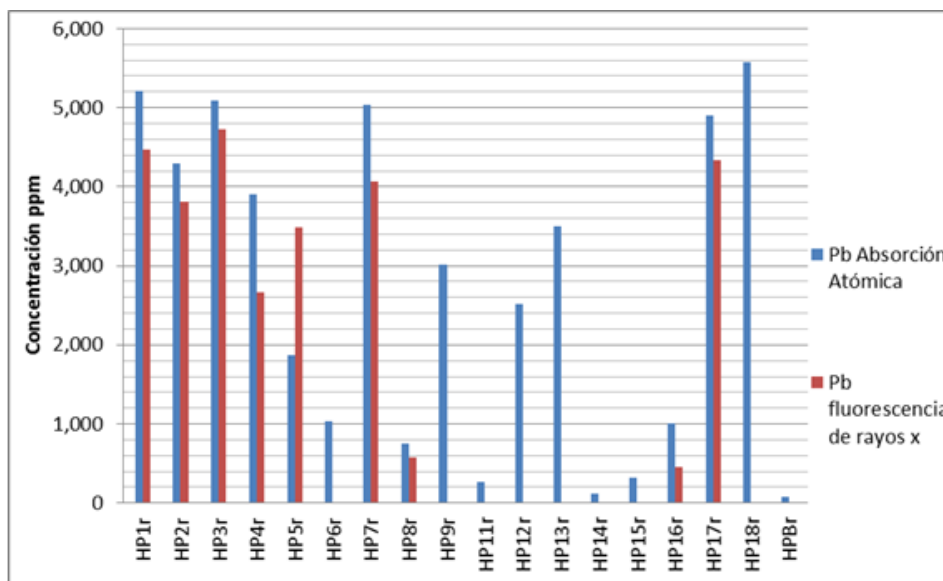


Figura 4.6 Niveles de plomo los puntos de muestreo realizado por Barraza en 2015.

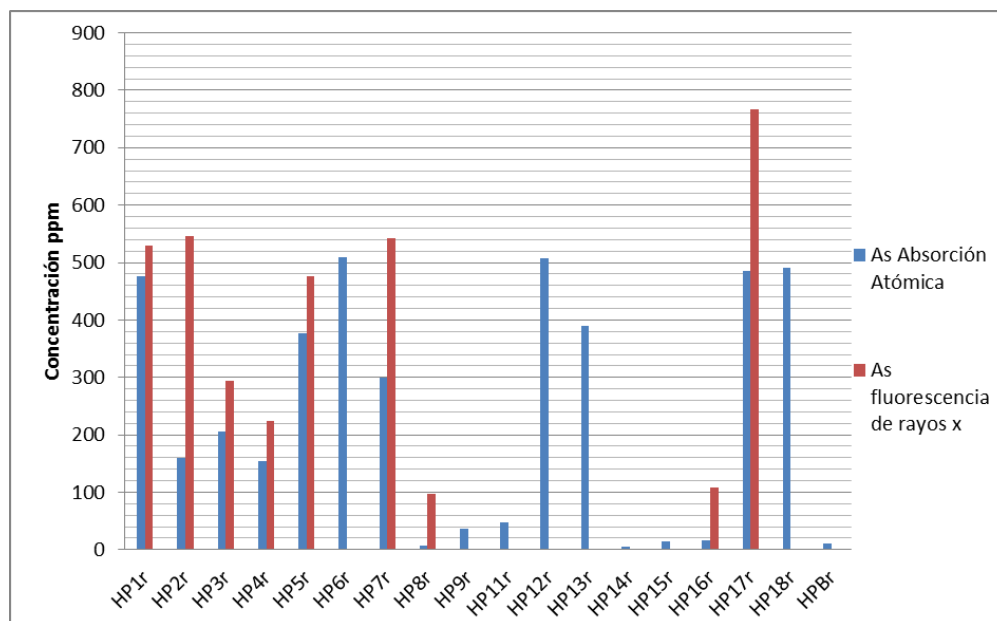


Figura 4.7 Niveles de arsénico en los puntos de muestreo por Barraza en 2015.

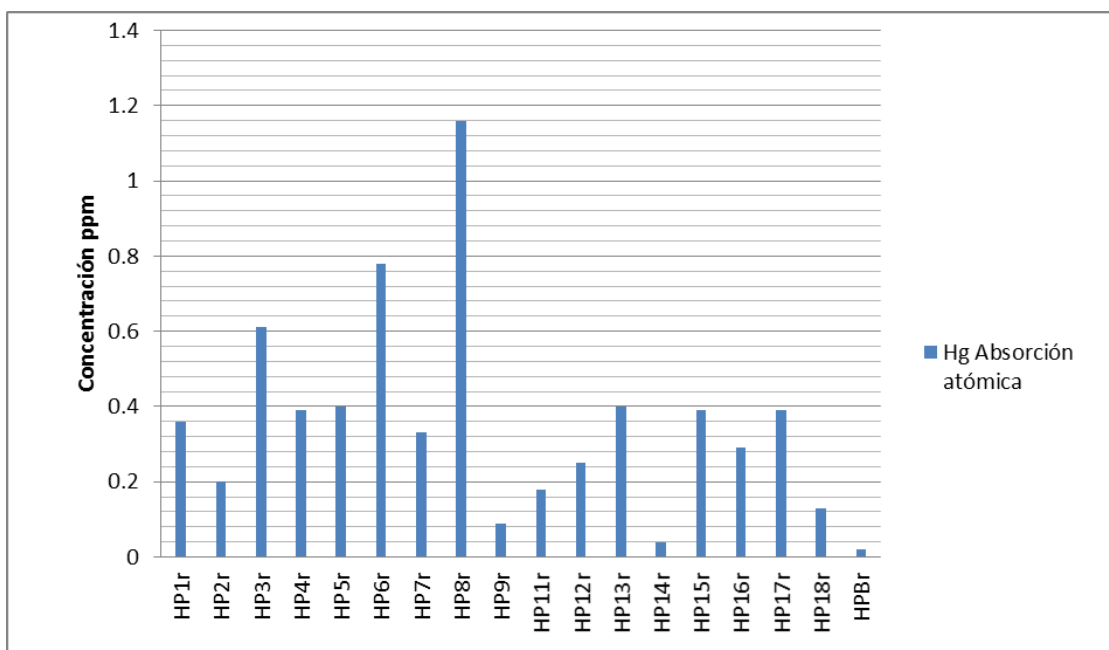


Figura 4.8 Niveles de mercurio en los puntos de muestreo por Barraza en 2015.

#### 4.7 Plan de muestreo

A partir de las concentraciones encontradas por Barraza en 2015, se escogieron los puntos donde se tomó muestra para poder aplicar tratamiento, tomando en cuenta la concentración hallada por Barraza, y se tomaron los puntos con mayor concentración, esto fue gracias a los resultados obtenidos de los análisis realizados, que fueron absorción atómica y la fluorescencia de rayos X, y además se consideraron los tipos de jal existente en la presa de jales, estos son jales rojos, jales blancos y jales nuevos. En la figura 4.9, se puede observar la zona de muestreo, donde destacan los puntos que se encuentran encerrados en círculos amarillos, es donde se toman las muestras de jales, haciendo las consideraciones anteriores, para poder ser sometidos al proceso de estabilización/solidificación.

Por tanto, el muestreo fue de tipo específico, dado que la caracterización de los puntos es reciente y se tiene la información de contaminantes a evaluar, se propusieron 2 puntos de muestreo para cada tipo de jal existente. En esta zona existen tres tipos de jales los cuales son:

- Jales rojos, debido a la coloración rojiza que presentan, además son los residuos más antiguos en toda la presa de jales, y contienen mayor humedad.





- Jales blancos, son los siguientes en antigüedad; estos jales corresponden a una etapa más industrializada de la mina, debido a esto la coloración que presentan este tipo de jal es un tono más blanco.
- Y, por último, jales nuevos, estos jales son residuo de un tratamiento que se le dio a los jales rojos y blancos para la extracción de fluorita.

Por lo que la cantidad de puntos a muestrear son 6. Para etiquetar los puntos se propone al igual que Barraza utilizar HP que significa Hidalgo del Parral y un número consecutivo como él lo realizó en su muestreo.

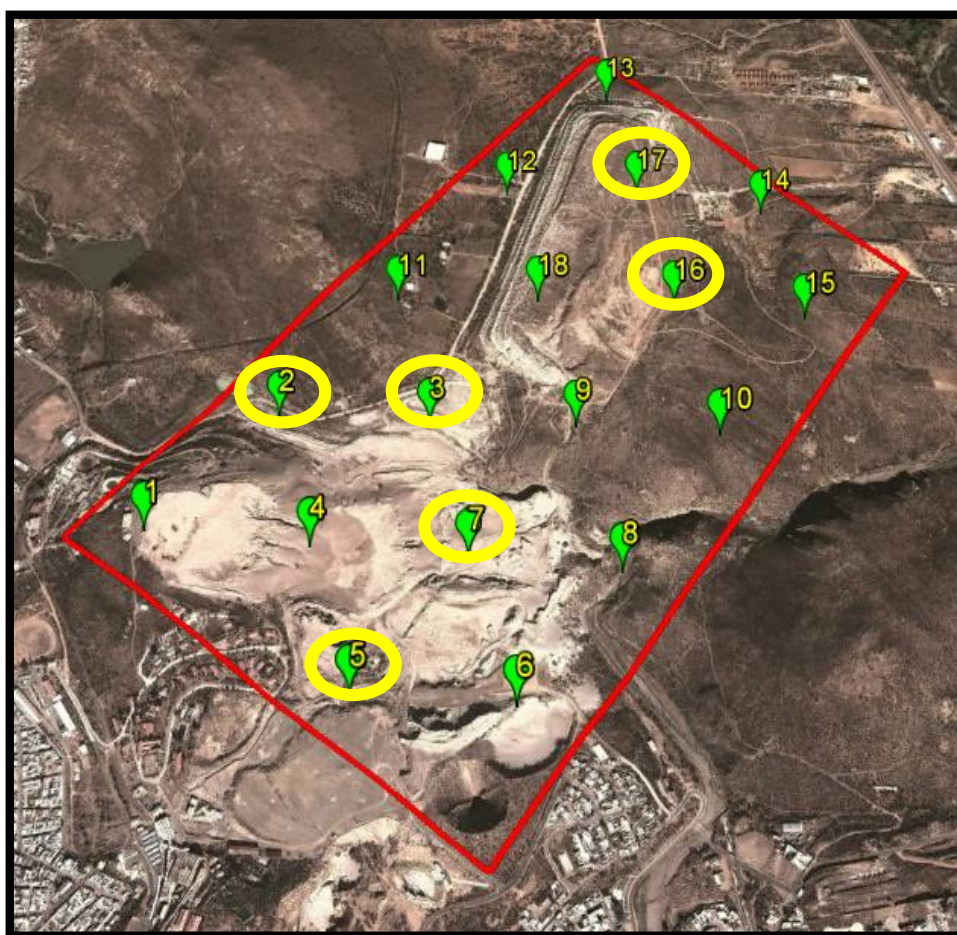


Figura 4.9 Localización de puntos a muestrear.



Tabla 4.2 Tipo de jal de acuerdo al punto de muestreo.

Punto de muestreo	Tipo de jal
HP-2	Jales Nuevos
HP-3	
HP-5	Jales Blancos
HP-7	
HP-16	Jales Rojos
HP-17	

Fuente: Barraza 2015.

Para la realización del muestreo, se emplearon algunas herramientas que permitieron la recolección de muestras sea eficiente.

1. Hoja de datos:

- a. Fecha de recolección de la muestra
  - b. Clave de identificación de las muestras, proponiendo a las muestras recolectadas en Hidalgo del Parral con la clave HP seguido de una serie numérica.
  - c. Ubicación geográfica
  - d. Hora de toma de la muestra
  - e. Características ambientales, como por ejemplo:
    - i. Condiciones climáticas
    - ii. Presencia de vegetación
    - iii. Uso actual del suelo
    - iv. Edificaciones o infraestructura
    - v. Actividades ajenas al proceso propio de contaminación que pudieran influir en la calidad del muestreo
    - vi. Presencia de residuos o materiales de relleno
  - f. Características del suelo, como las siguientes características:
    - i. Textura
    - ii. Color
    - iii. Presencia de humedad
    - iv. Presencia de hojarasca
    - v. Presencia de otros materiales eliminados durante el muestreo
  - g. Nombre de quien toma la muestra
2. Un posicionador satelital global (GPS)
  3. Una pala de metal o de plástico
  4. Bolsas de 5 kilos aproximadamente para resguardar la muestra
  5. Etiquetas para las bolsas, las cuales deben de contener:
    - a. Clave de identificación de la muestra





- b. Ubicación de la muestra
  - c. Hora del muestreo
  - d. Fecha del muestreo
  - e. Nombre del responsable que tomó las muestras
6. Planos de las zonas de muestreo, con la probable ubicación de los puntos de muestreo
7. Objetos varios:
- a. Cinta métrica
  - b. Cámara fotográfica
  - c. Plumas
  - d. Marcadores
  - e. Brocha o cepillo
  - f. Agua la necesaria

El muestreo fue de tipo superficial, esto quiere decir que la profundidad de la excavación para la toma de muestras fue de 30 centímetros, y de ahí se recolectó una cantidad aproximada de 4 kilogramos, ya que es la cantidad necesaria para la elaboración de los monolitos y realizar la solidificación/estabilización. El muestreo vertical, que consiste en realizar una excavación de aproximadamente 2 metros de profundidad y muestrear los horizontes, no se llevó a cabo dado que los recursos no permiten realizar este tipo de muestreo. Los 4 kilogramos de muestra recolectada, garantizo obtener al menos 2 kilogramos de muestra tamizada para su posterior análisis.

La recolección de las muestras no se llevó a cabo mediante envases de tapa hermética, sino por medio de bolsas de plástico, ya que su traslado desde Parral, Chihuahua hasta Ciudad Universitaria es más viable y fácil de realizar. Estas muestras recolectadas, se resguardaron en bolsas de plástico que las protejan de las condiciones ambientales.

El tipo de muestreo que se realizó es de tipo estratificado, ya que su objetivo es obtener las muestras de suelo previamente caracterizadas, que presenten la mayor y menor cantidad de contaminante ya que lo que se busca es darle tratamiento a una mayor cantidad de contaminante posible.

El muestreo al ser estratificado, se redujo el error de muestreo para un tamaño dado. Consiste en considerar categorías típicas diferentes entre sí (estratos) que poseen gran homogeneidad respecto a alguna característica en este caso es la concentración. Lo que se pretendió con este tipo de muestreo es asegurarse de que todos los estratos de interés estén representados adecuadamente en la



**PROPUESTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS METALÚRGICOS NO FERROSOS**



muestra. Cada estrato funciona independientemente, pudiéndose aplicar dentro de ellos un muestreo aleatorio simple.



## Capítulo 5 Metodología

Para el presente trabajo se inició con la búsqueda de información que sirviera como fundamento para desarrollar el tratamiento de estabilización/solidificación, y sustentar la experimentación, para que se lleve a cabo de la mejor manera posible.

Se obtuvieron las muestras de jales, considerando la caracterización de los puntos, así como los niveles encontrados de As y de Pb en la presa de jales de la mina “la Prieta”, para garantizar que el tratamiento propuesto es el adecuado para este tipo de contaminante.

Se tamizó la muestra utilizando la malla 30 de las charolas de separación gravimétricas con la finalidad de tener una muestra homogénea y representativa para una escala laboratorio.

Una vez que se contó con los materiales (cemento portland, zeolita, muestra de jal) y equipo necesario se llevó a cabo la elaboración de los bloques tomando en cuenta la temperatura de curado, ésta debe ser constante y a 25 °C, también el tiempo de fraguado de 28 días, que garantiza que la resistencia sea aceptable (CEMEX, 2015), además de tener un control de la humedad relativa del 90%. Para garantizar estas condiciones el experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Con los bloques elaborados y recién fraguados. Se procedió a realizar las pruebas químicas, físicas y mecánicas, para analizar las propiedades de los monolitos y saber si la estabilización/solidificación fue exitosa para el tratamiento de estos jales, por lo que se realizaron las siguientes pruebas:

- ✚ Intemperismo acelerado
- ✚ Extracto PECT
- ✚ Compresión simple

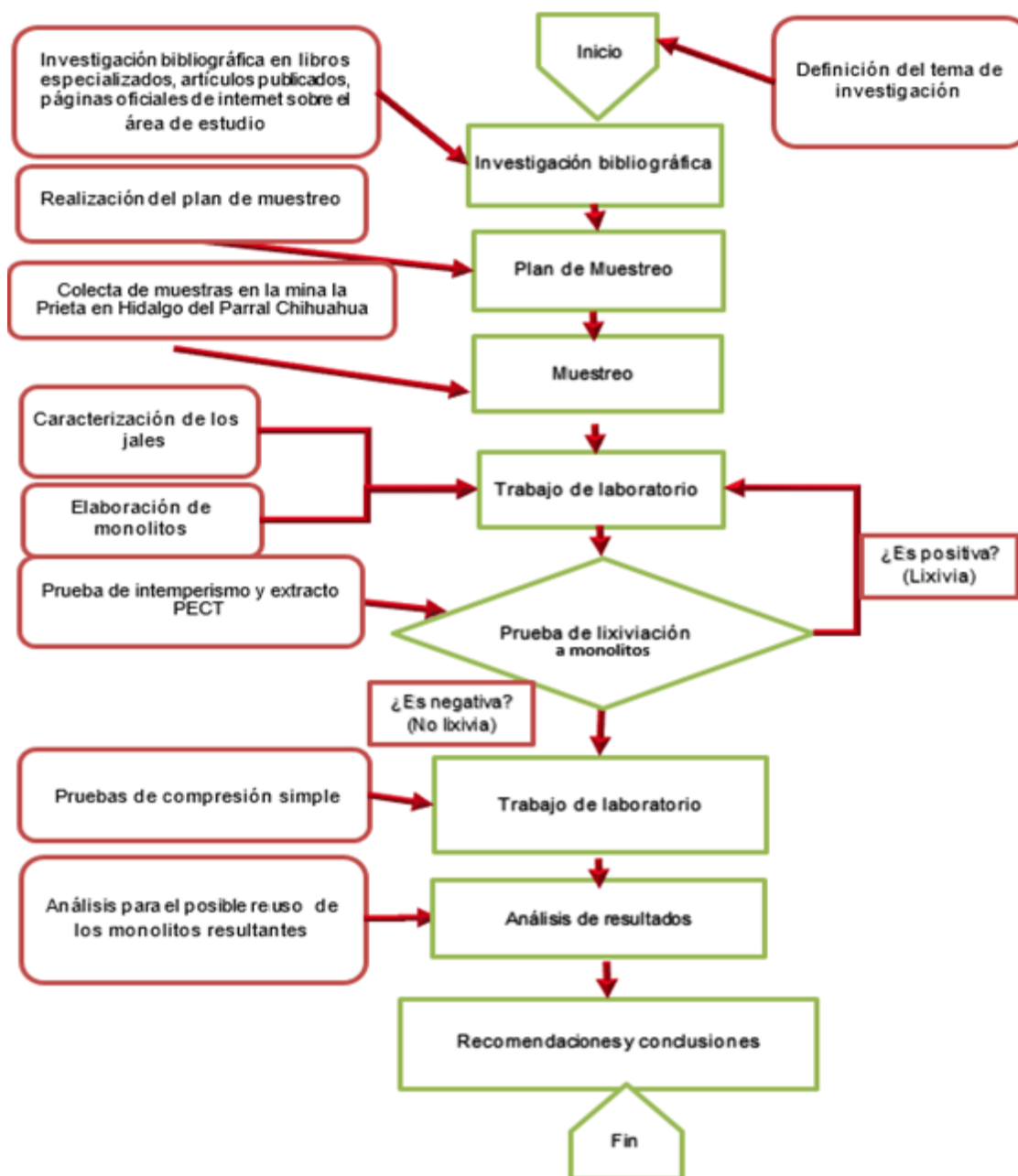
Donde se analizaron los siguientes parámetros:

- ✚ Concentración de los contaminantes contenidos en los jales (Pb y As)
- ✚ Resistencia máxima
- ✚ Resistencia después del intemperismo
- ✚ Concentración de Pb y As en el lixiviado resultante del intemperismo
- ✚ Concentración de Pb y As en el lixiviado resultante de la prueba PECT



En la figura 5.1 se muestra la metodología empleada, posteriormente se explicará a detalle cada uno de los pasos.

Figura 5.1 Metodología





## 5.1 Diseño de experimentos

Se tomó un diseño de experimentos factorial completamente al azar 3x3 de factores fijos (los cuales son el tipo de jal y la cantidad de cemento empleado). En los siguientes puntos se describe la configuración de este modelo.

### 5.1.1 Definición de la unidad experimental

Se utilizó como unidad experimental monolitos del mismo tamaño, homogéneos en su composición, elaborados con cemento portland, zeolita y jales mineros (contaminante) y con el mismo número de pruebas, con el fin de dar tratamiento al suelo contaminado con jales, a escala laboratorio, para representar conglomerados usados en la industria de la construcción. Se elaboraron 4 monolitos por cada nivel de concentración y se tomaron 3 monolitos al azar por cada nivel descartando uno.

Los bloques se elaboraron con jales de la mina la Prieta, ubicada en Hidalgo del Parral, Chihuahua, México.

Los residuos se analizaron en estado seco y natural. Las condiciones que se mantuvieron para la preparación de los bloques fueron:

- ✚ El tiempo de curado
- ✚ Temperatura
- ✚ Humedad y
- ✚ El tamaño.

Para hacer las pruebas a la unidad experimental, se cuenta, para la prueba de resistencia, con una máquina de ensayo universal de compresión simple; para la lixiviación en medio ácido, se utilizó el procedimiento descrito en la NOM-053-SEMARNAT-1993 y para el intemperismo acelerado se empleó una cámara especializada que simula tanto la lluvia ácida como los rayos UV, tomando en cuenta a la norma de la EPA-1627 "*Kinetic Test Method for the Prediction of Mine Drainage Quality*". Cabe aclarar que esta norma se trató de adoptar a la experimentación, debido a que el procedimiento o norma que se debe seguir para realizarla con los monolitos fabricados, no existe, y este es el procedimiento más apto para que se lleve a cabo. El análisis del lixiviado resultante del intemperismo acelerado, así como de la prueba de la NOM-053-SEMARNAT-1993 se realizó mediante un espectrofotómetro de absorción atómica.

### 5.1.2 Definición de las variables de respuesta

Se establecieron como variables de respuesta: la resistencia a la compresión, la concentración de Pb y As del lixiviado de la prueba de intemperismo acelerado y de



la prueba de la NOM-053-SEMARNAT-1993. Buscando evaluar la cantidad de jal y cemento óptimas para llevar a cabo el tratamiento de solidificación/estabilización, para su posible reaprovechamiento.

### 5.1.3 Definición de factores y niveles

Se definieron dos factores fijos: la masa de cemento portland con tres niveles y el tipo de jal, también con 3 niveles como se muestra en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Niveles del factor concentración para el diseño de experimentos**

Número de factor	Nombre de factor	Niveles
1	Masa de Cemento Portland	1.-Menos cantidad de cemento portland que de jales (mezcla 1)
		2.-La misma cantidad de Cemento portland que de Jales (mezcla 2)
		3.-La misma cantidad de jales que de zeolita (mezcla 3)
2	Tipo de jal	Jales nuevos
		Jales blancos
		Jales rojos

### 5.1.4 Diseño experimental

Para la experimentación global se realizó un experimento factorial 3x3 de efectos fijos, para determinar tres variables de respuesta, en la tabla 5.2 se definen los efectos y las variables.

**Tabla 5.2 Efectos y variable de respuesta a considerar**

Efecto	Variables de respuesta	
Masa de cemento portland	R	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
	L	Lixiviación (por intemperismo acelerado (mg/l)
Tipo de jal	P	Lixiviación por extracto PECT



De esta manera, para cada una de las variables de respuesta se tiene el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

$Y_{ijk}$  = Es una de las respuestas consideradas para el monolito  $k$  con el nivel  $i$  de cemento y el nivel  $j$  de tipo de jal

$\mu$  = Media general, común a todas las unidades experimentales.

$\tau_i$  = Efecto del nivel  $i$  del factor masa de cemento Portland.

$\beta_j$  = Efecto del nivel  $j$  del factor tipo de jal.

$(\tau\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción del nivel  $i$  del factor cemento y del nivel  $j$  del tipo de jal

$\varepsilon_{ij}$  = Error experimental.

$i = 1, 2, 3.$

$j = 1, 2, 3.$

$k = 1, 2$

Donde  $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$

Se plantearon las siguientes hipótesis

$$\begin{aligned} H_{01}: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0 & \longrightarrow \text{No hay efecto factor masa de cemento Portland} \\ H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 & \longrightarrow \text{No hay efecto factor tipo de jal.} \\ H_{03}: (\tau\beta)_{11} = \dots = (\tau\beta)_{33} = 0 & \longrightarrow \text{No hay interacción entre masa de cemento Portland y tipo de jal} \end{aligned}$$

## 5.2 Muestreo

El muestreo se realizó de acuerdo al plan. Con la ayuda de un GPS, se ubicaron los puntos muestreados por Barraza en 2015 y se colectaron 4 kg de muestra por cada punto propuesto, en la tabla 5.3 se muestran las coordenadas de la ubicación de los puntos donde se realizó el muestreo, en la figura 5.2 se muestran los puntos de muestreo y en la figura 5.3 se presentan imágenes del paisaje de la zona.





Tabla 5.3 Coordenadas de los puntos muestreados

Punto	Coordenadas	
	Norte	Oeste
HP2	26°57'46.76"	105°39'38.70"
HP3	26°56'36.82"	105°39'56.80"
HP5	26°56'27.32"	105°39'43.50"
HP7	26°56'36.96"	105°39'35.90"
HP16	26°56'55.99"	105°39'20.70"
HP17	26°57'5.85"	105°39'22.70"
HPB	26°57'15.72'	105°39'31.6"



Figura 5.2 Puntos de muestreo.



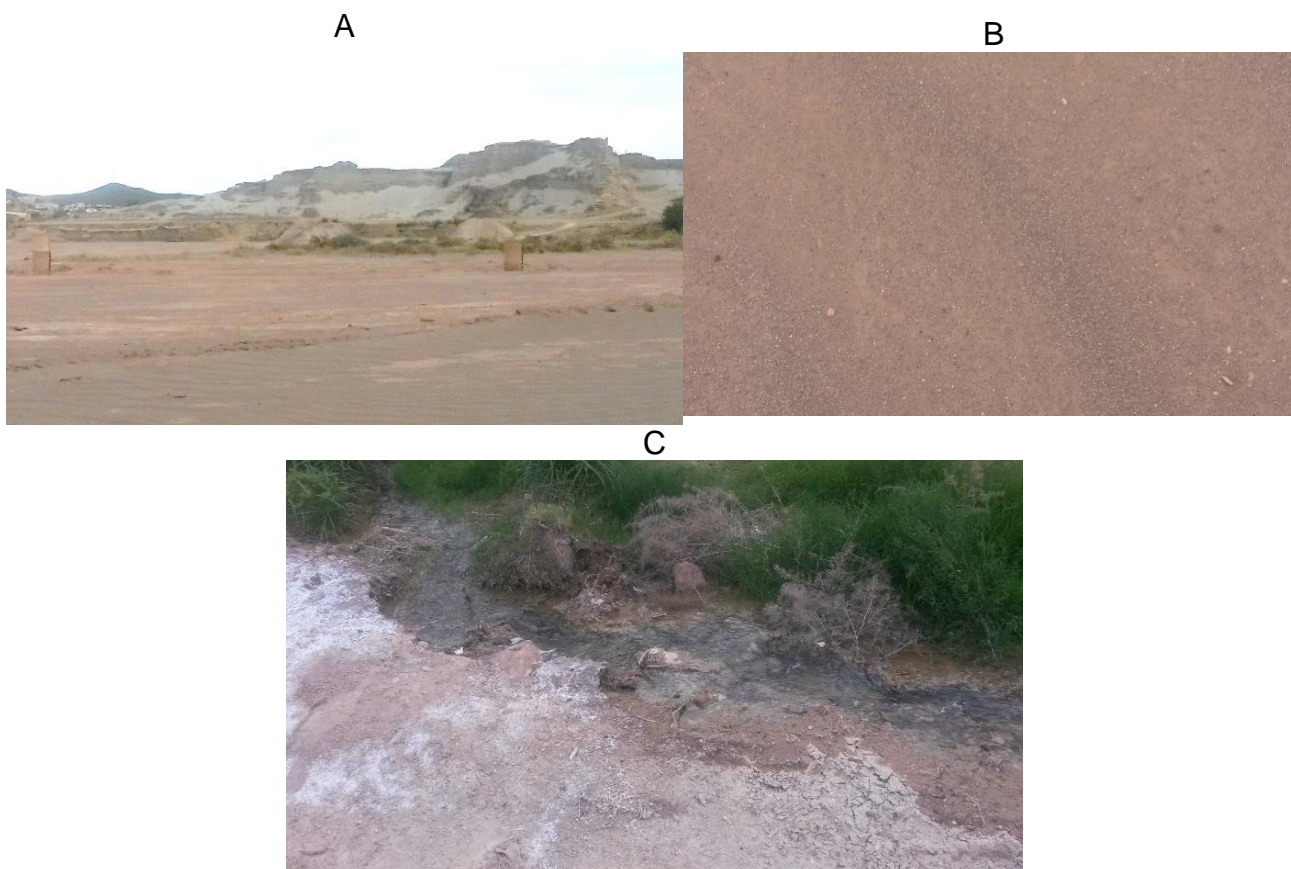


Figura 5.3 Paisaje de la zona: A) Jales Blancos, B) Jales Rojos, C) Cuerpo de agua que cruza la presa de jales.

### 5.3 Caracterización de los jales

Una vez tomadas las muestras se trasladaron a la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, para realizar la cuantificación de los contaminantes, en este caso, los elementos a considerar con base en el estudio realizado por Barraza en el 2015 son el arsénico y el plomo.

Se empacaron 20 gramos de muestra en bolsas de polietileno de baja densidad para ser transportadas al laboratorio para su posterior análisis. Para poder determinar su cantidad, se realizó un pretratamiento de las muestras de suelo para la cuantificación de la concentración total de arsénico y plomo mediante secado, tamizado y digestión ácida abierta con agua regia, tomando como referencia el método de la USEPA 3050B. Posteriormente se hizo una digestión y se empleó la técnica de absorción atómica para su cuantificación según las normas de la Agencia de Protección al ambiente de los Estados Unidos de América USEPA 7000B, USEPA 7061A, para la determinación de plomo y arsénico respectivamente.



Para el proceso de digestión se ocuparon los siguientes materiales y equipos:

- ✚ Balanza Adventurer Ohaus Analytical Plus.
- ✚ Parrilla eléctrica Scientific (Super-Nuova Multi-Place) equipada con un termómetro termopar para monitorear la temperatura de la digestión abierta.
- ✚ Todas las disoluciones se realizaron utilizando agua desionizada de un sistema Milli-Q con una resistividad de 18 MΩ·cm, las soluciones stock se guardaron a 4°C y las diluciones necesarias se prepararon diariamente para cada análisis de ser necesario.
- ✚ Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>, Baker, 70%) y ácido clorhídrico (HCl, Baker, 36.5–38%) para la digestión con agua regia.
- ✚ Papel filtro Whatman No. 42.
- ✚ Matraz volumétrico Hirschmann EM Techcolor de 50 ± 0.06 mL clase A.

Se siguió el procedimiento expresado a continuación:

- ✚ El material de vidrio y las botellas de polietileno se lavaron con ácido nítrico diluido al 10% y se enjuagaron con agua desionizada.
- ✚ Inicialmente se pesaron aproximadamente 5 g de muestra dentro de un vaso de precipitados de 100 mL, posteriormente se adicionó 2.5 mL de HCl concentrado, habiendo dejado reposar la mezcla, se adicionó con precaución y lentamente 7.5 mL de ácido nítrico concentrado para así completar un volumen total de 10 mL de agua regia.
- ✚ Posteriormente se colocó en la parrilla un agitador magnético y se tapó colocando un vidrio de reloj, a una de las muestras se le colocó el termopar para ir monitoreando la temperatura.
- ✚ Más adelante se fijó una agitación de 240 rpm y una temperatura de 20°C cuidando que la mezcla estuviera estable. La temperatura se elevó progresivamente de cada 20°C hasta llegar a 85°C, se dejó la digestión durante una hora.
- ✚ Al terminar el tiempo de calentamiento, se removieron los vasos de precipitados para dejar que se enfriaran a temperatura ambiente.
- ✚ La solución se filtró al vacío y el filtrado se llevó a 50 mL con agua desionizada en un matraz aforado.
- ✚ Por último, la muestra se guardó en envases de polietileno a 4°C para su posterior análisis.

Ya con la solución preparada se procedió a hacer la lectura de las muestras a través de medidas de absorbancia espectrofotométricas que se hacen, normalmente, a



una longitud de onda correspondiente a un pico de absorción, ya que el cambio en la absorbancia por unidad de concentración es mayor en ese punto, consiguiéndose así, la máxima sensibilidad. También se logra que las medidas sean menos sensibles a las incertidumbres que surgen de las limitaciones del instrumento para reproducir con precisión la longitud de onda seleccionada. Cabe destacar que para la cuantificación de plomo se usó la absorción atómica de llama mientras que para el arsénico se usó la absorción atómica por generación de hidruros ya que tiene una difícil volatilización.

Para la cuantificación de arsénico se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 100 equipado con el sistema de generación de hidruros MHS-10, y se usaron los parámetros mostrados en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Parámetros del equipo de absorción atómica para la cuantificación de arsénico.**

Parámetro	Valor
Longitud de onda ( $\lambda$ )	193.7 nm
Int. Time	0.4 s
Intensidad de lámpara	11 mA
Slit	2.0
Tiempo de lectura	60 s

Para la cuantificación de plomo se hizo uso del espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110 y se establecieron los parámetros de la tabla 5.5.

**Tabla 5.5 Parámetros del equipo de absorción atómica para la cuantificación de plomo.**

Parámetro	Valor
Longitud de onda ( $\lambda$ )	283.3 nm
Int. Time	1 s
Intensidad de lámpara	11 mA
Slit	0.7 nm
Tiempo de lectura	15 s

En la figura se 5.4 observan a los equipos que se utilizaron para la cuantificación de arsénico y plomo.

A

B



Figura 5.4 a) Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110, b) Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 100.

## 5.4 Elaboración de los monolitos

### 5.4.1 Mezcla Jal-CPC-Zeolita

Para la elaboración de los monolitos se ocuparon los siguientes equipos y materiales:

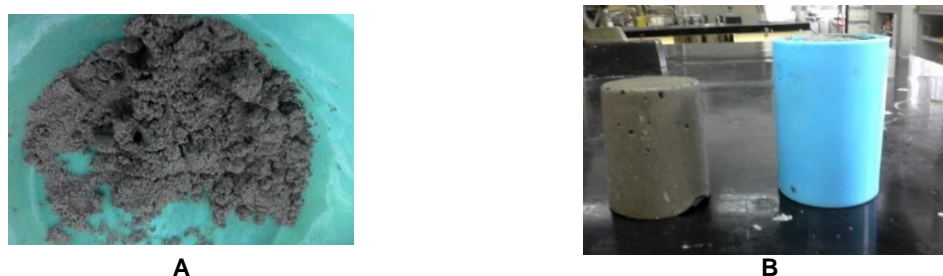
- ✚ Muestras de jales
- ✚ Zeolita
- ✚ Agua destilada
- ✚ Cemento Portland CPC 30R
- ✚ Tamizador
- ✚ Tamiz #30
- ✚ Moldes de plástico

En primer lugar, fue necesario tamizar las muestras, para conseguir un tamaño de partícula uniforme, así como preparar la zeolita tamizándola con la misma malla, lavándola y secándola, para garantizar que el único elemento que contuviera metales pesados o contaminantes en este caso fueran solo los jales mineros. Se hizo uso de cemento portland CPC 30R marca Tolteca. La cantidad de materiales empleados para la elaboración de los bloques se basó en las tres mezclas propuestas por González en 2012, mostradas en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Masa y porcentajes considerados para la elaboración de monolitos con la mezcla Jal-CPC-Zeolita.

Mezcla	Masa de materiales ocupados (g)			Porcentaje de materiales ocupados %pp		
	Residuo	Cemento	Zeolita	Residuo	Cemento	Zeolita
1	100	80	160	29	24	47
2	124	124	120	34	34	33
3	140	120	120	37	32	32

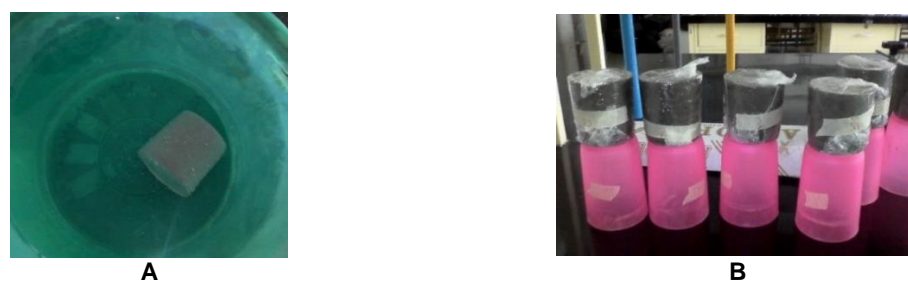
Cabe destacar que se tomó en cuenta que el cemento es un producto que puede elevar el costo de este tratamiento, por lo que se consideró usar primero menos cantidad de cemento y mayor de residuo, posteriormente mayor cantidad de residuo y menor de cemento y por último la opción de tener mayor cantidad de residuo y las mismas condiciones de cemento y zeolita (González, 2012). Además, que la cantidad de agua empleada para la elaboración de todos los bloques fue de 75 mL, debido a que con esta cantidad se logró tener la consistencia adecuada para poder transferir la mezcla a cada uno de los moldes para la elaboración de los monolitos. En la figura 5.5 se pueden observar algunos momentos de la elaboración de los monolitos.



**Figura 5.5 A) Mezcla de los ingredientes para la creación de monolitos, B) Vaciado y fraguado del monolito.**

Al siguiente día de ser elaborados los monolitos se sacaron del molde, se sumergieron en agua e instantáneamente fueron envueltos en película plástica impermeable para que la humedad fuera del 100% durante el tiempo de fraguado y que no existieran pérdidas de humedad hacia el exterior, posteriormente se almacenaron en una cámara de curado a una temperatura constante de 25 °C durante 28 días. En la figura 5.6 se muestra un ejemplo de esto.

Cabe mencionar que para fines de la prueba de resistencia se tuvo que cambiar el molde para hacer los monolitos, ya que deben ser de forma cilíndrica de acuerdo a la norma de ASTM C39 como aparece en la figura 5.7



**Figura 5.6 A) Monolito sumergido en agua. B) Monolitos envueltos con película plástica impermeable**



**Figura 5.7 Molde para monolitos cilíndricos.**

Cada monolito fue marcado primero con el número del punto de muestreo del jal empleado para su elaboración y posteriormente se escribió la concentración con la que fueron hechos, por lo que la clave de cada monolito es primero el punto de muestreo y posteriormente la mezcla con la que fueron elaborados según la tabla 5.6. Por ejemplo:



#### 5.4.2 Mezcla Jal-OPC-Arena

Para su elaboración se ocuparon los siguientes equipos y materiales:

- ✚ Muestras de jales
- ✚ Arena estandarizada del Instituto Eduardo Torroja (España)
- ✚ Agua
- ✚ Cemento Portland OPC (EM II32.5 N)
- ✚ Mezclador
- ✚ Moldes de plástico.

Estos monolitos se hicieron en el departamento de Materiales Inorgánicos y Medioambiente, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Navarra en Pamplona, por lo que fue necesario enviar las muestras de México a España y las cantidades que se utilizaron son las siguientes:

**Tabla 5.7 Masa para la elaboración de monolitos de la mezcla Jal-OPC-Arena.**

Masa (g)		
Residuo	Cemento	Arena
567.9	664.2	567.9



Primeramente, los componentes cemento, arena y jales se mezclaron durante 5 minutos con un mezclador. Después se añadió agua y se mezcla durante 90 s a baja velocidad. La mezcla fresca se moldeó en moldes cilíndricos de 34 mm de diámetro por 40 mm de altura y se curaron 28 días de acuerdo a la norma EN 1015-2 para evaluar las propiedades estado endurecido. Seis muestras se prepararon para cada una de los puntos muestreados, un total de 36 piezas para realizar las pruebas necesarias, ejemplo de estas puede observarse en la figura 5.8

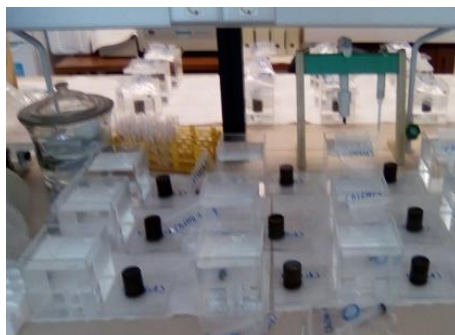


Figura 5.8 Monolitos hechos con OPC, en la Universidad de Navarra

#### 5.4.3 Mezcla Jal-CAC-Arena

Para su elaboración se ocuparon los mismos equipos y materiales que para hacer los monolitos de la Mezcla Jal-OPC-Arena, ya que de igual forma fueron elaborados en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Navarra el único cambio es el cambio de OPC por CAC (Cemento Aluminato de Calcio), cabe señalar que se ocuparon dos tipos de este material el blanco y el obscuro. Las cantidades que se emplearon son las siguientes:

CAC blanco			CAC obscuro		
Masa (g)			Masa (g)		
Residuo	Cemento	Arena	Residuo	Cemento	Arena
587.7	624.6	587.7	562.5	675	562.5

Tabla 5.8 Masa para la elaboración de monolitos de la mezcla Jal-CAC-Arena

El procedimiento para la elaboración es el mismo que para los monolitos de la mezcla anterior, con las mismas características en sus dimensiones y se generaron 72 piezas es decir 36 por cada tipo de CAC, para las pruebas correspondientes, pero cabe destacar que durante el fraguado estos monolitos durante su fraguado se



desprendió calor y al momento de desmoldar se expandieron tanto que las probetas reventaron como se muestra en la figura 5.9.



**Figura 5.9** Probetas que no fraguaron elaboradas con CAC.

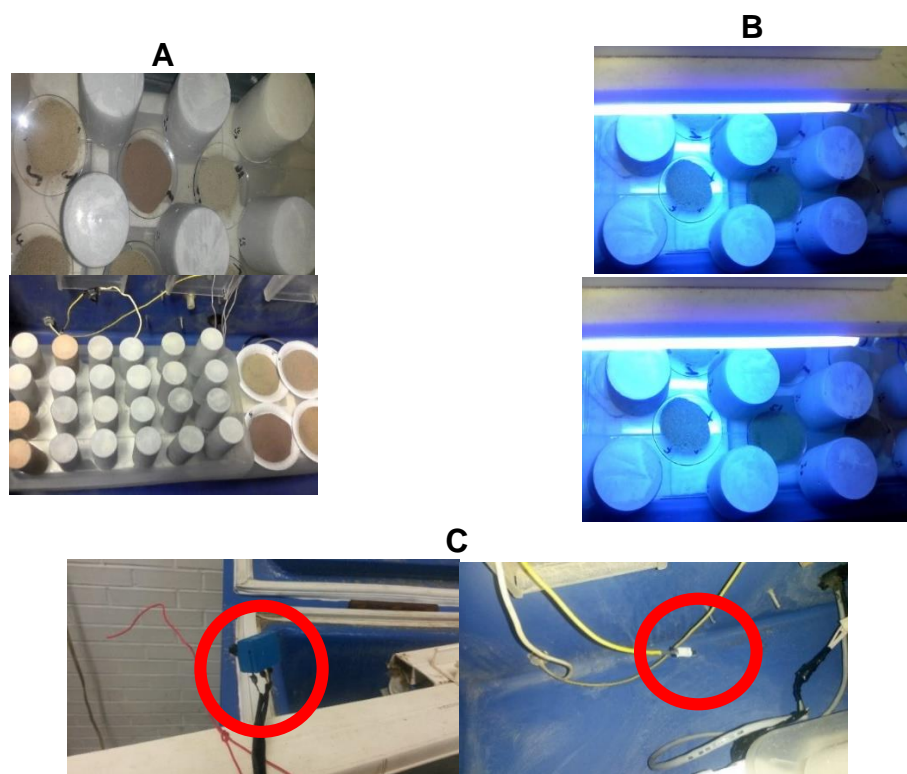
Es importante señalar que sólo quedaron servibles para realizar las pruebas correspondientes, las probetas hechas con CAC blanco y con jales del punto HP2. Las pruebas realizadas a estas probetas al ser elaboradas en la Universidad de Navarra, no se les aplicaron las mismas pruebas que a las probetas de México, para ellas solo se realizaron las pruebas de: resistencia a la compresión, para conocer su resistencia y la prueba de tanque según la norma EA NEN 7375:2004, para saber si la matriz es capaz de retener a los contaminantes.

### **5.5 Prueba de intemperismo acelerado**

Una vez transcurridos los 28 días de fraguado de los bloques se realizó esta prueba haciendo uso de las instalaciones de la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, donde se utilizó la cámara de intemperismo que fue creada por ingenieros de la Facultad de Ingeniería y en este equipo se simularon las condiciones extremas en la atmósfera de la Ciudad de México para la generación de lluvia ácida, basado en la NOM-022-SSA1-2010 para la cantidad de dióxido de azufre en el aire y en la NOM-021-SSA1-1993 para la concentración de monóxido de carbono en el aire, ya que estos dos gases fueron empleados en el equipo, y además se controló la humedad al 90%.

Los monolitos fueron sometidos 168 horas como lo marca la norma de la Agencia de Protección al Ambiente EPA-1627 y la concentración de óxido de azufre fue 100 veces más de lo que indica la norma NOM-022-SSA1-2010. Además, se contó con la irradiación de una lámpara UV, simulando la radiación solar, en la figura 5.10 se muestran los monolitos dentro de la cámara de intemperismo.





**Figura 5.10 A) Monolitos en la cámara de intemperismo, B) Monolitos irradiados por la lámpara de rayos UV, C) Sensores de humedad y de concentración respectivamente de la cámara de intemperismo.**

Después de estar los monolitos en esta cámara de intemperismo se procedió a realizar el lavado de los mismos con ácido sulfúrico con una solución con pH de 4.2 simulando a la lluvia ácida por una hora como lo marca la norma EPA-1627 para extraer los posibles contaminantes, el lixiviado se analizó con absorción atómica siguiendo las mismas condiciones empleadas al momento de caracterizar los jales.

## 5.6 Extracto PECT

Esta prueba fue realizada en la Facultad de Química en dos ocasiones: a) los monolitos después del lavado de la prueba de intemperismo y b) sin ser lavados. El procedimiento se siguió como se menciona en la NOM-053-SEMARNAT-1993, por lo que se tuvo que hacer la trituration de los monolitos, para alcanzar el tamaño de partícula, se midió el pH y fue sumamente alcalino, aun habiendo agregando el ácido nítrico que se menciona en la norma, por lo que se procedió a utilizar el reactivo número dos descrito en el procedimiento, el tiempo de lavado fue  $16 \pm 1$  hora y se mantuvo en constante agitación. En la figura 5.11 se muestran algunas etapas de este proceso.

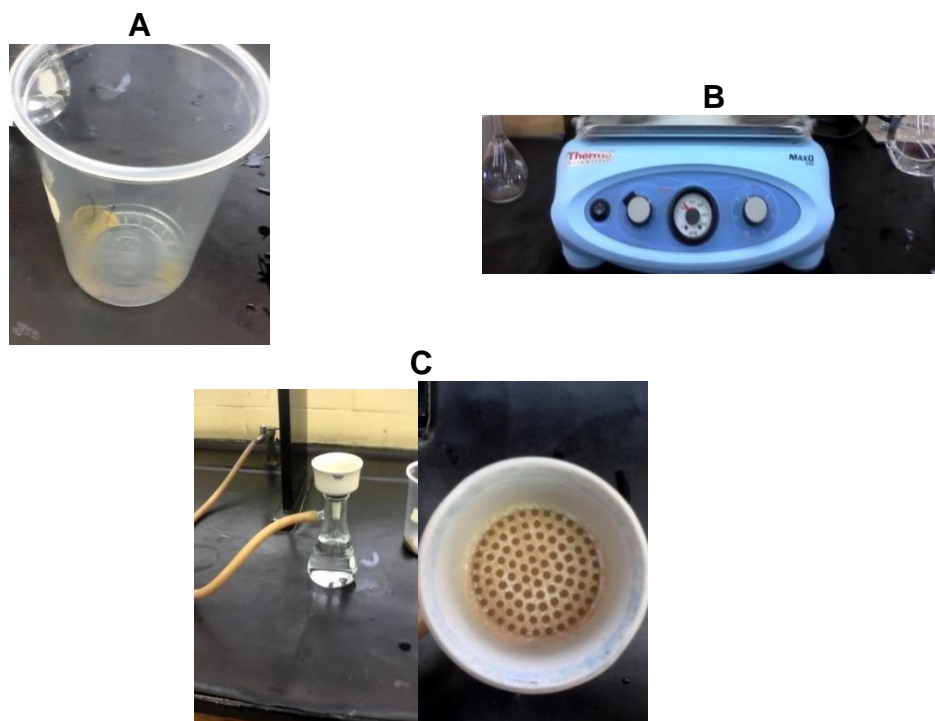


Figura 5.11 A) Muestra molida sometida a lavado con ácido acético B) Máquina agitadora empleada en la prueba, C) Filtrado de las muestras para su posterior análisis.

## 5.7 Prueba de Tanque

Los monolitos se sometieron a la prueba de tanque según lo marca la norma EA NEN 7375, la cual consiste en colocar las piezas en recipientes sellables de metacrilato y se llenaron con 1 litro de agua desmineralizada con pH neutro, con el fin de obtener el lixiviado, durante un periodo de 64 días, como se muestra en la figura 5.12.

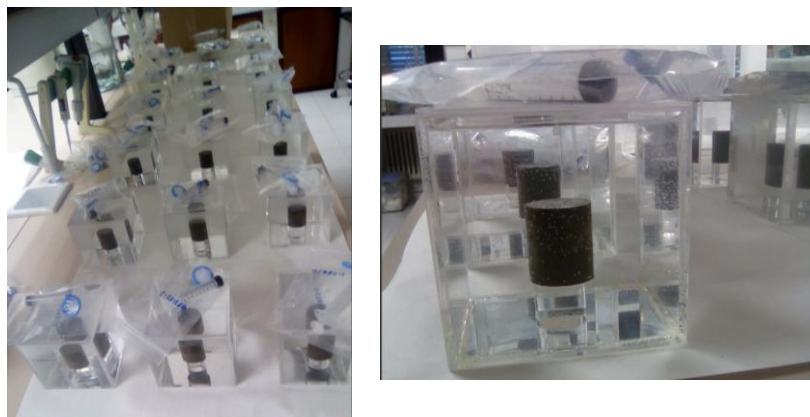


Figura 5.12 Monolitos sometidos a la prueba de tanque.



Dentro de este periodo se debe coger muestra y drenar en ocho ocasiones (0,25, 1, 2,25, 4, 9, 16, 36 y 64 días). Para esta prueba se muestreo en 7 ocasiones debido al tiempo que duró la estancia. Después de cada intervalo de tiempo, se midió conductividad y el pH con un equipo 4-Star, se tomaron 10 mL de alícuota de cada muestra las cuales se filtraron con una membrana CHMLAB de Nylon con un tamaño de poro de 0.45 micras y se almacenó agregando  $\text{HNO}_3$  para cuantificar los metales lixiviados con el equipo de absorción atómica Perkin-Elmer 800 A Analyst, las muestras pueden ser observadas en la figura 5.13.

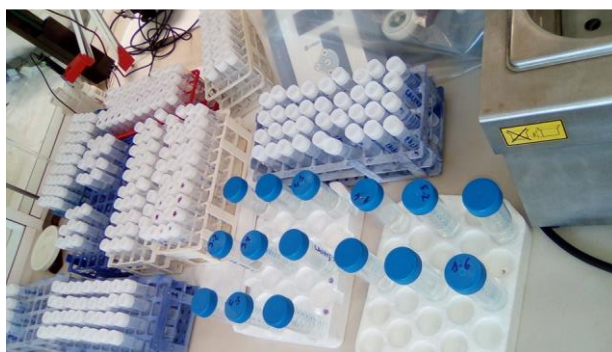


Figura 5.13 Muestras recolectadas durante la prueba de tanque.

## 5.8 Prueba de compresión simple

### 5.8.1 Monolitos fabricados en la UNAM

Después de conocer los resultados de las pruebas anteriores, como el tratamiento no mostró resultados que sobrepasarán los límites máximos permitidos se procedió a hacer la prueba de compresión simple en la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería con ayuda del equipo marca Instron con una capacidad de carga de hasta 15000 kg, para lo que primero se tuvo que cortar los monolitos en forma con la cortadora que se localiza en la misma División, de la cual se muestra una imagen en la figura 5.14.



**Figura 5.14 Cortadora**

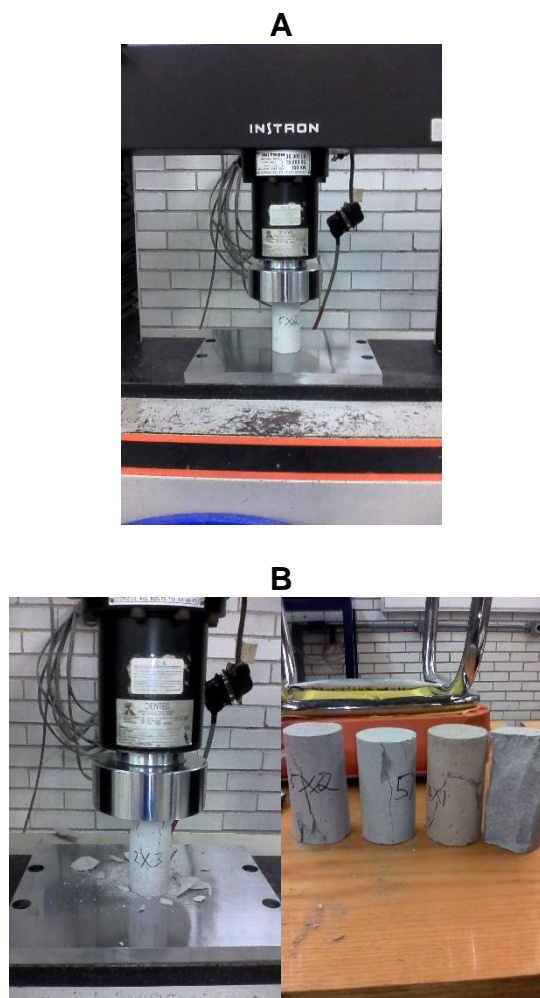
Ya que los monolitos se cortaron se llevaron a la máquina de compresión simple considerando a ASTM C39, “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto” y se establecieron las condiciones que indica la tabla 5.7, cabe destacar que se conservó la dimensión de los bloques 2 a 1 para que se cumpliera con lo indicado en la norma, por lo que se tuvo mucho cuidado y precisión en los cortes.

Para esta prueba se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Inicialmente se cortaron los bloques con una altura de  $9.8 \pm 0.1$  cm.
2. Posteriormente se programó el equipo Instron con los valores descritos en la tabla 5.9.
3. Con el equipo configurado, se colocaron los monolitos debajo del cabezal como se muestra en el inciso a de la figura 5.15.
4. Finalmente comienza la compresión en el equipo hasta que la pieza presenta el quiebre, el cual es detectado automáticamente, algunas piezas quebradas se muestran en el inciso b de la figura 5.15

**Tabla 5.9 Parámetros para la prueba de compresión simple**

Parámetro	Especificación
Geometría	cilíndrica
Altura del cilindro	9.8 cm
Diámetro del cilindro	4.9 cm
Velocidad del cabezal	0.0245 cm/min



**Figura 5.15 A) Puesta del monolito bajo el cabezal de la máquina, B) Falla y ruptura de los monolitos.**

### **5.8.2 Monolitos fabricados en la Universidad de Navarra**

Después de cada uno de los períodos de curado, la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas se evaluó en un el equipo de compresión simple ETI 26.0052 a una velocidad de carga de 50 N/s, para poder realizar esta prueba se siguió la norma EN-998-2, 2010, no fue necesario cortarlos o dar un tratamiento previo, ya que se contaba con moldes los cuales permitían una superficie plana a las probetas y llevar a cabo esta prueba.

Con esta prueba se concluyen la parte experimental y las pruebas realizadas a los monolitos en la siguiente sección se pueden observar los resultados de mismas.





## Capítulo 6 Resultados

En este capítulo se enuncian los resultados obtenidos tanto en el análisis de la caracterización de los jales, como las pruebas de lixiviación de los monolitos, hay que recordar que estas pruebas, tanto la de intemperismo acelerado como la PECT fueron críticas e importantes, debido a que si el arsénico y/o el plomo lixivian en alguna de ellas en concentraciones superiores a los límites máximos, no tendría sentido realizar la prueba de compresión simple, y no se recomendaría el aprovechamiento del producto del este tratamiento por el riesgo que este implicaría, sin embargo en este estudio no fue el caso y ninguna de las pruebas de lixiviación sobre pasaron los límites máximos permisibles.

### 6.1 Caracterización de los jales

Las concentraciones de plomo y arsénico se obtuvieron con la prueba de absorción atómica, cabe destacar que para cada punto de muestreo se leyeron dos alícuotas resultantes de la digestión ácida, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 6.1, además en la figura 6.1 se muestran los niveles promedio de arsénico en las muestras y en la 6.2 los de plomo.

Tabla 6.1 Concentraciones de plomo y arsénico totales de las muestras tomadas en Hidalgo del Parral, Chihuahua

Muestra	Tipo de jal	As  [ppm]	As  promedio [ppm]	Pb  [ppm]	Pb  promedio [ppm]
HPB	NA	27.29	25.09	98.38	97.35
		22.89		96.32	
HP2	Nuevo	632.1	624.74	4244.42	4525.54
		617.39		4806.65	
HP3	Nuevo	191.77	202.5	2983.26	3012.94
		213.23		3042.62	
HP5	Blanco	516.54	501.93	2902.16	2880
		487.32		2857.85	
HP7	Blanco	474.4	499.19	4813.38	4762.31
		523.98		4711.24	
HP16	Rojo	545.05	545.16	2753.91	3205.23
		545.27		3656.55	
HP17	Rojo	655.86	659.51	2894.3	2896.9
		663.16		2899.5	

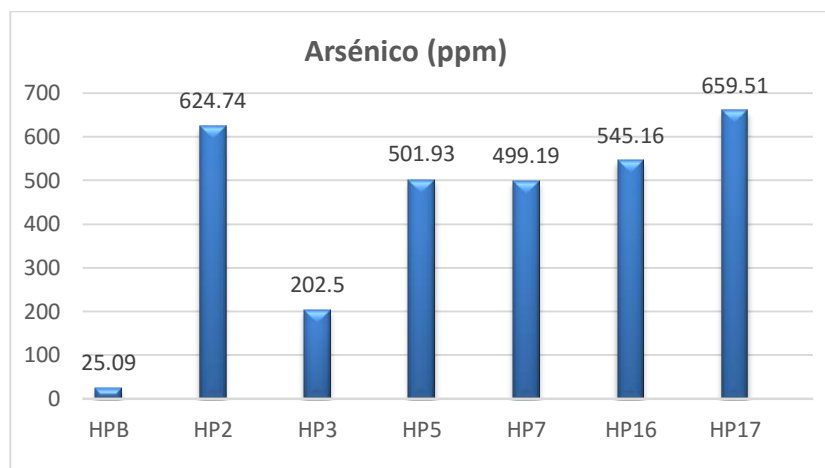


Figura 6.1 Niveles de arsénico en ppm encada punto muestreado.

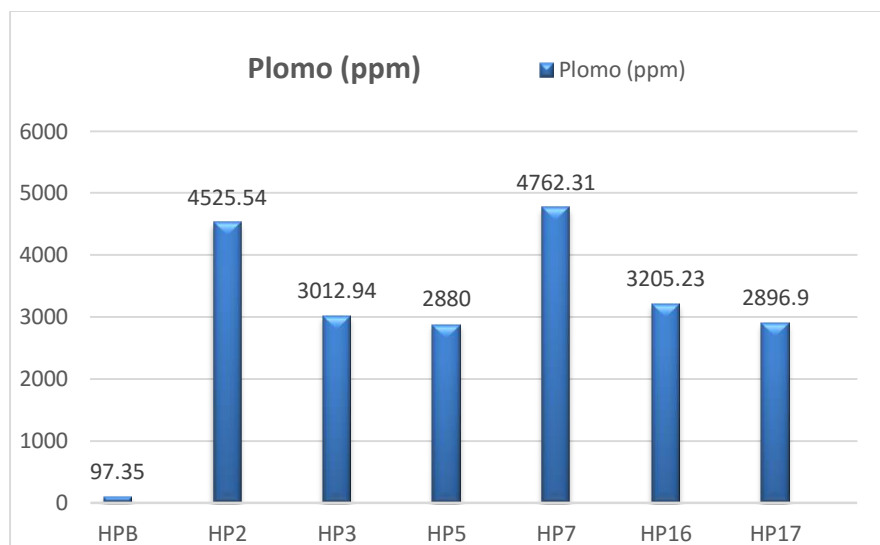


Figura 6.2 Niveles de plomo en ppm en cada punto muestreado.

## 6.2 Preparación de los monolitos

Se realizaron 3 monolitos con dos repeticiones por cada punto, es decir se realizaron 42 monolitos por cada molde, y como se utilizaron dos moldes se generó un total de 84 monolitos para realizar las pruebas correspondientes, lo que cabe resaltar, es que, al finalizar el tiempo de curado, estos terminaron con acabado espejo como se muestra en la figura 6.1.



Figura 6.3 Brillo del monolito debido al acabado espejo.

### 6.3 Prueba de intemperismo

Los monolitos se sometieron a condiciones ambientales extremas, posteriormente se lavaron con agua desionizada y el lixiviado se analizó con espectrofotometría de absorción atómica para conocer si el arsénico y el plomo se liberan al ambiente, así como su concentración. Se obtuvieron los resultados de la tabla 6.2. Es importante mencionar que los jales sin tratamiento también fueron sometidos a las mismas condiciones, los resultados de su análisis también se encuentran en la tabla y de manera gráfica se pueden observar en las figuras 6.4 y 6.5.

Tabla 6.2 Resultados de las concentraciones de los lixiviados de la prueba de intemperismo.

Clave muestra	Pb  [ppm]	As  [ppb]	Clave muestra	Pb  [ppm]	As  [ppb]
<b>Bx1</b>	No detectable	1.00	<b>7x3</b>	No detectable	0.80
<b>Bx2</b>	No detectable	1.91	<b>16x1</b>	No detectable	0.50
<b>Bx3</b>	No detectable	1.00	<b>16x2</b>	No detectable	0.95
<b>2x1</b>	No detectable	2.21	<b>16x3</b>	No detectable	0.35
<b>2x2</b>	No detectable	1.30	<b>17x1</b>	No detectable	0.65
<b>2x3</b>	No detectable	1.91	<b>17x2</b>	No detectable	No detectable
<b>3x1</b>	No detectable	No detectable	<b>17x3</b>	No detectable	0.20
<b>3x2</b>	No detectable	0.50	<b>HP2</b>	0.62±0.07	0.50
<b>3x3</b>	No detectable	No detectable	<b>HP3</b>	3.41±0.015	13.83
<b>5x1</b>	No detectable	0.80	<b>HP5</b>	4.52±0.07	61.00
<b>5x2</b>	No detectable	0.80	<b>HP7</b>	5.36±0.07	115.61
<b>5x3</b>	No detectable	0.80	<b>HP16</b>	5.67±0.07	53.13
<b>7x1</b>	No detectable	0.50	<b>HP17</b>	3.99±0.07	75.35
<b>7x2</b>	No detectable	0.65			



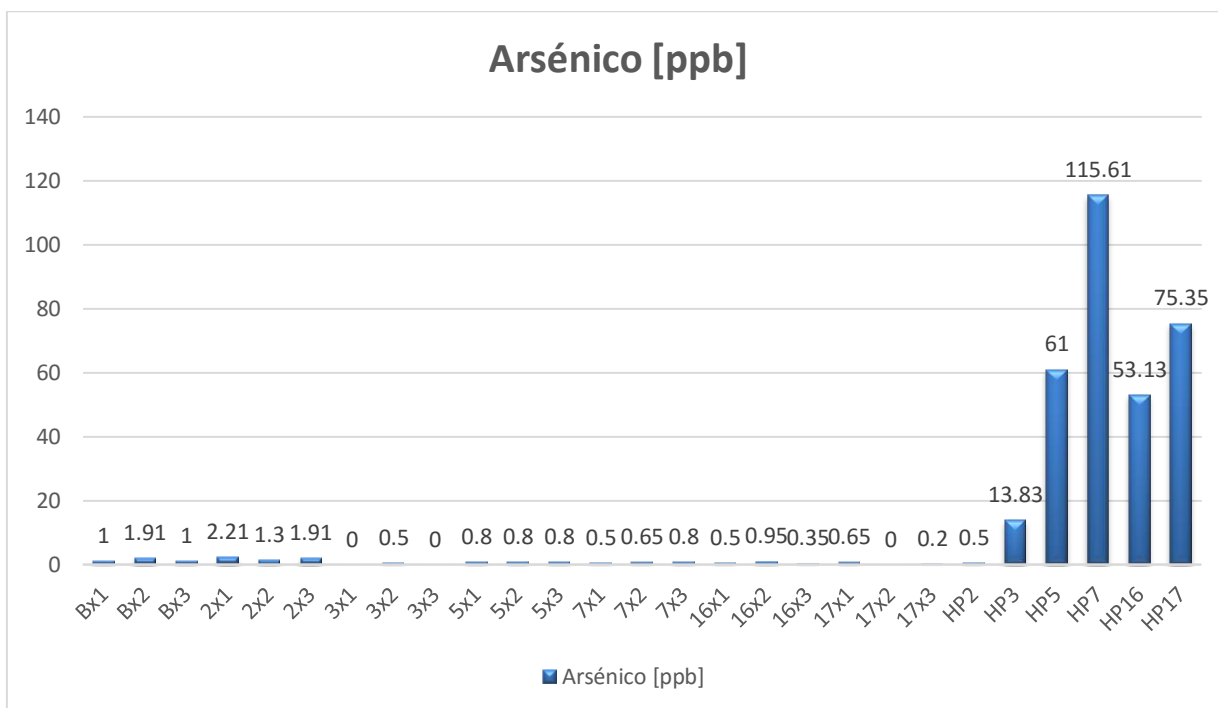


Figura 6.4 Niveles de arsénico en partes por billón en el lixiviado generado por el lavado de las pruebas de intemperismo.

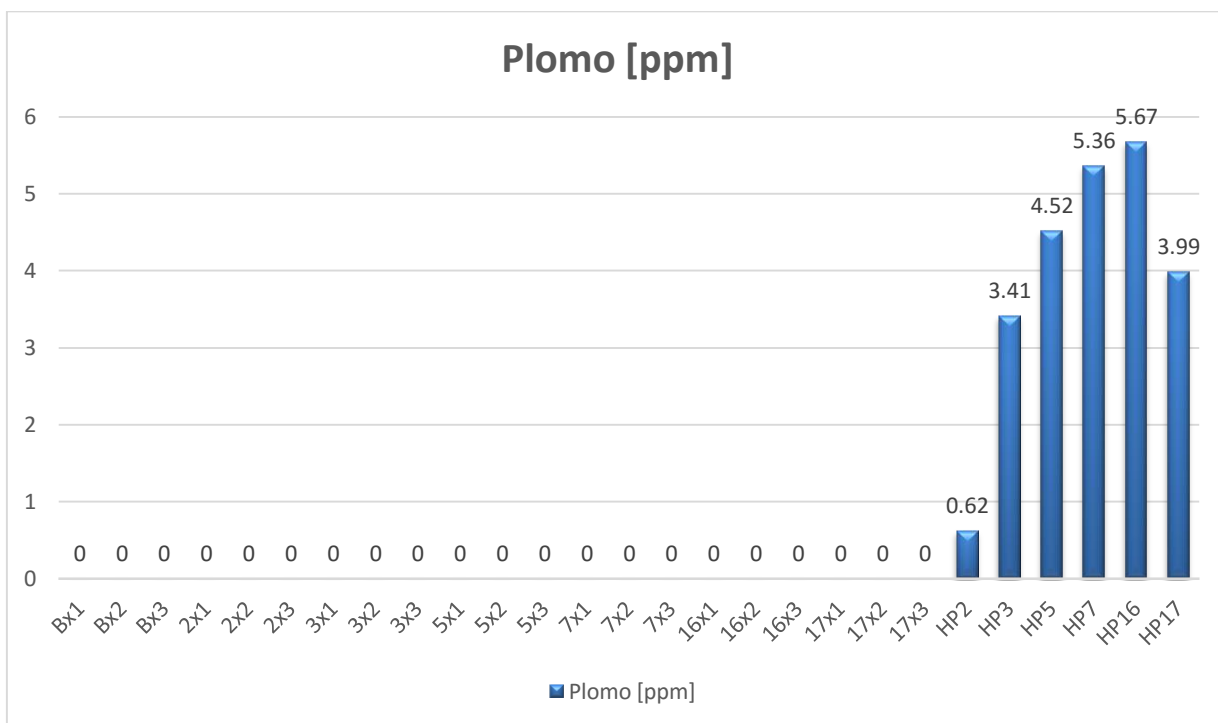


Figura 6.5 Niveles de plomo en partes por millón en el lixiviado generado por el lavado de las pruebas de intemperismo.



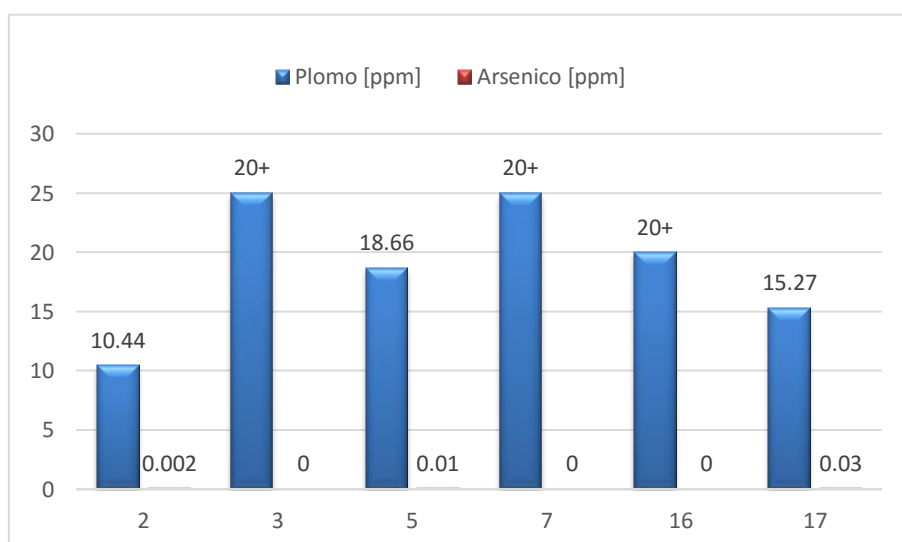
Como puede observarse en las figuras anteriores el nivel de concentración de As en el lixiviado disminuye cuando los jales se encuentran solidificados/estabilizados y la concentración de Pb es tan baja, que el equipo de medición no logra detectarlo.

## 6.4 Prueba PECT

Los monolitos y los jales sin tratamiento se sometieron a esta prueba. En la tabla 6.3 y la figura 6.6 se muestran los resultados de las concentraciones del lixiviado de plomo y arsénico contenido en los jales sin algún tratamiento previo. En este caso algunas muestras superaron la curva de calibración de plomo que llegaba hasta 20 ppm por lo que no se puede decir la cantidad exacta de este elemento en algunas muestras.

**Tabla 6.3 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales.**

Clave muestra	Pb  [ppm]	As  [ppb]
2	10.44	0.002
3	más de 20 ppm	ND
5	18.66	0.01
7	más de 20 ppm	ND
16	más de 20 ppm	ND
17	15.27	0.03



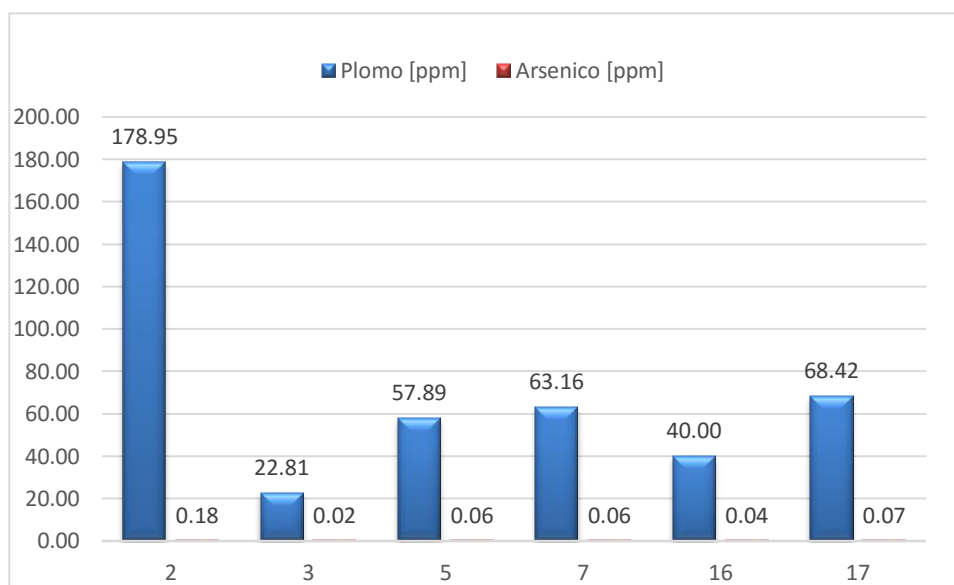
**Figura 6.6 Concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales.**



En la tabla 6.4 y la figura 6.7 se muestran las concentraciones de Pb y As del lixiviado de los jales sin tratamiento, pero que estuvieron bajo intemperismo acelerado en el laboratorio.

**Tabla 6.4 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales sometidos a intemperismo acelerado.**

Clave muestra	[Pb] [ppm]	[As] [ppb]
2	27.28	178.95
3	9.40	22.81
5	20.72	57.89
7	34.76	63.16
16	40.72	40.00
17	13.85	68.42



**Figura 6.7 Concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT de los jales sometidos a intemperismo acelerado.**

Para la prueba PECT se realizaron dos repeticiones, la cual dio como resultado un par de concentraciones de Pb y otro par de As, que se cuantificaron del lixiviado producto de esta prueba y los resultados se muestran en la tabla 6.5 y en las figuras 6.8 y 6.9;



Tabla 6.5 Resultados de las concentraciones de plomo y arsénico del lixiviado de la prueba de extracto PECT.

Clave muestra	[Pb] [ppm] Primera repetición	[Pb] [ppm] Segunda repetición	[As] [ppb] Primera repetición	[As] [ppm] Segunda repetición
Bx1	0.27	0.01	ND	0.0113
Bx2	0.44	0.11	ND	0.0105
Bx3	0.27	ND	ND	0.0142
2x1	2.26	1.73	ND	0.0168
2x2	1.89	1.22	ND	0.0089
2x3	1.89	1.42	ND	0.0142
3x1	0.76	0.21	ND	0.0200
3x2	0.60	0.21	ND	0.0632
3x3	0.60	0.21	ND	ND
5x1	1.08	0.62	ND	0.0231
5x2	1.24	0.21	ND	0.0121
5x3	1.24	0.21	ND	0.0110
7x1	1.89	1.12	ND	0.0168
7x2	1.89	0.82	ND	0.0021
7x3	1.40	1.53	ND	0.0237
16x1	1.40	0.41	ND	0.0126
16x2	1.56	0.11	ND	0.0089
16x3	1.24	ND	ND	0.0205
17x1	0.92	0.41	ND	0.0274
17x2	0.92	0.72	ND	0.0232
17x3	0.92	ND	ND	0.0337

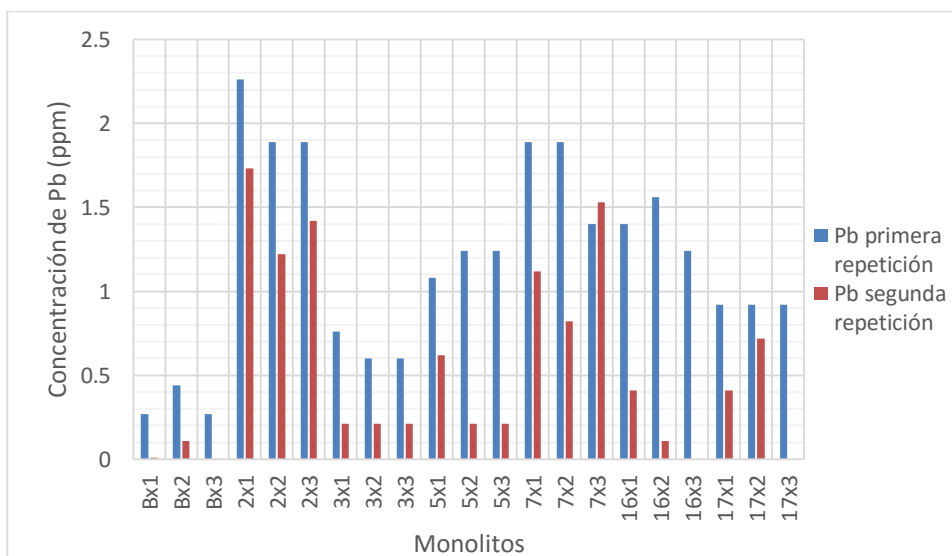


Figura 6.8 Concentraciones de plomo lixiviado de la prueba de extracto PECT.

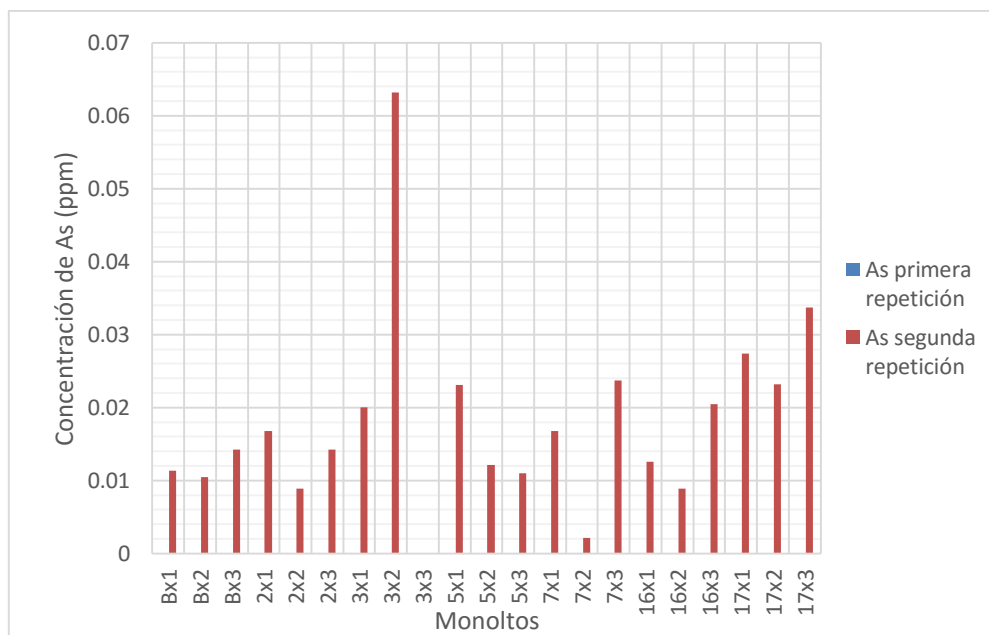


Figura 6.9 Concentraciones de arsénico lixiviado de la prueba de extracto PECT.

## 6.5 Prueba de Tanque

Los resultados de las concentraciones de Pb y As del lixiviado de esta prueba se muestran en la tabla 6.6



Tabla 6.6 Concentraciones medias de Pb y As del lixiviado de la prueba de Tanque.

Muestra	Concentración de Pb (ppm)	Concentración de As (ppb)
OPCHP2	0.1267	15.8290
OPCHP3	0.1133	6.1670
OPCHP5	0.0900	4.0750
OPCHP7	0.0967	9.6047
OPCHP16	0.0833	8.6590
OPCHP17	0.0767	9.4707
CACWHP2	0.7400	87.4600

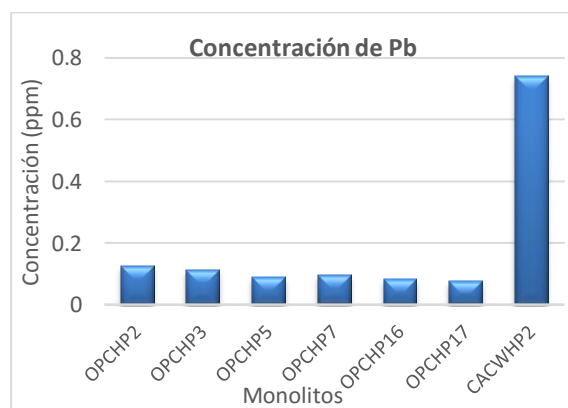


Figura 6.10 Concentraciones medias de Pb del lixiviado de la prueba de Tanque.

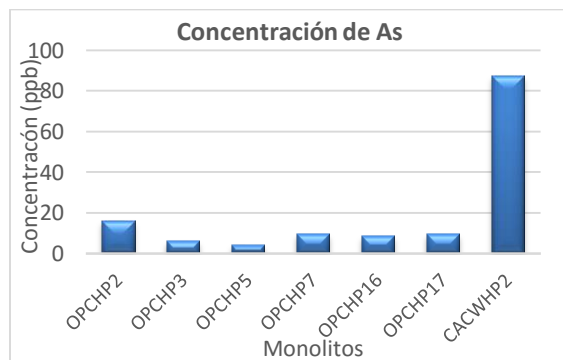


Figura 6.11 Concentraciones medias del As del lixiviado de la prueba de Tanque.

Como se puede observar en las gráficas anteriores las máximas concentraciones tanto de plomo como arsénico se encuentran en el monolito fabricado con CACw (Carbonato de calcio blanco) con los jales del punto HP2, hay que recordar que son los únicos monolitos de ese material que lograron fraguar en los 28 días; es

importante señalar que al pasar 2.25 días estos monolitos sufrieron una expansión y colapsaron como se muestra en figura 6.12, y la concentración de Pb y As que se muestra en las gráficas es sólo de esos 2.25 días, mientras que las concentraciones de las muestras fabricadas con OPC son de un periodo de 36 días, lo que demuestra que si no existe un fraguado en los monolitos, el contaminante a tratar simplemente es liberado y la estabilización solidificación no funciona.



Figura 6.12 Monolitos de CAC blanco colapsados al pasar 2.25 días.

## 6.6 Prueba de compresión simple

### 6.6.1 Monolitos fabricados en la UNAM

En esta prueba se obtuvieron los resultados de resistencia mostrados en la tabla 6.7 y en la figura 6.13 para los monolitos sin intemperismo acelerado, y en la tabla 6.8 y figura 6.14 para los monolitos con intemperismo.

Tabla 6.7 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo acelerado.

Muestra	Carga (MPa)	Muestra	Carga (MPa)
<b>Bx1</b>	19	<b>5x3</b>	26
<b>Bx2</b>	18	<b>7x1</b>	20
<b>Bx3</b>	19	<b>7x2</b>	28
<b>2x1</b>	20	<b>7x3</b>	25
<b>2x2</b>	33	<b>16x1</b>	19
<b>2x3</b>	20	<b>16x2</b>	35
<b>3x1</b>	17	<b>16x3</b>	18
<b>3x2</b>	27	<b>17x1</b>	24
<b>3x3</b>	36	<b>17x2</b>	24
<b>5x1</b>	18	<b>17x3</b>	25
<b>5x2</b>	27		

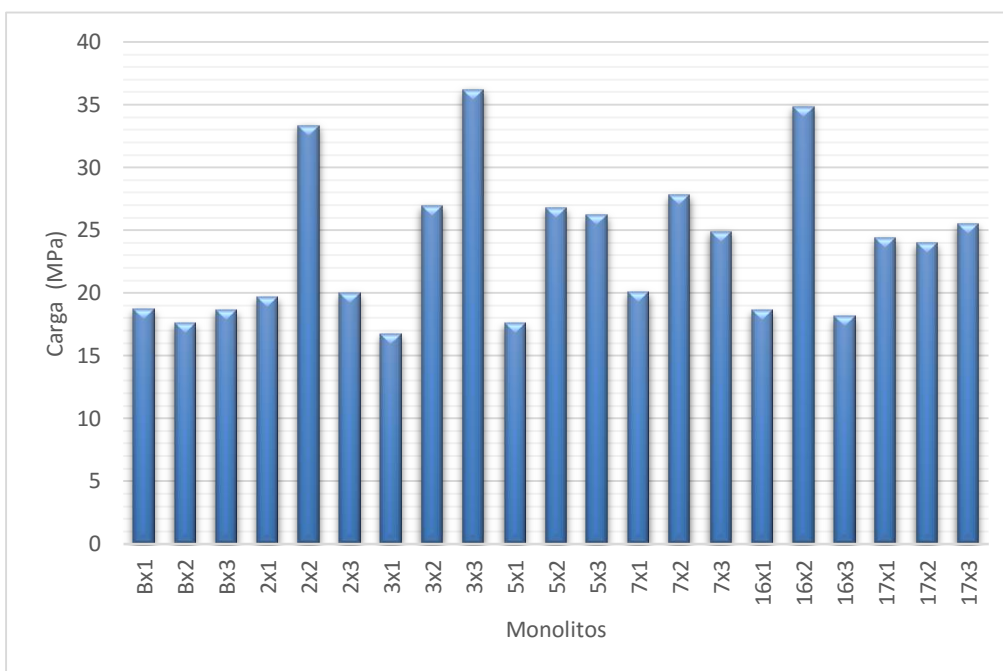


Figura 6.13 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo acelerado.

Tabla 6.8 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo acelerado.

Muestra	Carga Máxima [MPa]	Muestra	Carga Máxima [MPa]
<b>Bx1</b>	13	<b>5x3</b>	29
<b>Bx2</b>	28	<b>7x1</b>	19
<b>Bx3</b>	20	<b>7x2</b>	29
<b>2x1</b>	22	<b>7x3</b>	34
<b>2x2</b>	35	<b>16x1</b>	14
<b>2x3</b>	34	<b>16x2</b>	24
<b>3x1</b>	20	<b>16x3</b>	21
<b>3x2</b>	32	<b>17x1</b>	13
<b>3x3</b>	30	<b>17x2</b>	28
<b>5x1</b>	19	<b>17x3</b>	19
<b>5x2</b>	31		



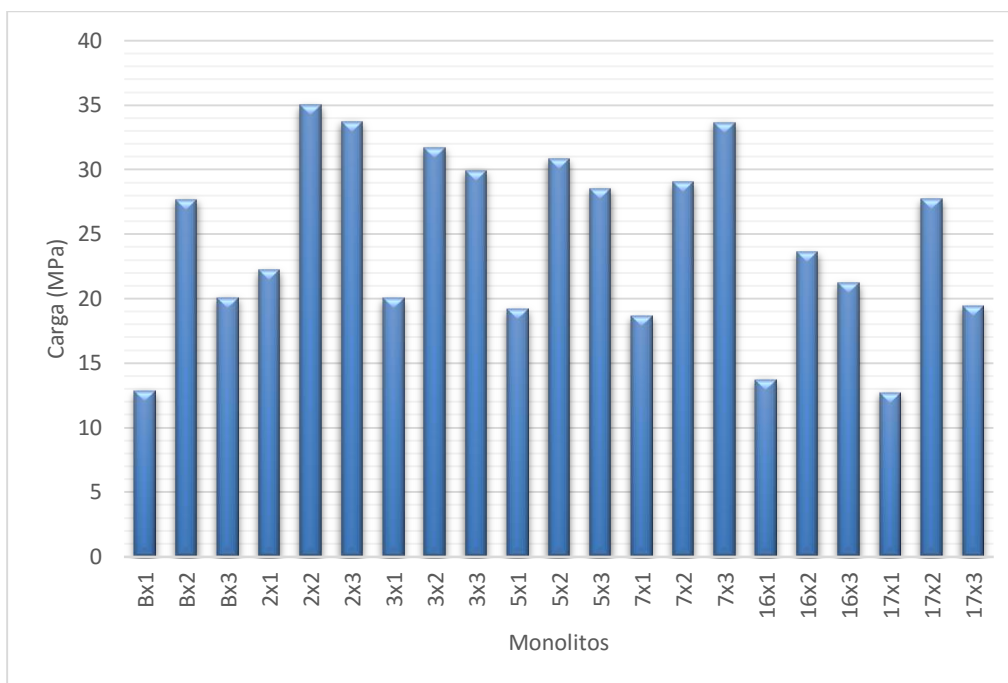


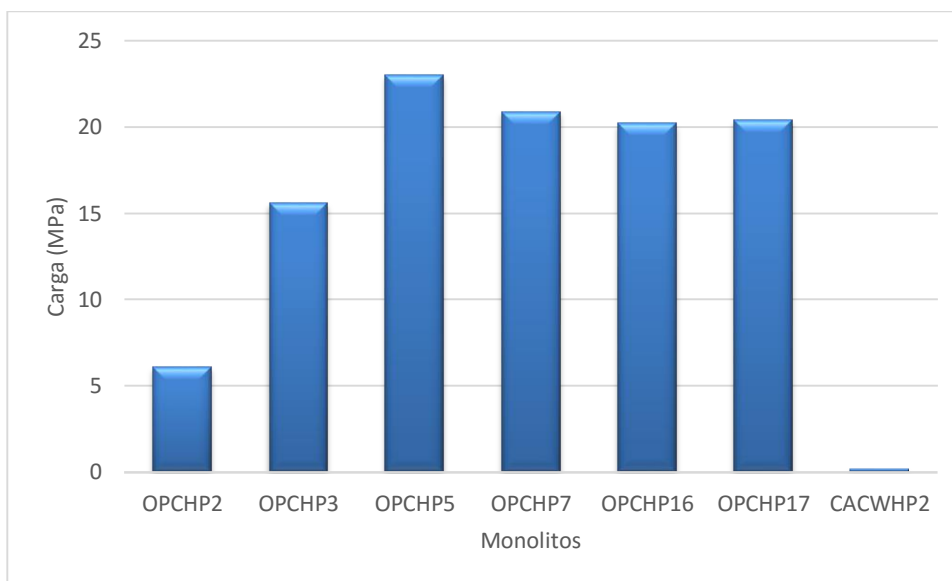
Figura 6.14 Carga máxima resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo acelerado.

### 6.6.2 Monolitos fabricados en la Universidad de Navarra

Los resultados de la prueba de compresión simple realizada en la Universidad de Navarra se muestran en la tabla 6.9 y en la figura 6.15.

Tabla 6.9 Carga máxima media resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos fabricados con arena en la Universidad de Navarra.

Muestra	Carga máxima (MPa)
OPCHP2	6.1
OPCHP3	15.6
OPCHP5	23
OPCHP7	20.9
OPCHP16	20.2
OPCHP17	20.4
CACWHP2	0.2



**Figura 6.15 Carga máxima media resultante de la prueba de compresión simple a los monolitos fabricados en la Universidad de Navarra.**

Observando la figura 6.15 se puede notar que el monolito con menor resistencia, fue el fabricado con CAC blanco, ya que este tipo de cemento no fue capaz de lograr un fraguado adecuado que soportara más de 4 MPa, mientras que el monolito que resistió más fue el fabricado con OPC y con el punto HP5. Estos resultados son las medias de 3 pruebas que se realizaron para cada uno de los puntos muestreados con los que se fabricaron los monolitos, y además se puede decir que las resistencias son menores que la de los monolitos hechos con la mezcla jal-CPC-zeolita. Sin embargo, están por encima de los 7.5 MPa que, de acuerdo con González en 2012, es el valor de la carga máxima que soporta un ladrillo convencional, por lo que el producto resultante de este tratamiento podría ser utilizado para su reaprovechamiento en la construcción si consideramos la resistencia.



## Capítulo 7 Análisis de resultados

El presente capítulo contiene el análisis, observaciones y discusiones analizadas durante el proceso de los siguientes puntos:

- Caracterización de los jales
- Solidificación/Estabilización

Cabe señalar que en el proceso de solidificación/estabilización se incluyen las pruebas de intemperismo acelerado, la prueba PECT y la prueba de compresión simple, las cuales son analizadas estadísticamente

### 7.1 Caracterización de los jales

La cuantificación de los metales contenidos en los jales confirmó nuevamente el exceso de Pb y As contenidos en los mismos, de acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Dicha norma establece como límite máximo permisible de estos metales para un uso residencial o agrícola una concentración de 400 ppm para Pb y 22 ppm para Arsénico, y para un uso industrial las concentraciones de 800 ppm y 260 ppm para el Pb y para el As respectivamente. Los valores obtenidos en la cuantificación los sobrepasan y no se cumple con lo establecido en esta NOM como se puede ver en las figuras 7.1 y 7.2. Donde el valor más alto de Pb se encuentra en el punto HP7 con un valor 4762.31 ppm y todos los puntos sobrepasan los límites máximos permisibles y para el arsénico se encuentra en el HP17 con valor de 659.51 ppm y el punto HP3 no sobrepasa el límite máximo permisible para el suelo de uso industrial, sin embargo, sobrepasa el límite para uso agrícola o doméstico.

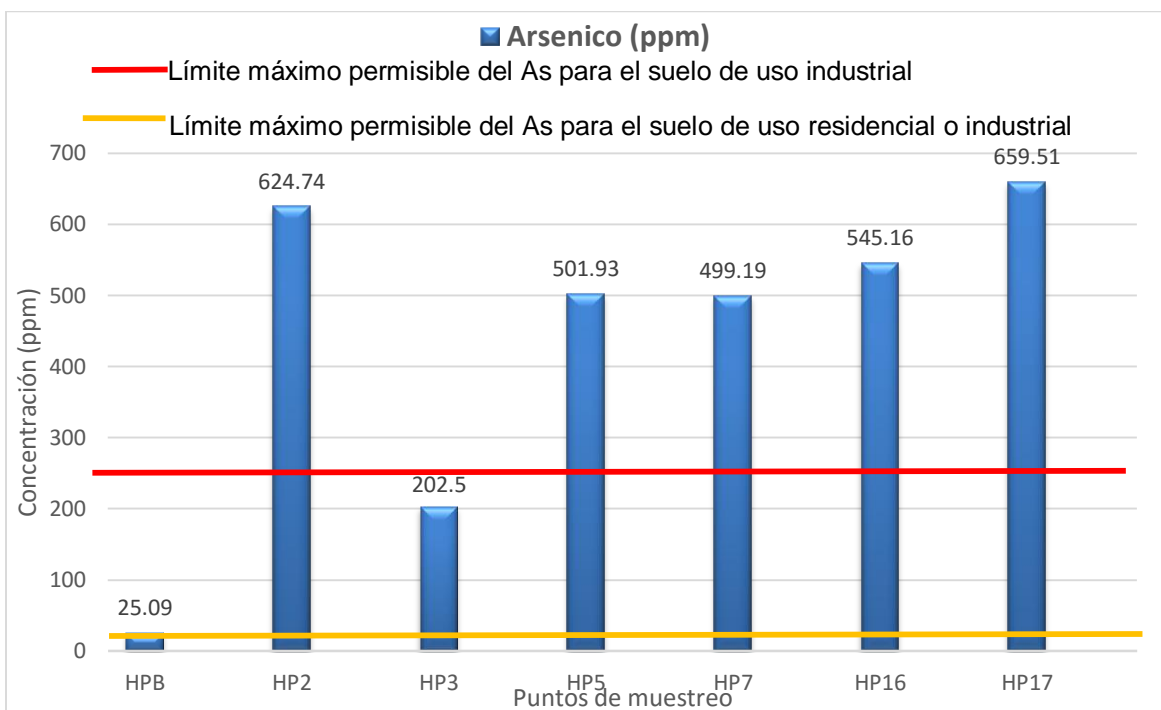


Figura 7.1 Concentraciones de arsénico y su límite máximo permisible.

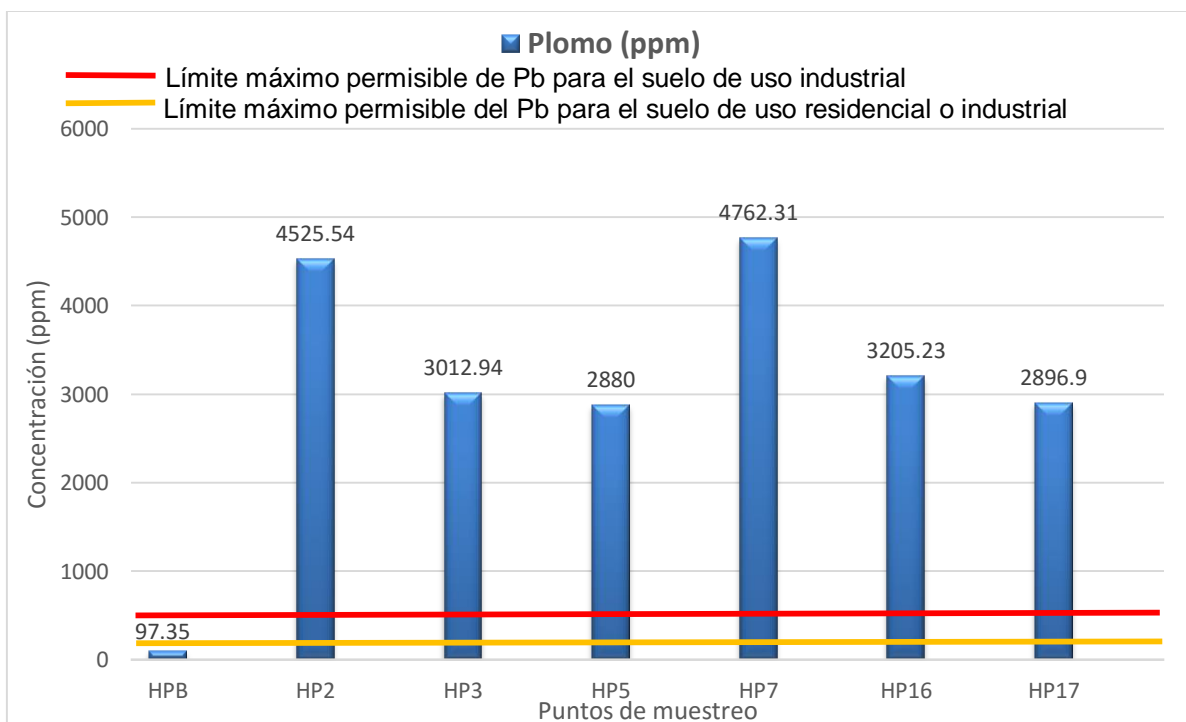


Figura 7.2 Concentraciones de plomo y su límite máximo permisible.

En virtud de lo anterior es necesario usar un tratamiento, por lo cual, en este trabajo se propone hacer uso de la solidificación/estabilización como alternativa, ya que mediante esta técnica se pueden realizar propuestas de aprovechamiento para este tipo de residuos, ya sea como material de relleno o material para la construcción.

## 7.2 Solidificación/estabilización

Para realizar el análisis de los resultados que se obtuvieron a partir del tratamiento que se empleó hay que recurrir al diseño de experimentos planteado anteriormente, por lo que es necesario comentar tipo de jales utilizado en cada monolito y el porcentaje de cemento Portland que fue empleado, lo cual se describe en la tabla 7.1.

**Tabla 7.1 Medias de los resultados de las pruebas realizadas a los monolitos.**

Tipo de jal	Mezcla	Clave muestra	Prueba PECT		Prueba de intemperismo		Prueba de Resistencia	
			[As] (ppb)	[Pb] (ppm)	[As] (ppb)	[Pb] (ppm)	Carga máxima sin intemperismo (MPa)	Carga máxima con intemperismo (MPa)
Nuevos	1 (CP<J)	2x1	16.84	1.73	2.21	0	20	22
		3x1	20	0.21	0	0	17	20
	2 (CP=J)	2x2	8.95	1.22	1.3	0	33	35
		3x2	6.32	0.21	0.5	0	27	32
	3 (CP=Z)	2x3	14.21	1.42	1.91	0	20	34
		3x3	0	0.21	0	0	36	30
Blancos	1 (CP<J)	5x1	23.16	0.62	0.8	0	18	19
		7x1	16.84	1.12	0.5	0	20	19
	2 (CP=J)	5x2	12.11	0.21	0.8	0	27	31
		7x2	2.11	0.82	0.65	0	28	29
	3 (CP=Z)	5x3	11.05	0.21	0.8	0	26	29
		7x3	23.68	1.53	0.8	0	25	34
Rojos	1 (CP<J)	16x1	12.63	0.41	0.5	0	19	14
		17x1	27.37	0.41	0.65	0	24	13
	2 (CP=J)	16x2	8.95	0.11	0.95	0	35	24
		17x2	23.16	0.72	0	0	24	28
	3 (CP=Z)	16x3	20.53	0	0.35	0	18	21
		17x3	33.68	0	0.2	0	25	19

Nota: CP<J es menos cemento portland que jales (mezcla 1), CP=J es misma cantidad de cemento portland que de jales (mezcla 2) y CP=Z es misma cantidad de cemento portland que de zeolita (mezcla3)



Como primera parte del análisis estadístico, se analizaron de los resultados obtenidos con la prueba PECT, posteriormente se analizaron los resultados de la prueba de intemperismo acelerado y por último el análisis de la prueba de compresión simple. Cabe destacar que todo el análisis se realizó en el software R versión 3.2.3 y el código de programación se encuentra en el anexo 1 para cada uno de las variables de respuesta

### 7.2.1 Análisis estadístico de la prueba PECT

#### Tratamiento de As

Se analizó el efecto que tiene cada uno de los tratamientos tomando como variable de respuesta la concentración de As en el lixiviado del extracto PECT. Y como se sabe se tienen dos variables independientes que son: la cantidad de cemento portland utilizado, con tres niveles y el tipo de jal con tres niveles y además que la unidad experimental es cada uno de los monolitos elaborados con las mismas condiciones para su fraguado, por lo que existe homogeneidad en las unidades experimentales. Cabe destacar que el diseño es factorial 3X3 de efectos fijos completamente al azar, cada factor con 3 niveles por lo que se tienen 9 tratamientos. Y se sabe que la selección de los monolitos fue al azar. Además, cada tratamiento tiene 2 repeticiones, por lo tanto, es un diseño completo con un total de 18 datos.

Para realizar el análisis estadístico se hizo uso del programa R (ver anexo 1), el cual proporcionó los siguientes resultados

#### Tabla ANOVA

Response: y					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Jal	2	306.04	153.018	2.4805	0.1387
Cemento	2	275.85	137.924	2.2358	0.1628
Jal:Cemento	4	198.17	49.543	0.8031	0.5529
Residuals	9	555.20	61.689		

Al analizar la tabla ANOVA se puede observar que el p-value para la interacción Jal-Cemento resulta en un valor de 0.5529, por lo tanto, con un 5% de nivel de significancia, la hipótesis nula no se rechaza lo que implica que no hay interacción entre los factores.

Por otro lado, si observamos el valor de p-value del factor cemento su valor es 0.1628, considerando el 5% de nivel de significancia no se rechaza la hipótesis nula es decir se puede ocupar alguna de las tres masas de cemento utilizadas para que



el tratamiento funcione, sin embargo, por la elevación de costos lo que se recomienda es utilizar la que ocupa menor cantidad de cemento en este caso es el nivel 1 o mezcla 1. Si analizamos el valor del p-value para el jal vemos que es 0.1387 por lo que la hipótesis nula para el tipo de jal no se rechaza al considerar el nivel de significancia del 5 % por lo que el tipo de jal no tiene efecto en el tratamiento, lo que nos indica que este tratamiento puede ser utilizado para cualquier tipo de jal.

Al observar la gráfica quantil-quantil podemos observar que se rechaza la hipótesis de que existe una distribución normal de los errores como se muestra en la figura 7.3, por lo que podría ser empleada una transformada de la variable.

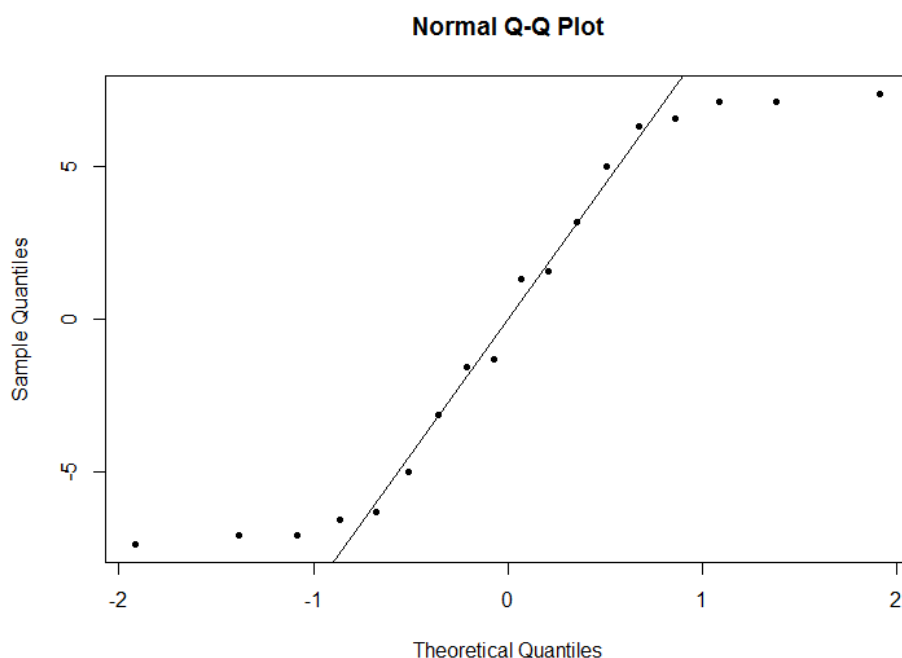


Figura 7.3 Gráfica quantil-quantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de As en lixiviado de la prueba PECT.

### Tratamiento de Pb

Para el caso de la concentración del Pb se sigue el mismo modelo que se aplica para el caso del As y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla ANOVA

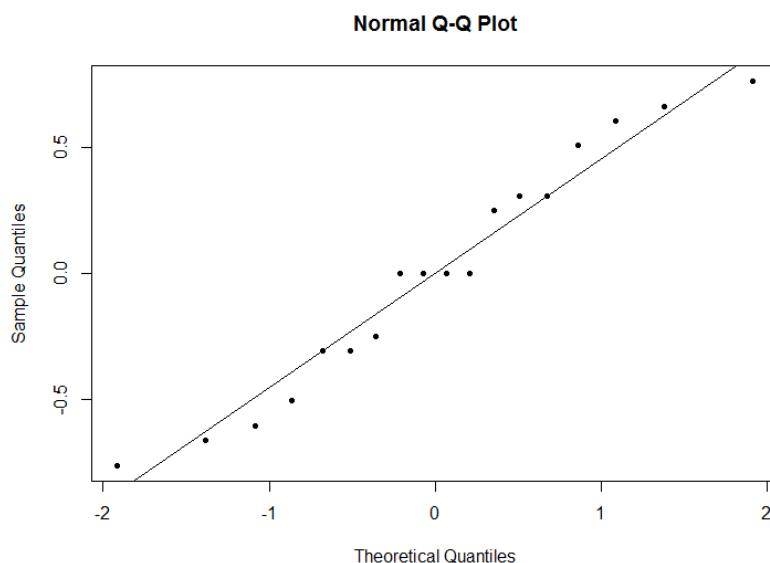
Response: y						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Jal	2	1.0912	0.54562	1.3041	0.3182	
Cemento	2	0.1526	0.07632	0.1824	0.8363	
Jal:Cemento	4	0.3083	0.07708	0.1842	0.9408	
Residuals	9	3.7656	0.41840			





Al analizar la tabla ANOVA el p-value para la interacción Jal-Cemento resulta en un valor de 0.9408, por lo tanto, la hipótesis nula no se rechaza con un 5% de significancia, por lo que no hay interacción entre los factores. Por otro lado, si observamos el valor de p-value del cemento su valor es 0.8363, considerando un valor de 5% de significancia, no se rechaza la hipótesis nula es decir podemos usar alguna de las tres masas de cemento utilizadas para que el tratamiento funcione, sin embargo, por la elevación de costos lo que se recomienda es utilizar la que usa menor cantidad de cemento en este caso es el nivel 1 o mezcla 1. Partiendo del resultado anterior también se recomienda el nivel 1 como mejor tratamiento tanto para el Pb como el As, por el costo. Si se observa el valor de p-value para el factor tipo de jal vemos que es 0.3182 por lo que la hipótesis nula para el tipo de jal no se rechaza al considerar el nivel de significancia del 5 % por lo que el tipo de jal no tiene efecto en el tratamiento, lo que nos indica que este tratamiento puede ser utilizado para cualquier tipo de jal.

Para este análisis los errores siguieron un comportamiento normal, esto se puede observar en la qqplot de los residuales que se muestra en la figura 7.4.



**Figura 7.4** Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de Pb en lixiviado de la prueba PECT.

### 7.2.2 Análisis estadístico de la prueba de intemperismo acelerado

En este caso, solo se analizaron los efectos que tienen en la concentración de As resultante del lixiviado del intemperismo acelerado, los factores tipo de jal como la cantidad de cemento, debido a que el Pb como se puede observar en la tabla 7.1



no lixivió en esta prueba y no se puede analizar estadísticamente, sin embargo, es un buen resultado, ya que no existe liberación de Pb.

Por tanto, el análisis estadístico de la variable de respuesta que es la concentración de As en el lixiviado del intemperismo acelerado, da como resultado la siguiente tabla ANOVA:

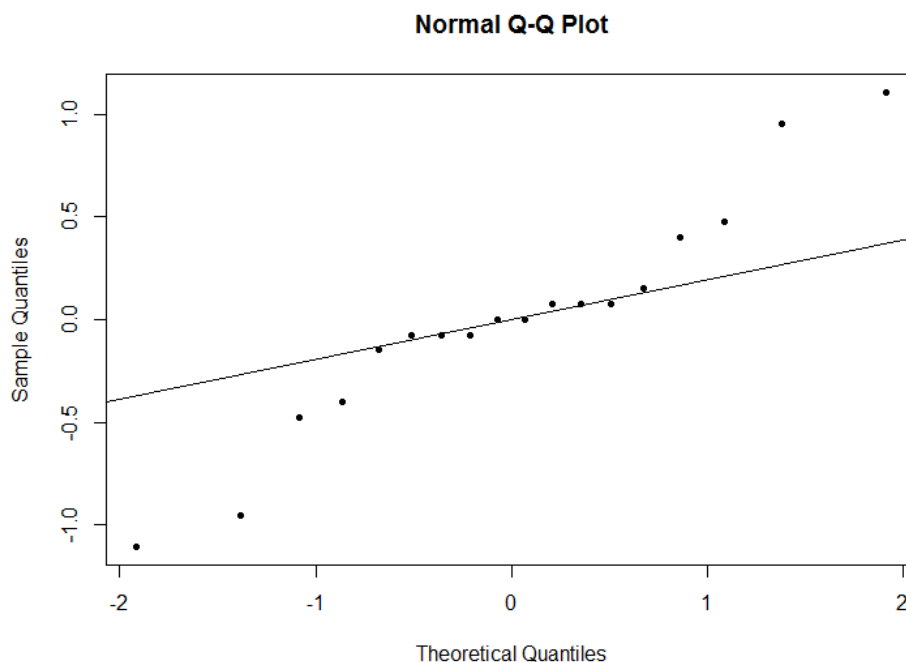
#### Tabla ANOVA

```
Response: y3
Df  Sum Sq  Mean Sq  F value  Pr(>F)
jal  2  0.22230  0.111150  0.3753  0.6974
Cemento  2  0.01431  0.007156  0.0242  0.9762
jal:Cemento  4  0.14062  0.035155  0.1187  0.9724
Residuals  9  2.66555  0.296172
```

Al analizar la tabla ANOVA se puede observar el p-value para la interacción Jal-Cemento resulta en un valor de 0.9724, por lo tanto, con un 5% de significancia, la hipótesis nula que supone que no hay interacción entre los factores, no se rechaza, es decir, no hay interacción entre los factores.

Por otro lado, si observamos el valor de p-value del factor cemento su valor es 0.9762, por tanto, no se rechaza la hipótesis nula lo que implica que se puede usar cualquiera de las tres masas de cemento utilizadas para que el tratamiento funcione, sin embargo, por la elevación de costos lo recomendable es utilizar la que tiene menor cantidad de cemento en este caso es el nivel 1 o mezcla 1. Si se observa el valor de p-value para el jal vemos que es de 0.3182 por lo que la hipótesis nula para el tipo de jal no se rechaza por lo que el tipo de jal no tiene efecto en el tratamiento, y este tratamiento puede ser utilizado para cualquier tipo de jal (rojo, blanco o nuevo).

Para comprobar que los datos tienen un comportamiento normal se elaboró la gráfica cuantil- cuantil que se muestra en la figura 7.5, sin embargo, se observa que se rechaza la hipótesis de que existe una distribución normal de los errores, por lo que podría aplicarse una transformada a la variable



**Figura 7.5** Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los errores de la concentración de As en lixiviado de la prueba de intemperismo acelerado.

### 7.2.3 Análisis estadístico de la prueba de compresión simple

Para el análisis de los resultados de la prueba de compresión simple el análisis del modelo estadístico queda de la siguiente manera:

#### Monolitos sin intemperismo

Para esta prueba se obtuvo la siguiente tabla ANOVA

Tabla ANOVA

```
Response: y
  Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Ja1  2    8.111   4.056  0.1454 0.8667
Cemento  2 263.111 131.556  4.7171 0.0397 *
Ja1:Cemento  4  52.222  13.056  0.4681 0.7582
Residuals  9 251.000  27.889
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05
```

Al analizar la tabla ANOVA se puede observar que el p-value para la interacción Ja1-Cemento considerando un 5% de significancia, tiene un valor de 0.7582, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula lo que significa que no hay interacción entre los factores, sin embargo, si observamos el valor de p-value para el factor cemento la



hipótesis nula se rechaza de modo que existe diferencia entre las medias, por lo tanto si hay variación al usar las diferentes cantidades de cemento, por lo que se realizó la prueba de Tukey para saber cuál son las diferencias entre los niveles

### Prueba de Tukey

```
> TukeyHSD(aov(y~Jal*Cemento))
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

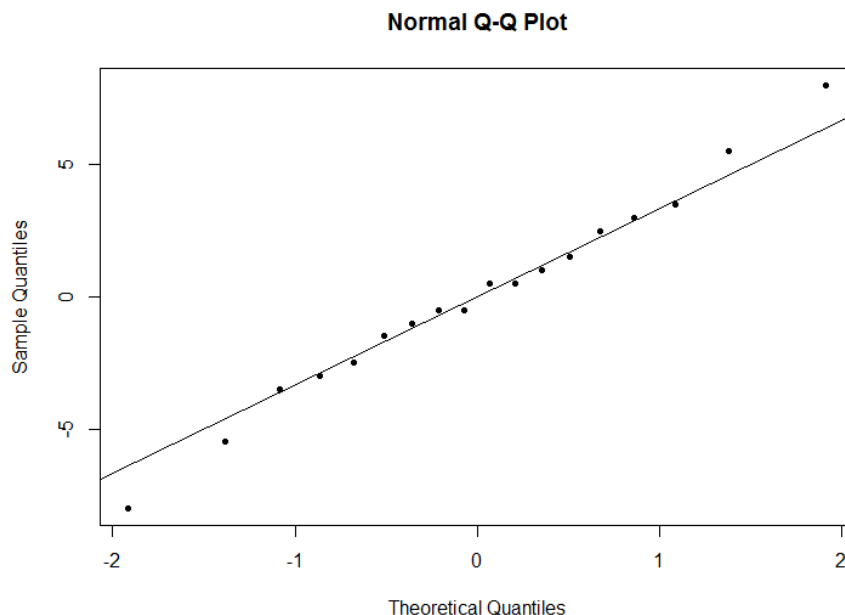
Fit: aov(formula = y ~ Jal * Cemento)

$Jal
      diff      lwr      upr    p adj
Nuevo-Blanco  1.5000000 -7.012777 10.012777 0.8768489
Rojo-Blanco    0.1666667 -8.346111  8.679444 0.9983543
Rojo-Nuevo    -1.3333333 -9.846111  7.179444 0.9010742

$Cemento
      diff      lwr      upr    p adj
X2-X1  9.333333  0.8205562 17.846111 0.0328650
X3-X1  5.333333 -3.1794438 13.846111 0.2403055
X3-X2 -4.000000 -12.5127772  4.512777 0.4239211
```

Como se observar en la prueba Tukey la diferencia existente, se encuentra al utilizar la mezcla 1 ya que al usar la mezcla 2 y 3 no existe diferencia al tener un valor de p-value mayor a 0.05.

Con la gráfica cuantil-cuantil de los residuales, se comprueba normalidad que existe en la prueba.



**Figura 7.6 Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los datos experimentales de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo.**



## Monolitos con intemperismo

Para esta prueba se obtuvo la siguiente tabla ANOVA.

```
Response: y
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
jal        2  268.0  134.000  30.5316 9.759e-05 ***
Cemento    2  496.0  248.000  56.5063 8.040e-06 ***
jal:Cemento 4   33.0   8.250   1.8797  0.1983
Residuals  9   39.5   4.389
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Al analizar la tabla ANOVA se puede observar el p-value para la interacción Jal-Cemento resulta en un valor de 0.1983, por lo tanto, que con un 5% de significancia la hipótesis nula, no se rechaza, es decir, no hay interacción entre los factores, sin embargo si observamos el valor de p-value para el factor cemento al tener un valor de  $8.04 \times 10^{-6}$  rechazamos la hipótesis de que no hay diferencia entre las medias de este factor, con un 5% de significancia, por lo tanto si hay variación al usar las diferentes cantidades de cemento, al igual en el factor tipo jal se rechaza la hipótesis nula de que no existe diferencia de medias al tener un valor el p-value de  $9.75 \times 10^{-5}$  con un 5% de significancia por lo tanto en este tratamiento también existe diferencia de medias de acuerdo al tipo de jal, por lo que se realizó la prueba de Tukey para saber cuál son las diferencias existentes.

## Prueba Tukey

```
> hist(m$residuals,col="blue")
> TukeyHSD(aov(y~jal*Cemento))
  Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = y ~ jal * Cemento)

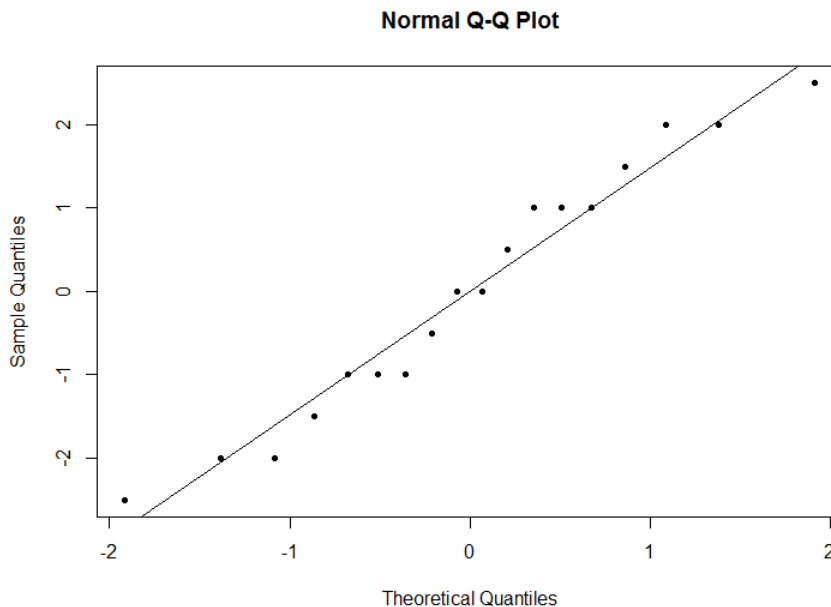
$jal
      diff      lwr      upr    p adj
Nuevo-Blanco  2 -1.377015  5.377015 0.2740693
Rojo-Blanco   -7 -10.377015 -3.622985 0.0006894
Rojo-Nuevo    -9 -12.377015 -5.622985 0.0001041

$Cemento
      diff      lwr      upr    p adj
x2-x1    12  8.622985 15.377015 0.0000102
x3-x1    10  6.622985 13.377015 0.0000452
x3-x2    -2 -5.377015  1.377015 0.2740693
```

Como se observa en la prueba Tukey existe diferencia en aplicar la prueba en los jales rojos ya que para los jales nuevos y blancos no existe diferencia al tener un p-value mayor de 0.05, y para las mezclas de cemento elaborados la que resulta diferente es la mezcla 1 ya que las mezclas 3 y 2 son iguales al tener un p-value mayor de 0.05.



Con la gráfica cuantil-cuantil de los residuales, se comprueba normalidad que existe en la prueba.



**Figura 7.7 Gráfica cuantil-cuantil de los residuales para comprobar normalidad en los datos experimentales de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo.**

### 7.3 Aprovechamiento

Con en el análisis anterior, comprobamos que el uso de cemento Portland para inmovilizar los desechos peligrosos se ha generalizado debido a su disponibilidad y versatilidad para tratar a este tipo de residuos. En particular, la inmovilización de metales pesados por estabilización/solidificación es un método eficaz para reducir su riesgo para el medio ambiente. La incorporación de los residuos en el sistema de cemento hidratado se lleva a cabo a través de diferentes mecanismos, y se puede realizar con diferentes tipos de matrices ya que en este estudio se ocuparon 3 diferentes tipos de matrices (jal-zeolitas-CPC, jal-arena-OPC, Jal-arena-CAC), siendo las más importantes aquellas que lograron fraguar correctamente.

Los monolitos resultantes de esta experimentación elaborados con las matrices jal-zeolitas-CPC, y jal-arena-OPC son aptos para un aprovechamiento en la construcción, ya que con estos se logra una encapsulación a los contaminantes estudiados en este caso Pb y As. Además de que la prueba de compresión simple



**PROPUESTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS METALÚRGICOS NO FERROSOS**



arrojó resultados positivos debido a que las probetas tienen una mayor resistencia que un bloque convencional, considerando este punto, el producto de este tratamiento puede ser utilizado en el ámbito de la construcción. Al ser una desventaja de la estabilización/solidificación el aumento de volumen, al momento de querer hacer uso de ella, esta característica puede ser todo lo contrario, debido a que en este estudio no existió algún lixiviado que superará los límites máximos permisibles y por sus características físico-mecánicas, se puede ocupar como relleno de los huecos de las excavaciones producto de la actividad minera, y poder volver a ocupar el área en algún otro tipo de actividad económica.





## Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones

Inicialmente en este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica de la normativa nacional así como de artículos específicos considerando los planes de manejo de este tipo de industrias, destacando las NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-147-SEMARNAT-2004 y la NOM-053-1993, ya que fueron base para comenzar a elaborar este trabajo de investigación, además con la estancia realizada en la Universidad de Navarra fue posible ampliar el conocimiento del tema y poder ocupar otro tipo de materiales para la elaboración de los monolitos.

Además, se caracterizaron las muestras provenientes de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua, mediante la prueba analítica de espectrofotometría de absorción atómica en el laboratorio de la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química, comprobando de esta manera que los elementos potencialmente tóxicos de este tipo de jales son el Pb y el As.

Posteriormente se formuló un diseño estadístico del experimento para la realización de pruebas con los monolitos obtenidos de las muestras las cuales fueron positivas para poder reaprovechar el residuo en este caso los jales, que sirve como materia prima para la elaboración de los monolitos.

Así mismo se realizó la solidificación/estabilización de los residuos peligrosos encontrados en las muestras provenientes de la mina La Prieta, Hidalgo del Parral, Chihuahua, en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, basándose en el diseño de experimentos formulado, sin embargo existe una limitación con respecto al tiempo de elaboración de esta prueba ya que se hicieron pocas repeticiones y no se puede observar con claridad el efecto que tienen los dos factores fijados en este caso la cantidad de cemento ocupado y el tipo de jal, pero es una buena aproximación en el uso de jales en la construcción, por lo que se recomienda continuar con este estudio realizando las repeticiones adecuadas. Cabe destacar se profundizó en el tema en la Universidad de Navarra y se comprobó que si las probetas no fraguan la estabilización/solidificación no funciona.

Por otro lado, al someterse a diferentes pruebas físicas, mecánicas, de lixiviación, así como de intemperismo acelerado a las estructuras monolíticas resultantes de la estabilización/solidificación, se encontró que esta técnica puede ser empleada para tratar este tipo de jales y así poder aprovechar el material resultante en el ámbito de la construcción o poder ser empleado en el sitio para poder reutilizarlo en alguna otra actividad económica



Finalmente se realizaron propuestas para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos considerando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Debido a que se llevaron a cabo diferentes pruebas para saber si el tratamiento era capaz en primer lugar retener al As y al Pb con las pruebas de intemperismo acelerado, NOM-053-SEMARNAT-1993 y la prueba de tanque. En ninguna de las pruebas anteriores los monolitos hechos con las matrices de jal-zeolita-CPC y jal-arena-OPC, presento un lixiviado que estuviera por encima de los límites máximos permisibles, por el contrario, en algunos lixiviados resultantes de estas pruebas, como el de la prueba de intemperismo el Pb no fue detectado, por lo que no existe algún riesgo en su uso en cuanto a estos dos metales se refiere. Y en segundo lugar los monolitos presentaron mejor resistencia a la compresión y además terminaron con un mejor acabado estético que un bloque convencional. Estas características hacen que los monolitos fabricados con jales mineros, que son residuos que contienen elementos potencialmente tóxicos, como materia prima, puedan ser reaprovechados ya sea para remediar pasivos ambientales que hayan sido minas o ser usados como material para construcción.

Se recomienda para estudios posteriores realizar pruebas con As y Pb en forma de reactivo analítico, para determinar con certeza hasta que concentraciones el tratamiento de solidificación/ estabilización puede ser utilizado y que las concentraciones de Pb y As en el lixiviado no sobrepasen los límites máximos permisibles, debido a que en este estudio solo fueron utilizados las muestras ambientales (jales) para aplicar el tratamiento.



## Referencias

**ASTM Standard C90**, Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2012, <http://dx.doi.org/10.1520/C0090-12> [www.astm.org](http://www.astm.org)

**Becerril, J. y Navarrete, M. E. 1993.** *Recopilación, palicación y valuación de las tecnologías de estabilización/solidificación para el tratamiento de residuos peligrosos.* México : CENAPRED, 1993.

**CONEVyT. 2014.** Clasificación y distribución de los climas en México. Antología. Unidad 4. Lectura 4.13. [En línea] Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo, 2014. [http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/cnaturales\\_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant\\_4\\_13.htm](http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/cnaturales_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant_4_13.htm).

**Cortinas, C. 2007.** Instituto Nacional de Ecología. *Instituto Nacional de Ecología.* [En línea] SEMARNAT, 27 de Agosto de 2007. [Citado el: 14 de octubre de 2014.] <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/155/cortinas.html>.

**Cortinas, C. 2014.** *Regulación de los residuos peligrosos en México.* México : SEMARNAT, 2014.

**Cortinas, Cristina. 2007.** *Regulación de los residuos peligrosos en México .* México : SEMARNAT, 2007.

**EA NEN 7375**, Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials, Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test, 2004.

**González, A. 2012.** *Inmovilización de sustancias a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales.* México : UNAM, 2012.

**Griffin, R. D. 2009.** *Principles of Hazardous Materials Managemen.* Michigan : CRC Press, 2009.

**Gutiérrez, M. E: y Moreno, Manuel. 2007.** Instituto Nacional de Ecología. *Instituto Nacional de Ecología.* [En línea] 5 de Noviembre de 2007. [Citado el: 14 de Octubre de 2014.] [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los\\_residuos.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los_residuos.html).

**INEGI. 2009.** *Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Hidalgo del Parral, Chihuahua.* México : INEGI, 2009.



**Kiang, Yen-Hsiung y Amir, A Metry. 1982.** *Environmental Managment*. Inglaterra : Ann Arbor, Mich. , 1982.

**Lasheras-Zubiate M., Navarro-Blasco I., Fernández J.M., Álvarez J.I., 2012** Encapsulation, solid-phase identification and leaching of toxic metals in cement systems modified by natural biodegradable polymers, *J. Hazard. Mater.* 233–234 (2012) 7–17.

**Mackenzie, L.D. y Cornwell, D. A. 2012.** *Introduction to Environmental Engineering*. New York : McGraw-Hill, 2012.

**Montgomery D.C. 1991.** “Diseño y análisis de experimentos”. Ed. Iberoamérica. México.

**Pojasek, B. R. 1982.** *Solidifacation as an ultimate Disposal Option for hazardous Wastes*. Massachusetts : Ann Arbor Science Publishers, 1982.

**PROFEPA. 2010.** Control de residuos peligrosos. [En línea] PPROFEPA, 2010. [Citado el: 22 de Octubre de 2014.] [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx.wap/control\\_de\\_residuos\\_peligrosos.h tml](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx.wap/control_de_residuos_peligrosos.h tml).

**R Core Team. 2015.** *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. 2015. <https://www.R-project.org/>

**Rich, G. 1987.** *Waste treatment technologies: the choice is yours*. England : Pollut Eng, 1987.

**Romero, F., y otros. 2008.** *Factores geológicos y climaticos que determinanla peligrosidady el impacto ambiental en jales mineros*. México : UNAM, 2008. págs. 43-54. 24.

**Romero, L. E., Vargas, C. y Padilla, B. 2007.** *Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/ solidificación de desechos peligrosos en costa rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición*. Venezuela : Universidad de los Andes Mérida, 2007.

**Sakurai, K. 1984.** *Tratamiento y disposición final de residuos peligrosos*. Washington : OMS, 1984.

**Sánchez, Daniel. 2014.** Alcaldes de río Sonora advierten que nuevo derrame es inminente. *Excelsior*. 25 de Septiembre de 2014.



**SEMARNAT. 2005.** *Promoción de la minimización y manejo integral de residuos peligrosos.* México : Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, 2005.

**SEMARNAT. 2008.** Residuos. [En línea] 2008. [Citado el: 25 de agosto de 2014.] [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen/08\\_residuos/cap8.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/08_residuos/cap8.html).

**SEMARNAT. 2008.** SEMARNAT. [En línea] SEMARNAT, 20 de 05 de 2008. [Citado el: 15 de 10 de 2014.] [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/00\\_intros/index.ht](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/00_intros/index.ht).

**Vázquez, Aquilino. 2004.** Insitituo Nacional de Ecología. [En línea] SEMARNAT, 1 de Octubre de 2004. [Citado el: 15 de 10 de 2014.] <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/444/cap5.html>.

**Volke, Tania. 2002.** *Tecnologías de remediación para suelos contaminados.* México : INECC, 2002.

**Walters, R.W. 1989.** *Toxic and hazardous wastes.* s.l. : Procedimientos de la 16ava conferencia de residuos peligrosos del atlántico, 1989.



## ANEXOS

ANEXO 1 Código de programación que se elaboró en el software R versión 3.2.3, para el análisis estadístico.

### ➤ Análisis estadístico de la concentración de As en la prueba PECT

```
#Experimento factorial 3x3
#con diseño completamente al azar arsenico PECT
Jal<- c(rep("Nuevo",6), rep("Blanco",6),rep("Rojo",6))
Cemento<- c(rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2),
rep("X3",2))
y<- c(16.84,20,8.95,6.32,14.21,0,23.16,16.84,12.11,2.11,11.05,23.68,12.63,27.37,8.95,23.16,20.53,33.68)
Jal<- as.factor(Jal)
Cemento <- as.factor(Cemento)
m <- lm(y ~ Jal*Cemento)
anova(m)
qqnorm(m$residuals,pch=20)
qqline(m$residuals)
```

### ➤ Análisis estadístico de la concentración de Pb en la prueba PECT

```
#Experimento factorial 3x3
#con diseño completamente al azar plomo PECT
Jal<- c(rep("Nuevo",6), rep("Blanco",6),rep("Rojo",6))
Cemento<- c(rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2),
rep("X3",2))
y<- c(1.73,0.21,1.22,0.21,1.42,0.21,0.62,1.12,0.21,0.82,0.21,1.53,0.41,0.41,0.11,0.72,0,0)
Jal<- as.factor(Jal)
Cemento <- as.factor(Cemento)
m <- lm(y ~ Jal*Cemento)
anova(m)
qqnorm(m$residuals,pch=20)
qqline(m$residuals)
```

### ➤ Análisis estadístico de la concentración de As en la prueba de intemperismo acelerado

```
#Experimento factorial 3x3
#con diseño completamente al azar AS intemperismo
Jal<- c(rep("Nuevo",6), rep("Blanco",6),rep("Rojo",6))
Cemento<- c(rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2),
rep("X3",2))
y<- c(2.21,0,1.3,0.5,1.91,0,0.8,0.5,0.8,0.65,0.8,0.5,0.65,0.95,0,0.35,0.2)
Jal<- as.factor(Jal)
Cemento <- as.factor(Cemento)
m <- lm(y ~ Jal*Cemento)
anova(m)
qqnorm(m$residuals,pch=20)
qqline(m$residuals)
```



➤ **Análisis estadístico de la prueba de compresión simple a los monolitos sin intemperismo**

```
#Experimento factorial 3x3
#con diseño completamente al azar
Jal<- c(rep("Nuevo",6), rep("Blanco",6),rep("Rojo",6))
Cemento<- c(rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2),
rep("X3",2))
y<- c(20,17,33,27,20,36,18,20,27,28,26,25,19,24,35,24,18,25)
Jal<- as.factor(Jal)
Cemento <- as.factor(Cemento)
m <- lm(y ~ Jal*Cemento)
anova(m)

qqnorm(m$residuals,pch=20)
qqline(m$residuals)
```

➤ **Análisis estadístico de la prueba de compresión simple a los monolitos con intemperismo**

```
#Experimento factorial 3x3
#con diseño completamente al azar con intemperismo
Jal<- c(rep("Nuevo",6), rep("Blanco",6),rep("Rojo",6))
Cemento<- c(rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2), rep("X3",2),rep("X1",2), rep("X2",2),
rep("X3",2))
y<- c(22,20,35,32,34,30,19,19,31,29,29,34,14,13,24,28,21,19)
Jal<- as.factor(Jal)
Cemento <- as.factor(Cemento)
m <- lm(y ~ Jal*Cemento)
anova(m)

qqnorm(m$residuals,pch=20)
qqline(m$residuals)
```