



Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

Evaluación de la composición química y concentración de metales tóxicos en la escoria de la Siderúrgica de Mexicali, B.C.

Tesis

Para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta

Jesús Antonio Jiménez Angulo

Directora de Tesis

Dra. M. Socorro Romero Hernández

Mexicali B.C. Diciembre de 2014

Resumen

En el presente trabajo se presentan los resultados de un estudio de caracterización fisicoquímica y la determinación de la toxicidad en escorias de acero procedente del horno de arco eléctrico acumuladas durante los años 2010-2012, en la Planta Siderúrgica de Mexicali, B.C. (México). El estudio se realizó en dos etapas: En la primera etapa se establecieron veinticinco puntos de muestreo de escoria, con profundidades de toma de muestra de 30 cm. En la segunda etapa de muestreo se establecieron cinco puntos de muestreo de escoria; cuatro a profundidades de 105 cm (se tomaron cuatro muestras del perfil para cada punto de muestreo) y uno de 210 cm de profundidad (En este punto se tomaron seis muestras a lo largo del perfil). A las muestras se les determinó el pH, densidad y concentración de los siguientes metales totales y extractables: Hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si), níquel (Ni), aluminio(Al), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y arsénico (As). De los resultados de los análisis de metales en muestras de escoria, se obtuvo la siguiente composición promedio de FeO 15.50 %, Fe₂O₃ 27.82 %, SiO₂ 20.47 %, CaO 18.16 %, MgO 10.16 %, Al₂O₃ 5.62 %, MnO 1.64 %, Cr₂O₃ 0.13 %, CuO 0.07 % y NiO 0.02 %. También se obtuvo una concentración total de Pb 49.5 ppm, Cr 19.73 ppm, Cd 0.96 ppm, Hg 0.016 ppm y As 0.33 ppm. Las concentraciones obtenidas de metales extractables fueron las siguientes: As <0.002 mg/l, Cd 0.35 mg/l, Cr <0.5 mg/l, Pb 0.3 mg/l y Hg <0.0025 mg/l. De los resultados del estudio, se puede concluir que la escoria de la PSDM tiene concentraciones de metales pesados extractables debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, determinando la escoria como residuo no peligroso, y que las propiedades físicas y químicas de la escoria son similares a las que indica la literatura.

Palabras clave: Escoria, residuo metalúrgico, horno de arco eléctrico, acero.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme guiado a lo largo de todo este tiempo, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes.

Un especial agradecimiento a la Dra. M. Socorro Romero Hernández, por la dirección de este trabajo, por su continuo apoyo brindado y su gran sentido de responsabilidad y profesionalismo. Gracias por brindarme los recursos necesarios para el desarrollo y culminación del proyecto de investigación.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UABC, por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Ingeniería y a la Dra. Gisela Montero Alpírez, directora de éste mismo instituto por todo su apoyo incondicional.

En particular agradezco al MyDCI y Conacyt por haber brindado todo su apoyo económico durante estos dos años.

Un agradecimiento a la Ingeniera Química Luz Estela Salazar Escalante por todo el apoyo brindado, por su gran calidad humana y por ser un soporte esencial para mí dentro del laboratorio de Química-Ambiental.

Agradezco al Instituto de Investigación en Ciencias Veterinarias de la UABC por el apoyo brindado. En especial al M.C. Miguel Vega y al M.C. José Meléndrez por su valioso apoyo y accesibilidad al laboratorio de éste instituto.

Agradezco especialmente a mi familia: A mi Madre Rosa María Angulo V., por su ejemplo de vida y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante. A mis hermanos Christian, Sheila y María Rosa por ser parte importante en mi vida y representar la unidad familiar. Gracias por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por llenar mi vida de bellos momentos.

Agradezco a Lourdes Ojeda Ibarra por haber sido una excelente compañera de tesis y amiga incondicional, por haberme tenido la paciencia necesaria y por motivarme a

seguir adelante en los momentos de desesperación y sobre todo por hacer de su familia, una familia para mí.

Agradezco a mi amigo Gabriel Jáuregui por su amistad y apoyo incondicional. Gracias por impulsarme a seguir adelante, por sus consejos y por la confianza que en mí depositó.

Un agradecimiento y reconocimiento a mis maestros del Instituto de Ingeniería de la UABC, por el conocimiento brindado, por su paciencia, entrega y dedicación.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos por creer en mí. Gracias por su compañerismo y amistad durante todo este tiempo.

Gracias a todas aquellas personas que me apoyaron y me reanimaron con sus palabras de aliento.

Por último y no por ello menos importante. Agradezco enormemente a la Planta Siderúrgica de Mexicali, en especial al Ingeniero Alejandro Villa, Director General de ésta compañía por todo el apoyo brindado, por las facilidades y por los permisos otorgados, ya que sin ello no hubiera sido posible.

Índice

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii

Capítulo I

Introducción

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación	6
1.4 Hipótesis	6
1.5 Objetivo general.....	6
1.5.1 Objetivos específicos.....	6

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Fabricación del acero.....	7
2.2 Hornos de fusión.....	7
2.2.1 Horno de hogar abierto (HHA).....	8
2.2.2 Horno de oxígeno básico (HOB)	9
2.2.3 Horno de arco eléctrico (HAE)	9
2.3 Proceso de fabricación de acero en un HAE.....	11
2.4 Residuos generados en un HAE	15
2.5 Escoria	16
2.6 Clasificación de la escoria.....	17
2.7 Tipos de escorias producidas en un HAE	18

2.7.1 Escoria negra.....	18
2.7.2 Escoria blanca.....	19
2.8 Política ambiental en México	20
2.8.1 Instrumentos de política ambiental	21
2.9 Marco jurídico administrativo para prevención y manejo integral de los residuos...22	
2.10 Criterios de clasificación de los residuos.....	24
2.11 Normatividad en materia de residuos.....	25
2.11.1 Normatividad para residuos peligrosos	26
2.11.2 Normatividad para residuos sólidos urbanos y de manejo especial	26
2.12 Niveles de competencia: federal, estatal y municipal en materia de residuos	27
2.13 Legislación ambiental del Estado de Baja California en materia de residuos.....	28
2.13.1 Instrumentos normativos.....	28
2.13.2 Instrumentos de planeación.....	28
2.14 Plan de manejo: Instrumento de política de gestión de residuos	29
2.14.1 Objetivos del plan de manejo	30
2.14.2 Criterios de determinación de un plan de manejo de residuos	30

Capítulo III

Metodología

3.1 Revisión bibliográfica	33
3.2 Ubicación del sitio de estudio	33
3.3 Muestreo	33
3.3.1 Plan de muestreo.....	33
3.3.2 Toma de muestra.....	34
3.3.3 Tratamiento de las muestras	34
3.4 Características físicas y químicas.....	34
3.4.1 Análisis de concentración de metales.....	34
3.4.2 Determinación de la composición de la escoria	35
3.4.3 Determinación de propiedades físicas en muestras de escoria	35
3.5 Determinación de compuestos extractables.....	35

3.6	Análisis estadístico de los datos	36
3.7	Comparativo de resultados con los límites máximos permisibles	36

Capítulo IV

Desarrollo experimental

4.1	Ubicación del sitio de estudio	37
4.2	Muestreo	39
4.2.1	Material y equipo utilizado para la toma de muestras	43
4.2.2	Ubicación de puntos de muestreo de la primera etapa	44
4.2.2.1	Muestreo primera etapa	47
4.2.3	Ubicación de puntos de muestreo de la segunda etapa.....	48
4.2.3.1	Muestreo segunda etapa.....	50
4.2.3	Identificación de las muestras.....	51
4.3	Tratamiento de muestras para su análisis de metal total y extractable	52
4.3.1	Digestión de muestras para determinación de metales totales	52
4.3.2	Tratamiento de muestras para determinación de sílice	53
4.3.3	Prueba de extracción de compuestos tóxicos (PECT) para la determinación de metales extractables.....	54
4.4	Análisis de laboratorio	55

Capítulo V

Resultados y discusión

5.1	Resultados de densidad y pH en escoria de HAE	56
5.2	Resultados de análisis de metal total en muestras de escoria de la primera etapa ...	57
5.2.1	Resultados calculados de la concentración de metales en forma de óxidos	61
5.3	Resultados de análisis de metales en muestras de escoria de la segunda etapa.....	63
5.3.1	Resultados calculados de la concentración de metales totales en forma de óxidos.....	73
5.4	Resultados de concentración de metales totales en tierra ferrosa	70

5.4.1	Análisis comparativo de concentración de metales totales en escoria con concentración de metales totales en tierra ferrosa	71
5.5	Resultados de concentración de metales totales en suelo	73
5.5.1	Análisis comparativo de concentración de metales pesados en suelo con los límites máximos permisibles (LMP)	73
5.6	Análisis comparativo de escoria HAE	74
5.6.1	Análisis comparativo de composición porcentual de escoria con otros estudios.....	80
5.6.2	Análisis comparativo de concentración de metales tóxicos en escoria de la PSDM.....	75
5.7	Resultados de concentración de metales de la prueba PECT	76
5.7.1	Análisis comparativo de concentración de metales pesados con límites máximos permisibles (LMP).....	76
5.8	Utilización de la escoria	78

Capítulo VI

Conclusiones

6.1	Recomendaciones.....	82
	Referencias bibliográficas	83

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la Planta Siderúrgica de Mexicali, B.C (INEGI, 2014).....	2
Figura 2. Escoria de la Planta Siderúrgica de Mexicali.....	3
Figura 3. Esquema de un horno de hogar abierto HHA (CATEDU, 2014).....	8
Figura 4. Esquema de un horno de oxígeno básico HOB (Landín, 2013).....	9
Figura 5. Esquema de un horno de arco eléctrico HAE (Rodríguez, 2012).....	10
Figura 6. Esquema siderúrgico de la PSDM (INE, 1994).....	14
Figura 7. Clasificación escorias según su origen (Amaral, 1999).....	17
Figura 8. Escoria negra de la PSDM.....	19
Figura 9. Escoria blanca de la PSDM.....	19
Figura 10. Procedimiento para determinar los sujetos obligados a la formulación de planes de manejo (PROY NOM 160 SEMARNAT, 2011).....	32
Figura 11. Imagen de la ubicación de la PSDM y sitio de muestreo (Google earth, 2008).....	37
Figura 12. Ubicación de sitio de almacenamiento de escoria (Google earth, 2012).....	38
Figura 13. Material y equipo de muestreo.....	44
Figura 14. Barrena Riverside (Proeti, 2014).....	44
Figura 15. Imagen aérea que muestra el trazado de retícula en el sitio de almacenamiento de escoria (Google earth, 2013).....	45
Figura 16. Puntos de muestreo en el sitio de almacenamiento de escoria de la primera etapa (Google earth, 2013).....	46
Figura 17. Trazado de retícula para muestreo.....	46
Figura 18. Ubicación de punto de muestreo.....	46
Figura 19. Toma de muestra de escoria.....	47

Figura 20. Puntos de muestreo en el sitio de almacenamiento de escoria de la segunda etapa (Google earth, 2013).....	49
Figura 21. Imagen aérea de puntos de muestreo de tierra ferrosa (Google earth, 2013).....	49
Figura 22. Residuo denominado “tierra ferrosa”	50
Figura 23. Muestras de escoria y suelo.....	51
Figura 24. Molienda y tamizado de escoria.....	52
Figura 25. Digestión ácida de escoria.....	52
Figura 26. Tratamiento final.....	52
Figura 27. Escoria y fundente sometidos a calentamiento.....	53
Figura 28. Escoria y fundente completamente líquidos.....	53
Figura 29. Tratamiento final.....	53
Figura 30. Agitador rotatorio PECT.....	54
Figura 31. Agitador rotatorio (24h).....	54
Figura 32. Tratamiento final.....	54
Figura 33. Resultados de concentración promedio de metales total en escoria HAE (primera etapa).....	59
Figura 34. Resultados de concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE (primera etapa).....	60
Figura 35. Resultados de concentración porcentual de óxidos metálicos en escoria (primera etapa).....	63
Figura 36. Concentración promedio de metales total en escoria HAE (segunda etapa)...	66
Figura 37. Concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE (segunda etapa).....	66
Figura 38. Resultados de concentración porcentual de óxidos metálicos en escoria (segunda etapa).....	69

Figura 39. Concentración promedio de metal total en escoria HAE y tierra ferrosa.....72

Figura 40. Concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE y tierra ferrosa.....72

Lista de tablas

Tabla 1. Producción anual de acero en la PSDM (Datos otorgados por PSDM).....	4
Tabla 2. Residuos generados por la producción de acero de un HAE (INE, 1994).....	15
Tabla 3. Nivel de competencia de los tres órdenes de gobierno en materia de residuos (PNPGIR, 2008).....	27
Tabla 4. Metales analizados a muestras de escoria en el laboratorio.....	34
Tabla 5. Determinación de propiedades físicas en muestras de escoria.....	35
Tabla 6. Tipo de muestras tomadas, método de muestreo y de análisis químico.....	40
Tabla 7. Coordenadas de los sitios de muestreo de la primera etapa del estudio.....	41
Tabla 8. Coordenadas de los sitios de muestreo de la segunda etapa del estudio.....	42
Tabla 9. Propiedades físicas de la escoria de HAE obtenidas de diferentes fuentes y datos de este estudio.....	56
Tabla 10. Resultados de concentración promedio de 3 réplicas de cada muestra de escoria.....	58
Tabla 11. Resultados de composición porcentual de la escoria (primera etapa).....	62
Tabla 12. Resultados de concentración promedio de metales totales de tres réplicas de cada muestra para escoria a diferentes profundidades.....	63
Tabla 13. Resultados de composición porcentual de la escoria (segunda etapa).....	68
Tabla 14. Resultados de concentración de metales totales en tierra ferrosa.....	70
Tabla 15. Comparativo de resultados de concentración de metales totales en escoria y tierra ferrosa.....	71
Tabla 16. Resultados de concentración promedio de metales totales de tres réplicas en muestras de suelo.....	73
Tabla 17. Comparativo de resultados de concentración de metales totales en suelo con los límites máximos permisibles (LMP).....	74
Tabla 18. Composición porcentual de escoria de la PSDM y resultados de otros estudios.....	75

Tabla 19. Resultados de concentración promedio de metales totales en escoria de la primera y segunda etapa.....	76
Tabla 20. Resultados de pruebas de lixiviación de escoria de HAE de diferentes fuentes y datos del estudio.....	77

Capítulo I

Introducción

1.1 Antecedentes

La siderurgia es la tecnología desarrollada para la producción del hierro y sus aleaciones, en especial las que contienen un pequeño porcentaje de carbono, que constituyen los diferentes tipos de acero (INE, 1994). El acero es el resultado de adicionar al hierro trazas de carbón, así como diversos microaleantes para obtener propiedades mecánicas y de resistencia química específica (Solórzano, 2008).

Actualmente la producción moderna de acero emplea hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. Desde la década de 1960 existen mini-hornos que emplean electricidad para producir acero a partir del material de chatarra, señala la American Society for Testing and Materials (ASTM) por sus siglas en inglés. La industria del acero genera una gran cantidad de residuos que se producen durante los procesos de fusión y enfriamiento. Este subproducto del proceso de fabricación del acero es más conocido como escoria siderúrgica (Cañas, 2012). Es importante tener en cuenta que cualquier proceso siderúrgico puede generar escoria peligrosa como subproducto de las operaciones de fusión, debido a que en su composición puede contener concentraciones significativas de metales tóxicos tales como; plomo, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, entre otros.

En 1969 un grupo de familias jaliscienses iniciaron operaciones en el campo del acero formando la Compañía Siderúrgica de Guadalajara, S.A. de C.V. En 1990, esta compañía consolidó sus operaciones industriales en una empresa independiente llamada Grupo Simec, el cual está conformado por seis acerías en México y ocho en Estados Unidos. Entre las seis acerías instaladas en México se encuentra la “Compañía Siderúrgica de California, S.A. de C.V.”, que está instalada en el valle de Mexicali, B.C., desde el año 1993. El Grupo Simec cuenta con cuatro procesadoras de chatarra en

México y es el mayor productor de perfiles estructurales de acero en el país. Todas estas acereras fabrican el 100 % de su acero con chatarra (material metálico reciclado proveniente de automóviles, electrodomésticos, contenedores y residuos metálicos de otros procesos), aunque tienen la infraestructura para producir acero a partir del mineral de hierro (Grupo Simec, 2012). La Planta Siderúrgica de Mexicali (PSDM), se localiza en el valle de la ciudad de Mexicali, B.C., sobre la carretera Baja California 2 (ver Figura 1). Tiene una capacidad instalada de 400,000 toneladas al año de acería y 220,000 toneladas de laminación o producto terminado. Los residuos de escoria se disponen en un predio de 9 hectáreas de superficie, aledaño a la PSDM, que la compañía adquirió para este propósito.

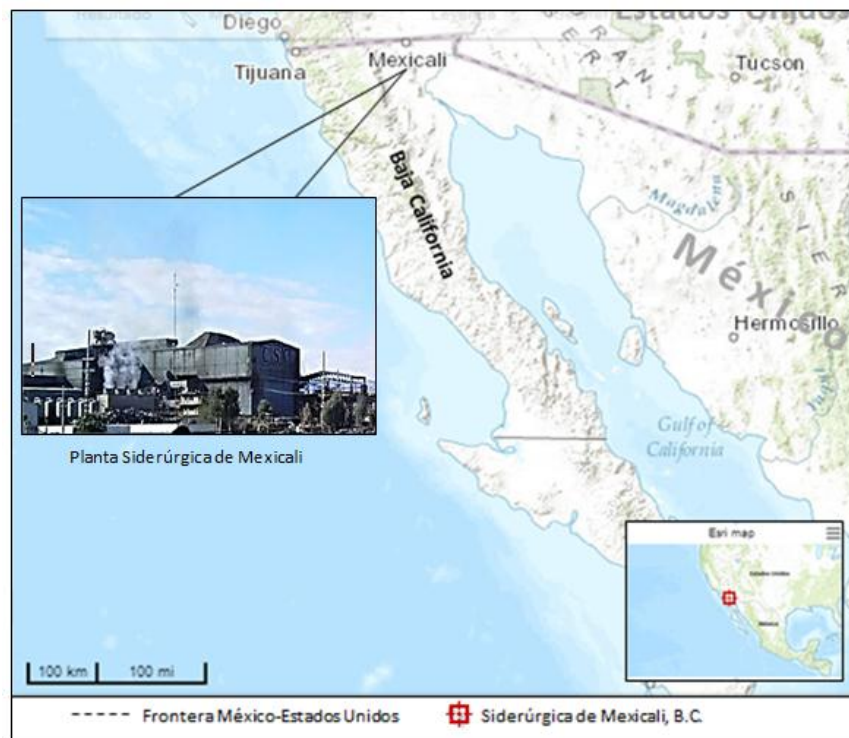


Figura 1. Ubicación de la Planta Siderúrgica de Mexicali, B.C

Fuente: INEGI, 2014

La industria del acero es una de las más desarrolladas por la gran diversidad de usos que tienen sus productos, pero al mismo tiempo, genera una variedad importante de corrientes residuales (Valdés *et al*, 2001). Como resultado de este proceso siderúrgico

se generan aguas residuales, emisiones contaminantes a la atmósfera y residuos sólidos. En este último se encuentra integrada la escoria como residuo.

En un proceso siderúrgico, la escoria se define como un residuo sobrenadante en el baño de acero, su baja densidad en comparación con el baño de acero facilita la separación para su posterior enfriamiento (sólido poroso de color gris oscuro) como se muestra en la Figura 2. De acuerdo con la ASTM, la escoria está constituida principalmente por silicatos de calcio y ferritas; combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio, manganeso, calcio y magnesio. Además de remanentes de otros elementos químicos que son agregados al horno durante el proceso de fusión y refinado del acero.



Figura 2. Escoria de la Planta Siderúrgica de Mexicali

La escoria cumple funciones esenciales en los procesos de fusión del acero como; protección del metal, aislamiento térmico, mejora la eficiencia energética, ayuda a eliminar inclusiones y proteger el refractario o crisol (Oliver, 2011). Esto procesos permiten tener buenos niveles de escoria espumosa en el baño de acero, sin embargo el exceso en los niveles de generación de este residuo en su fase sólida, es un problema sobre el cual se ha estado trabajando desde hace algunos años.

1.2 Planteamiento del problema

La escoria es un residuo formado en el baño de acero y retirada durante el proceso de fusión de la chatarra metálica. Por cada tonelada de acero producido se generan entre 100 y 120 kg de escoria (Baptista *et al* 2011). En México el volumen de generación de escoria de un Horno de Arco Eléctrico (HAE) se encuentra entre 100 y 250 kg/t de acero (CANACERO, 2006).

La PSDM cuenta con un espacio abierto dentro de sus instalaciones donde se almacena temporalmente la escoria como subproducto del proceso de la aceración. A la escoria generada se le realiza un cribado para separar parte del material no fundido, reintegrándola al proceso y finalmente se disponen en un predio anexo a las instalaciones de la planta.

En la Tabla 1 se muestra la producción anual de acero para los años de 2010 a 2012:

Tabla 1. Producción anual de acero en la PSDM

AÑO	TONELADAS DE ACERO
2010	207,000
2011	257,000
2012	236,000

Fuente: Datos otorgados por PSDM

En base a la producción de acero en la PSDM, se estimó una generación promedio anual de 25,500 toneladas de escoria (considerando que se generan 120 kg de escoria por cada tonelada de acero producido).

Uno de los problemas que enfrenta la empresa es la generación de grandes volúmenes de escoria y el predio donde se almacena no cuenta con cerco perimetral y se encuentra a cielo abierto, lo que puede ocasionar erosión y arrastre hacia otros lugares. Esto puede representar un riesgo de salud pública ya que la escoria contiene metales tóxicos como plomo, cromo, cadmio, cobre, níquel y zinc entre otros. De un estudio realizado en España, se concluyó que hay problemas de salud en la población

relacionados con el contenido de metales tóxicos presentes en la escoria de plantas metalúrgicas, a consecuencia de la acumulación de escoria y exposición directa de la población con este tipo de residuo (Kellner, 2010). Existe preocupación en el mundo, sobre como la acumulación de los metales aumenta los riesgos directos e indirectos para los seres humanos, ya que producen efectos tóxicos como el neurológico, insuficiencia hepática, cáncer o trastornos renales (García *et al*, 2010).

La preocupación por preservar los recursos naturales, controlar la contaminación ambiental y proteger la salud de la población, impulsó a países productores de acero como Brasil, España, Argentina, Chile y EE.UU, a buscar alternativas para un manejo seguro de la escoria. En la revisión de la literatura (estado del arte) se han encontrado estudios referentes a la valorización de la escoria y evaluación para la incorporación de este residuo a otros procesos como agregados de cementos con escoria (Carrasco, 2007; Castellano, 2009), elaboración de vitro-cerámica (Bellini, 2002; Della, 2005), bases y sub-bases granulares de escoria en construcción de caminos y carreteras (Puertas, 1993; Reyes, 2003), así como relleno de vertederos y minas (Renzi, 2005).

En México son pocos los estudios que se han realizado en este ámbito. Durante el 2003, la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) conjuntamente con la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO), establecieron un convenio de compromisos y políticas ambientales para impulsar el aprovechamiento de materiales y reducción de costos dentro de los procesos susceptibles de utilizar las escorias. Actualmente, es necesario seguir impulsando este tipo de acciones encaminadas a la preservación de nuestros recursos naturales y el cuidado del medio ambiente (CANACERO, 2006).

1.3 Justificación

Con el desarrollo de la presente investigación se tendrán los siguientes beneficios:

1. La PSDM contará con una caracterización completa de la escoria que se genera en el proceso de acería.
2. Se contará con información básica de concentración de metales en la escoria y la evaluación del nivel de peligrosidad de este residuo.
3. Se harán propuestas de alternativas para el manejo seguro de la escoria para proteger el medio ambiente y la salud pública.

1.4 Hipótesis

La escoria representa un riesgo de contaminación ambiental y para la salud de la población por el contenido de metales tóxicos.

1.5 Objetivo general

Determinar la composición de la escoria y evaluar el nivel de peligrosidad en base a la normatividad vigente en materia de residuos peligrosos.

1.5.1 Objetivos específicos

- Obtener una caracterización físico-química de la escoria de la Planta Siderúrgica de Mexicali, B.C.
- Determinar las concentraciones de metales tóxicos presentes en la escoria siderúrgica.
- Elaborar propuestas alternativas para el manejo adecuado de la escoria.

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Fabricación del acero

Los procesos de fundición del hierro y del acero han evolucionado conforme al avance tecnológico, por lo que existen diversos tratamientos para su producción. Sin embargo, las diferentes variedades de producción de hierro, aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta aleación y otras aleaciones férricas, también determinan variaciones en los tratamientos y en las técnicas, propiciando la formación de escorias siderúrgicas con diferente composición, características y propiedades distintas.

El acero se obtiene a partir de dos materias primas que son: el **arrabio**; denominado comúnmente al material que se obtiene del proceso de extracción mineral del hierro mediante altos hornos, y chatarra férrica. Dentro de los procesos de obtención de acero a partir de chatarra férrica se conocen tres tipos de hornos de fusión.

2.2 Hornos de fusión

Los hornos de fusión son herramientas que el hombre ha diseñado para facilitar la obtención de los metales y dependiendo de las condiciones del proceso o técnica operación éstos pueden tener pequeñas variaciones. Los materiales a partir de los cuales se obtiene el acero colado son chatarra, arrabio y ferroaleaciones.

Un horno de fusión es un reactor o recipiente en el cual se eleva la temperatura, necesaria para lograr fundir y hacer líquido el mineral de hierro o chatarra (metal reciclado). En México y en el resto del mundo se emplean tres procesos de fabricación de acero, que se distinguen según el tipo de horno utilizado; el horno de hogar abierto, el

horno de oxígeno básico y el HAE. Estos dos últimos son los más utilizados actualmente (Hernández, 2007).

2.2.1 Horno de hogar abierto (HHA)

Este tipo de horno también se conoce como Siemens-Martin. Se asemeja un horno enorme y se le denomina de hogar abierto porque contiene en el fondo una especie de piscina larga y poco profunda (6 m de ancho por 15 m de largo y 1 m de profundidad). El horno se carga de 30 a 40 % con chatarra y piedra caliza. Emplea aire precalentado, combustible líquido y gas para la combustión (Padilla, 2007). Los hornos de hogar abierto se han dejado de utilizar por su baja eficiencia debida a que en éstos se inyecta aire en lugar de oxígeno (ver Figura 3).

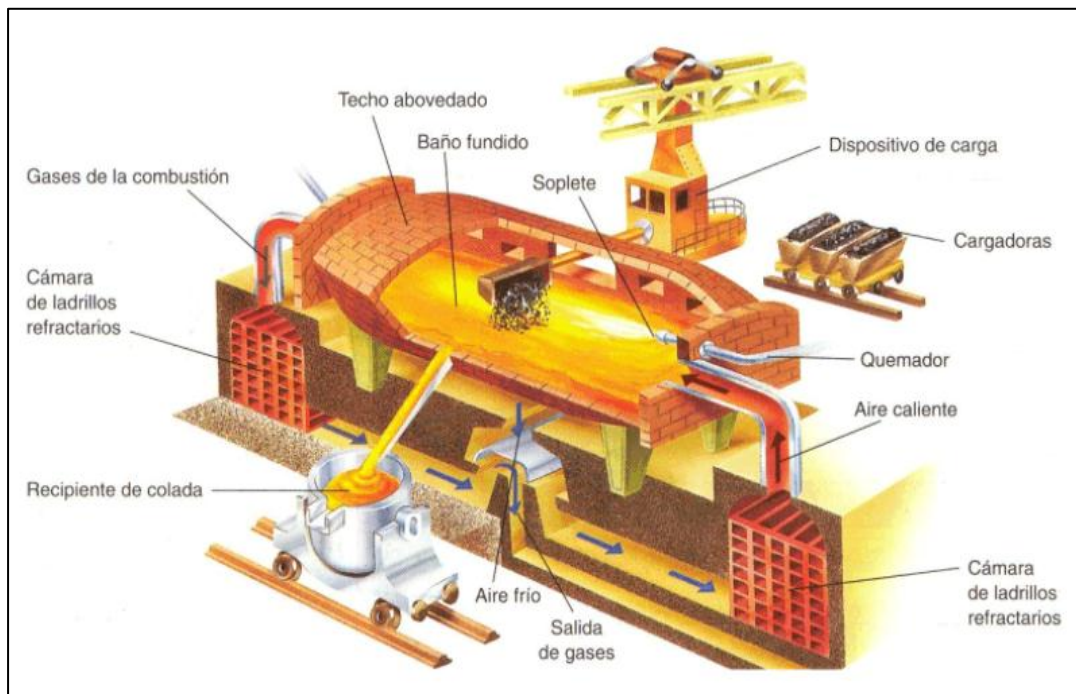


Figura 3. Esquema de un horno de hogar abierto HHA
Fuente: CATEDU, 2014

2.2.2 Horno de oxígeno básico (HOB)

Es un horno en forma de pera que produce 300 toneladas de acero en un tiempo de 45 minutos aproximadamente. El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con chatarra de acero (25 %) y hierro derretido. Se caracteriza principalmente porque en estos hornos se inyecta oxígeno a alta velocidad mediante un tubo refrigerado para acelerar la fusión de los materiales dentro del horno (Padilla, 2007), como se muestra en la Figura 4.

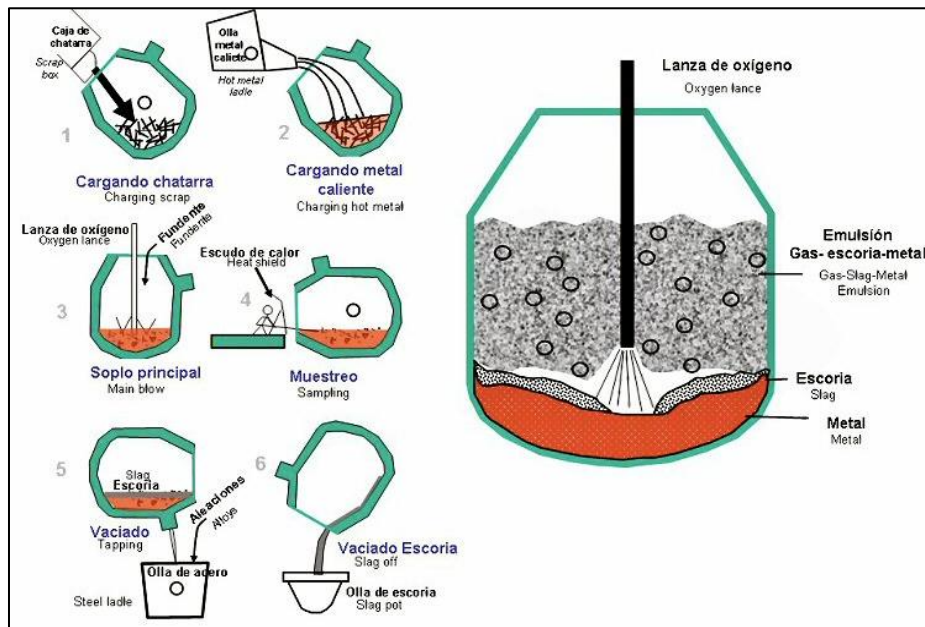


Figura 4. Esquema de un horno de oxígeno básico HOB

Fuente: Landín, 2013

2.2.3 Horno de arco eléctrico (HAE)

El HAE consiste en un crisol o cuerpo de placa de acero forrado con material refractario con un espesor de 15 a 30 milímetros. Estos hornos funcionan con tres electrodos de grafito sostenidos por un soporte móvil, lo que permite que sean bajados e izados para controlar el arco eléctrico. Después de que el horno se encuentra cargado con la chatarra, el proceso de fusión inicia bajando los electrodos hasta establecer arcos eléctricos con la chatarra metálica. El calor generado por los tres arcos eléctricos provee

la energía necesaria para la fundición del metal como se muestra en la Figura 5 (Issouribehere, 2007; González, 2011).

El crisol de un HAE está constituido por ladrillo y material refractario sobre el cual se asienta la cuba; éste es un sistema de paneles metálicos por las cual se hace circular agua para enfriamiento. Así mismo, la bóveda también consta de una serie de estos paneles metálicos de enfriamiento. Sin embargo, la bóveda constituye parte del sistema móvil de los electrodos de grafito, permitiendo la apertura y cierre durante la carga de chatarra y materiales desoxidantes en el proceso de aceración.

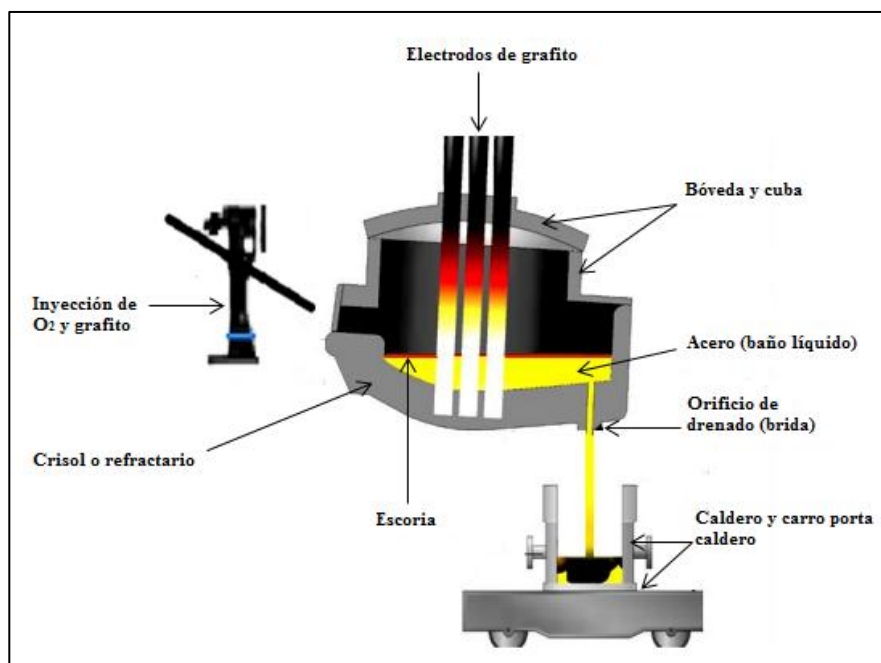


Figura 5. Esquema de un horno de arco eléctrico (HAE)

Fuente: Rodríguez, 2012

La utilización de esta forma de fundir y realizar aleaciones de metales es sin duda una de las maneras más eficientes desde el punto de vista energético, pero su sencillez se transforma en la más perjudicial para el sistema eléctrico del cual se alimenta (Casaravilla, 2000). Debido a que su modelo está basado en realizar un corto circuito trifásico sumamente desbalanceado.

Los HAE no emplean combustible alguno por lo que se obtienen aceros más limpios y con bajas impurezas. Estos proporcionan altas temperaturas hasta 1930 °C y pueden controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión (Chiquito, 2009).

2.3 Proceso de fabricación de acero en un HAE

El proceso de fabricación de acero de un HAE tiene la siguiente secuencia de operaciones:

1. **Carga de chatarra** por la parte superior del horno, después de la apertura de la bóveda del techo. La chatarra se transporta hasta el horno en “cestas u ollas” que permiten su apertura por la parte inferior de las mismas (Martín, 2003). La chatarra es previamente seleccionada y pesada en cada cesta.
2. La **fase de fusión** inicia una vez introducida la chatarra en el horno junto con los agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal y grafito). Se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta una distancia apropiada. Posteriormente, se induce corriente eléctrica a través de 3 electrodos de grafito, los cuales generan un arco eléctrico entre éstos y la chatarra. El calor producido es el que fusiona el metal (el proceso se repite hasta completar la capacidad del horno). La fase de fusión incluye una serie de etapas como la oxidación dirigida a eliminar impurezas de manganeso y silicio; la defosforación y la formación de escoria espumante (esta escoria se conoce como *escoria negra* u *oxidante*), donde se acumulan todas las impurezas debido a la inyección constante de oxígeno puro. Cuando se tiene todo el material completamente líquido, éste se calienta hasta 1600 °C para vaciar el acero hacia un crisol o caldero en el cual se efectuará la siguiente fase del proceso (Solórzano, 2003; Hernández, 2007; González, 2011). La fase de fusión incluye una pequeña sub-fase de afino que va de 10 a 15 minutos antes de vaciar el acero. Esta incluye la desoxidación, que permite eliminar los

óxidos del baño de acero, la desulfuración y descarbonización del acero (Ministerio de Fomento, 2011).

- 3. La fase de afino** se lleva a cabo cuando el acero líquido en el caldero es trasladado a una estación de trabajo (horno de afino). Aquí el acero se sigue calentando con electricidad por medio de tres electrodos más pequeños y se adicionan los materiales (ferroaleaciones) que dan la composición química específica al acero. El acero líquido se homogeniza mediante un burbujeo constante de inyección de argón o nitrógeno, por la parte inferior del caldero. Finalmente, se cubre con una *escoria reductora* formada por tres partes; cal, espato-flúor y coque o grafito (Solórzano, 2003; Hernández, 2007; González, 2012).
- 4. Colado del acero.** Cuando la composición química del acero y su temperatura se encuentra en los rangos deseados, el caldero es enviado a la máquina de colada continua para su solidificación (ver Figura 6). La máquina de colada continua es un mecanismo de transformación del acero líquido a moldeado sólido (lingoteras), mediante enfriamiento con agua (Martín, 2003; Solórzano, 2003).

La totalidad de la producción de acero de la PSDM se lleva a cabo mediante HAE, tanto en su fase de fusión como en la fase de refinado del acero. Por tal motivo, la presente investigación está centrada en la escoria generada por este tipo de hornos de fusión (ver figura 5). Esta ruta de producción de acero tiene varias ventajas sobre el alto horno y el horno convencional. Estos son principalmente: el costo de capital bajo y requerimiento de energía menor por tonelada de acero (Sarkar, 2010).

En la Figura 6 se muestra un esquema general del proceso siderúrgico de la PSDM; el punto 1 indica el área de carga y descarga de chatarra metálica. En esta área, la chatarra es transportada mediante una cesta u olla manipulada a través de una grúa viajera. Posteriormente la chatarra metálica se descarga dentro del HAE (punto 2), este proceso se realiza de manera continua hasta completar la carga total del horno.

En general un HAE se usa preferentemente para procesar chatarra. El calor requerido para la fusión del metal se logra mediante la formación de un arco eléctrico entre la masa metálica y los electrodos de grafito (INE, 1994). En este la carga metálica se fusiona a una temperatura de 1600 °C. Durante el proceso de fusión del metal se realizan adiciones de grafito y oxígeno mediante un manipulador para acelerar la reacción dentro del horno eléctrico, así mismo, se adicionan otros materiales desoxidantes para proteger el crisol o refractario del HAE. Este proceso se muestra en el punto 3.

El punto 6 ilustra la descarga de escoria, la cual es retirada en el transcurso del proceso de fusión del metal. Cuando el acero está completamente líquido a la temperatura óptima de fusión (más de 1600 °C), éste es descargado a un caldero que actúa como un horno cuchara u horno de afino (punto 8). Este es un segundo horno eléctrico donde se conserva la temperatura y se ajusta la composición química específica del acero que se desea producir mediante la adición materiales microaleantes.

Una vez que el acero tiene la composición química específica, el caldero con el acero líquido es llevado a la torreta del sistema de Máquina de Colada Continua MCC (punto 9). En este paso el acero líquido fluye a través de un sistema mecánico con canales de conducción hacia los moldes y cama de enfriamiento del billet; denominación otorgada a la “moldura del acero” colado.

La PSDM consta de un área destinada para el almacenamiento del billet, ya sea para venta en forma de barras de acero o para el posterior procesamiento del billet a producto terminado como; varilla, solera, ángulo, redondo y otras estructuras sólidas.

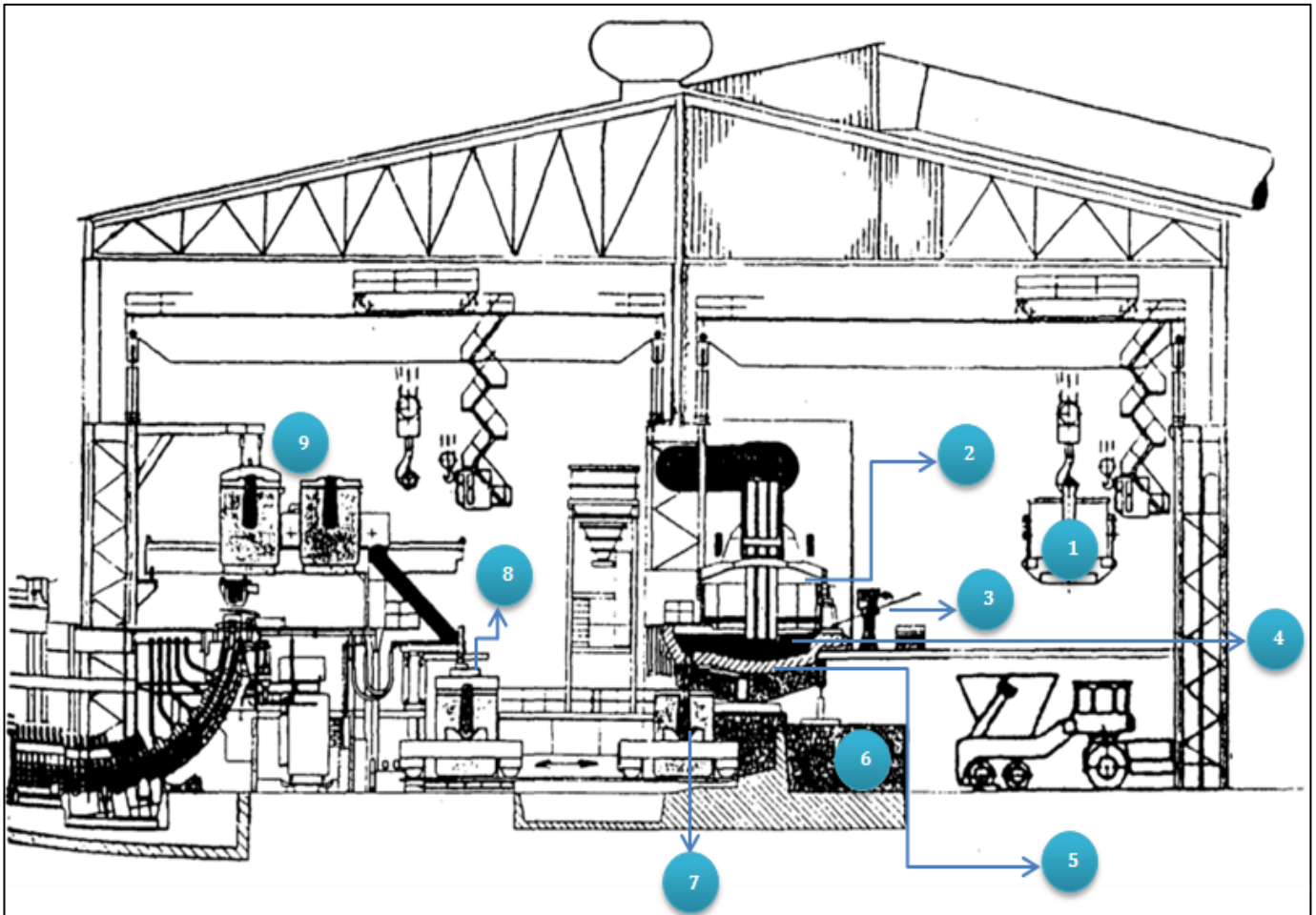


Figura 6. Esquema siderúrgico de la PSDM

FUENTE: Instituto Nacional de Ecología (INE), 1994.

- | | |
|---|--|
| 1. Carga de chatarra (cesta u olla) | 6. Descarga de escoria (escoriadero) |
| 2. Horno de arco eléctrico (HAE) | 7. Descarga de acero (caldero y carro porta caldero) |
| 3. Manipulador (inyección de O ₂ y carbón) | 8. Horno de afinado (horno cuchara) |
| 4. Acero líquido | 9. Máquina de colada continua MCC |
| 5. Refractario o crisol | |

2.4 Residuos generados en un HAE

Durante el proceso de fusión de acero en un HAE se generan subproductos o residuos. La Tabla 2, presenta una clasificación residuos con resultados obtenidos de un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología en varias plantas siderúrgicas en México.

Tabla 2. Residuos generados por la producción de acero de un HAE

EMISIONES A LA ATMÓSFERA	
Sin inyección de oxígeno:	
Partículas	4.6 kg/t
Monóxido de carbono (CO)	9.0 kg/t
HF gaseoso	0.006 kg/t
Partículas de CaF ₂	0.119 kg/t
Con inyección de oxígeno:	
Partículas	5.5 kg/t
Monóxido de carbono (CO)	9.0 kg/t
HF gaseoso	0.006 kg/t
Partículas de CaF ₂	0.119 kg/t
AGUAS RESIDUALES	
Flujo (sistema de lavado de gases)	0.80 m ³ /t
Sólidos en suspensión	4.93 kg/t
Zinc	1.58 kg/t
Fluoruros	0.013 kg/t
RESIDUOS SÓLIDOS	
Escoria	120-150 kg/t
Composición	(%)
FeO	10 - 30
CaO	30 - 60
MgO	5 - 10
MnO	4 - 8
P ₂ O ₅	1 - 5
Al ₂ O ₃	1 - 3
Lodos	8.7 kg/t
Polvo	12.8 kg/t
Arenas usadas	780.0 kg/t

Fuente: (INE, 1994)

La Tabla 2, presenta una variación respecto a la emisión de partículas a la atmósfera. Esta variación se debe a que durante el proceso de fusión, la inyección de oxígeno puede ser constante o por lapsos de tiempo de operación del HAE. Además, se debe tomar en cuenta que la fusión no es continua, si no que se lleva a cabo en varias

etapas durante las cuales se carga chatarra. Los gases y partículas volátiles son capturadas por medio de un sistema colector o más conocido como “campana de extracción”. Por otra parte, el HAE consta de una estructura metálica montada en la parte superior del crisol o refractario, llamada cuba y bóveda. Esta estructura consta de una serie de paneles refrigerados por los cuales circula agua, necesaria para mantener la temperatura del HAE. El agua que sale del proceso es enviada para su tratamiento a una planta de tratamiento de aguas residuales (separación de residuos), para posteriormente ser incorporadas nuevamente al proceso de aceración.

Entre los residuos sólidos originados en la producción de acero se encuentra: la escoria que se genera durante la fase de fusión y afinado del acero; los lodos producidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Algunos polvos provenientes de materias primas (ferroaleaciones, cal, grafito) así como también, residuos sólidos provenientes de algunas arenas usadas (arena de cromita y olivina). La cantidad lodos generados en los procesos de aceración es baja en comparación con la generada en otros procesos; la mayoría de lodos provienen del proceso de laminado y enfriamiento del acero más que del propio HAE. Como se puede apreciar en la Tabla 2, la composición química de la escoria es en forma de óxidos.

2.5 Escoria

Escoria es el nombre al material fundido formado por las reacciones química entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal (Berridi, 2008). Este tipo de residuo se encuentra sobrenadando en el baño del acero debido a que tiene menor densidad que el acero fundido durante el proceso de fusión, además sirve como aislante térmico durante el proceso de obtención del acero. Los diversos tipos de escorias tienen funciones metalúrgicas semejantes como la señalada anteriormente, sin embargo, varía de manera significativa en sus propiedades físicas y químicas. Esta variación dependerá del proceso

metalúrgico de obtención de los metales como el hierro, níquel, cromo, cobre, entre otros.

2.6 Clasificación de la escoria

Los procesos de obtención de acero en la actualidad han llevado a estudios relevantes para el empleo de hornos de fusión más eficientes que permitan optimizar y mejorar los procesos de obtención del metal. Por esta razón hay distintos tipos de reactores químicos y de hornos de fusión los cuales se distinguen por sus características peculiares, dando origen a diferentes tipos de escoria, las cuales se han clasificado según su procedencia. En la Figura 7 se describen los distintos tipos de procesos de fusión del metal de hierro y acero para los cuales se ha realizado una clasificación de escoria, correspondiente a su proceso de generación.

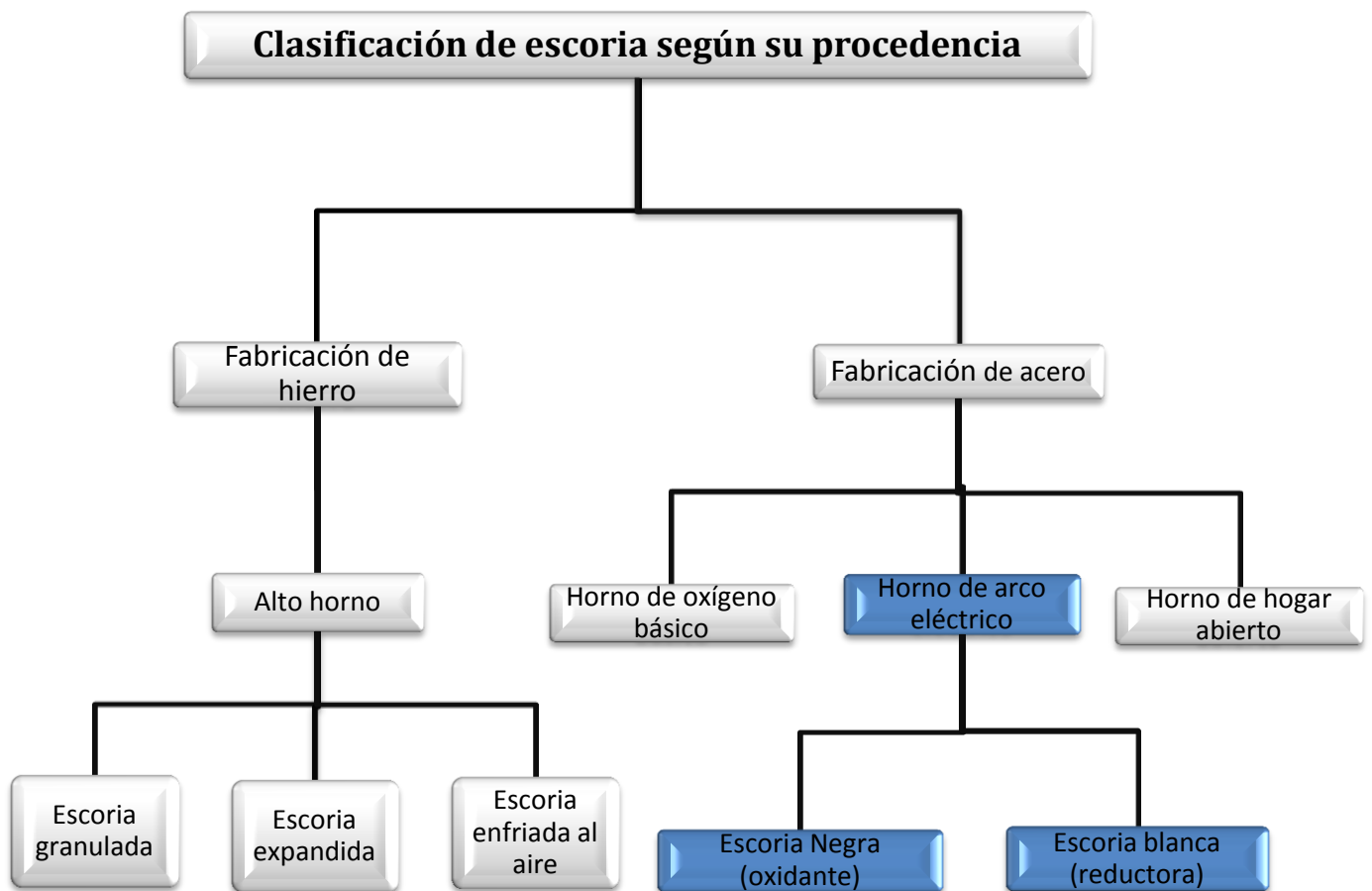


Figura 7. Clasificación escorias según su origen

Fuente: Amaral, 1999

De acuerdo con Amaral (1999), las escorias de acería en general son enfriadas al aire libre. Sin embargo, en la actualidad algunos estudios se han centrado en la formación de escoria con fase vítrea (Bellini, 2002). Este tipo de escoria se genera a partir de un cambio brusco de temperatura con agua como medio de enfriamiento, donde los compuestos presentes en la escoria forman una fase cristalina dentro de la misma estructura de este residuo.

2.7 Tipos de escorias producidas en un HAE

Las escorias generadas en la producción de acero mediante un HAE son, en su mayoría, de dos tipos: Escorias negras y blancas. También llamadas oxidantes y reductoras respectivamente. Esta nomenclatura se debe a dos fases del proceso de aceración: fusión (oxidación) y afino (reducción), (Amaral, 1999) citado en (Boza, 2011). Las escorias de acería eléctrica presentan naturaleza expansiva debido a su contenido de CaO y MgO libres contenidos dentro de la escoria (Rohde, 2002).

2.7.1 Escoria negra

Esta escoria también conocida como oxidante, tiene color gris oscuro, aspecto poroso, morfología irregular, cúbica y de fractura puntiaguda (González, 2011), como se presenta en la Figura 8. Este residuo sobrenadante en el baño del acero se extrae por una de las puertas del horno; puerta de descarga de acero y puerta de inyección de oxígeno. La extracción de la escoria se realiza por esta última. La composición química de este residuo está condicionada por el tipo de chatarra utilizada y el control de las variables de operación (Ministerio de Fomento, 2011).



Figura 8. Escoria negra de la PSDM

2.7.2 Escoria blanca

La escoria blanca se produce en la fase de afino, es de color blanquecino, polvoriento y se desbarata al tocarla (ver Figura 9). También se caracteriza por su reducido tamaño de partículas y el contenido de metales pesados como cromo, zinc o plomo (inferior al 1 %) (Ministerio de Fomento, 2011). Como este residuo se produce posteriormente al proceso de fusión, puede contener impurezas de escoria negra que se hayan movilizado con el vertido del acero del horno de fusión al caldero.



Figura 9. Escoria blanca de la PSDM

2.8 Política ambiental en México

En México la Política Ambiental tomó gran impulso a partir de 1970. Desde esa fecha hasta 1984, los instrumentos con los cuales contaba el Estado eran:

1) En el plano legal, la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental de 1971 y 2) En el aspecto de la gestión, un órgano de la administración que varias veces cambió de nombre y de ubicación en el aparato del gobierno. En un inicio fue la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (1972 - 1976), la cual estaba adscrita en el campo de la salud pública (Secretaría de Salubridad y Asistencia) y finalizó como Subsecretaría de Ecología a partir de 1983 en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (Micheli, 2002).

En 1988, se estableció la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) con el objetivo de generar espacios de responsabilidad y concertación del gobierno con los particulares, definiendo atribuciones en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente para cada nivel de gobierno: federal, estatal y municipal, establecido en el artículo 4° de esta misma ley (de la Federación, 2007). Sin embargo, la LGEEPA ha sufrido varias modificaciones y actualizaciones durante el transcurso de los años, lo cual ha permitido dar solución a problemáticas actuales. Este conjunto de políticas y acciones están permeadas por una estrategia de descentralización en materia de gestión ambiental y de recursos naturales (Carrasco, 2002), cuya finalidad es fortalecer la gestión entre cada uno de los tres niveles de gobierno.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es la dependencia del gobierno federal encargada de impulsar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales de México, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable. Esta dependencia conjuntamente con sus tres subsecretarías y los diversos órganos desconcentrados y descentralizados que forman parte del Sector Ambiental Federal, trabajan en cuatro aspectos prioritarios:

- La conservación y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad.
- La prevención y control de la contaminación.
- La gestión integral de los recursos hídricos.
- El combate al cambio climático (SEMARNAT, 2012).

2.8.1 Instrumentos de política ambiental

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en territorio nacional y zonas sobre las que la nación ejerza su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público y de interés social. Tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable (de la Federación, 2007).

La LGEEPA dentro de su capítulo IV engloba varias temáticas y criterios como instrumentos de política ambiental en México. Dichos instrumentos están descritos por las siguientes secciones de esta misma ley:

Sección I: Planeación ambiental

Sección II: Ordenamiento ecológico del territorio

Sección III: Instrumentos económicos

Sección IV: Regulación ambiental de los asentamientos humanos

Sección V: Evaluación de impacto ambiental

Sección VI: Normas oficiales mexicanas en materia ambiental

Sección VII: Autorregulación y auditorías ambientales

Sección VIII: Investigación y educación ecológicas

Sección IX: Información y vigilancia (de la Federación, 2007)

Cada una de estas secciones enmarca varios artículos y criterios encaminados a la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de programas que tengan

por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente en el país.

2.9 Marco jurídico administrativo para prevención y manejo integral de los residuos

1. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR).

Tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación (de la Federación, 2003). Esta dentro de su título cuarto, capítulo uno; deroga funciones y responsabilidades a la SEMARNAT a través del **Programa Nacional para la Prevención y gestión Integral de los Residuos (PNPGIR)**, el cual está basado en principios de reducción, reutilización y reciclado de los residuos, en un marco de sistemas de gestión integral, en los que aplique la responsabilidad compartida y diferenciada entre los diferentes sectores sociales y productivos, y entre los tres órdenes de gobierno. El **PNPGIR** es una herramienta de planeación para:

- Establecer una política ambiental nacional para integrar el tema de los residuos.
- Coordinar acciones que involucran a los tres ámbitos de gobierno y a los sectores privado y social.
- Marcar directrices para futuros proyectos con una visión diversificada, de apertura a las tecnologías para el manejo, a la participación de los agentes en la gestión de los residuos, a la modernización de sistemas administrativos y de operación de la gestión de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial y a las soluciones regionales, metropolitanas y de asociaciones de municipios, y

- Destacar la necesidad de mejora continua de los marcos normativo y administrativo (Chavéz, 2013).

El artículo 1 de la LGPGIR, establece que esta ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional (de la Federación, 2003).

Cualquier actividad o proceso productivo en México está obligado a cumplir e integrar dentro de su marco jurídico en materia de prevención y gestión integral de residuos con los siguientes aspectos:

- LGPGIR y su reglamento
- Leyes y reglamentos estatales e instrumentos legales del ámbito municipal
- Normas oficiales mexicanas, normas mexicanas, normas técnicas
- Programas nacional, estatales y municipales para la prevención y gestión integral de los residuos
- Acceso a recursos financieros: presupuestos fiscales; banca de desarrollo y banca privada, sector privado (Chávez, 2013).

2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM's). Son regulaciones técnicas que sirven para garantizar que los servicios que contratamos o los productos o servicios que adquirimos cumplan con parámetros o determinados procesos, con el fin de proteger la vida, la seguridad y el medio ambiente (Secretaría de Salud, 2014). Así mismo, son un instrumento, no sólo por su capacidad de inducir cambios en los ámbitos sociales en materia ambiental. Además, permiten a la autoridad establecer límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a diferentes medios y las condiciones para su verificación (Carrasco, 2002).

2.10 Criterios de clasificación de los residuos

Con el propósito de elaborar los inventarios de residuos y orientar la toma de decisiones basada en criterios de riesgo y en el manejo de los mismos. La SEMARNAT se encarga de agrupar y subclasificar los residuos de la siguiente manera (artículo 15 de la LGPGIR):

Residuos Peligrosos (RP): 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. La clasificación de un residuo como peligroso, se establecerá en las normas oficiales mexicanas que especifiquen la forma de determinar sus características, que incluyan los listados de los mismos y fijen los límites de concentración de las sustancias contenidas en ellos, con base en los conocimientos científicos y las evidencias acerca de su peligrosidad y riesgo (artículo 16 de la LGPGIR).

Residuos Sólidos Urbanos (RSU): Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos. Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables (artículo 18 de la LGPGIR).

Residuos de Manejo Especial (RME): Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. Los residuos de manejo especial se clasifican como se indica a continuación, salvo cuando se trate de residuos considerados como peligrosos en esta ley y en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes:

- Residuos de las rocas o los productos de su descomposición.
- Residuos de servicios de salud.
- Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas y ganaderas.
- Residuos de los servicios de transporte.
- Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.
- Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición.
- Residuos tecnológicos de industrias informáticas, electrónicas y automotoras (artículo 19 de la LGPGIR).

2.11 Normatividad en materia de residuos

México cuenta con una estructura normativa en materia de residuos consolidada en base a criterios de caracterización de los mismos. De acuerdo al artículo 36 de la LGEEPA, la SEMARNAT es el organismo capacitado para emitir NOM's en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. De ahí que actualmente se cuente con una variedad de normas que permitan regular las actividades humanas en cuanto a generación de residuos.

2.11.1 Normatividad para residuos peligrosos

Normas vigentes en materia de residuos peligrosos:

- **NOM-052-SEMARNAT-2005:** Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- **NOM-053-ECOL-1993:** Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- **NOM-054-ECOL-1993:** Que establece los procedimientos para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la NOM-052-ECOL-1993.
- **NOM-055-SEMARNAT-2003:** Que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos excepto de los radiactivos.

2.11.2 Normatividad para residuos sólidos urbanos y de manejo especial

Listado de normas aplicables en materia de regulación y gestión de RSU y RME:

- **NOM-083-SEMARNAT-2003:** Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- **NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002:** Protección ambiental-salud ambiental-residuos peligrosos biológico-infecciosos-clasificación y especificaciones de manejo.
- **NOM-098-SEMARNAT-2002:** Protección ambiental – incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

2.12 Niveles de competencia: federal, estatal y municipal en materia de residuos

La ley distingue tres tipos de residuos: los residuos sólidos urbanos de carácter domiciliario, los residuos peligrosos y los residuos considerados como de manejo especial. A partir de la promulgación de la LGPGIR, la asignación de funciones en materia de residuos, entre los tres órdenes de gobierno, se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. Nivel de competencia de los tres órdenes de gobierno en materia de residuos

	FEDERACIÓN	ESTADOS	MUNICIPIOS
PLANEACIÓN	Formular, conducir y evaluar la política nacional. Formular el PNPGR. Formular el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados.	Formular, conducir y evaluar política estatal. Formular los Programas en materia de RME.	Formular los Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los RSU.
REGULACIÓN	El manejo integral, la clasificación y el transporte de los RP. La prevención y remediación de sitios contaminados con RP. La elaboración de NOM's para prevenir o remediar la contaminación de suelos y cuerpos de agua. Planes de manejo: criterios para determinar los residuos sujetos a ellos y procedimientos para su formulación.	RME Contaminación de sitios con RME: prevención y remediación. Identificación de los residuos que dentro de su territorio puedan ser sujetos de planes de manejo. Cobro por servicios de manejo integral de RME.	
GESTIÓN / CONTROL	RP: autorizaciones para su manejo integral, importación, exportación y tránsito por territorio nacional.	RME: autorizaciones para su manejo integral. Microgeneradores de residuos peligrosos, previo convenio con la Federación. Planes de manejo: registro.	RSU: (i) control, (ii) prestación del y cobro por el servicio público de manejo integral y (iii) autorizar y concesionar el citado servicio público. Grandes generadores de RSU: registro. Residuos peligrosos domésticos: prestación del servicio de recolección y disposición final de conformidad con la NOM que al respecto se expida..
INSPECCIÓN / VIGILANCIA	Normatividad de su competencia.	Normatividad relativa a RME. Microgeneradores de RP, previo convenio con la federación.	Normatividad relacionada con RSU.

Fuente: PNPGR, 2008

Aunque cada dependencia de gobierno tiene clara sus funciones en materia de residuos es importante establecer acuerdos y ayudas mutuas que permitan mitigar los residuos a través acciones encaminadas a favorecer el cuidado del medio ambiente, así como promover el desarrollo sustentable en el país.

2.13 Legislación ambiental del Estado de Baja California en materia de residuos

Los estados de la federación adecua la política ambiental del país de acuerdo a las necesidades y problemáticas ambientales de cada uno de ellos. Sin embargo, ninguna de ellas son excluyentes o autoregulatorias a la política ambiental de la federación, es decir, cada una de las leyes, acuerdos o tratados establecidos por el estado, deberá sujetarse a los términos que establece la nación a través de sus leyes, normas y reglamentos.

La creciente industrialización y el aumento en la población en el Estado de Baja California, generó la necesidad de mejorar la infraestructura para el manejo de residuos y materiales peligrosos (Carrasco, 2002). Actualmente el estado cuenta con los siguientes instrumentos en materia de residuos:

2.13.1 Instrumentos normativos

- LPA-BC (Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California)
- LPGIR-BC (Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el Estado de Baja California)

2.13.2 Instrumentos de planeación

- PED 2008-2013 (Programa Estatal de Desarrollo)

- PESPA 2009-2013 (Programa Estatal de Protección al Ambiente)
- PEPGIR (Programa Estatal para la prevención y Gestión Integral de los Residuos)

El gobierno del estado se compromete a partir de estos programas a tener estrategias ambientales que fomenten: el manejo integral y responsable de los residuos; el mejoramiento de la calidad del aire; el aseguramiento de la calidad y disponibilidad del agua; el fomento a la cultura y la educación ambiental el ordenamiento ecológico del territorio; el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; y la definición responsable de acciones ante el cambio climático (PESPA, 2012).

2.14 Plan de manejo: Instrumento de política de gestión de residuos

La eliminación segura y menos contaminante de los residuos fue la principal preocupación en términos ambientales. Sin embargo, las nuevas tecnologías y la concientización ambiental hicieron que el aprovechamiento y la reducción de la generación de residuos pasaran a ser las opciones prioritarias en la política de residuos diseñada en los programas de acción y planes de manejo en materia ambiental. Un plan de manejo es un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de RSU, RME y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social (LGPGIR, 2003).

Normalmente se establece una jerarquía en tres niveles: 1) Reducción de la generación de residuos; 2) Aprovechamiento de residuos (reutilización, reciclaje y demás actividades de valorización); y 3) Eliminación segura de los residuos no recuperados (García, 1999). En general, la falta de manejo de los residuos peligrosos es un problema asociado con algunas actividades productivas de la industria, los servicios de salud y la agricultura. En primer término, los residuos deben evitarse y, cuando esto no sea posible, valorizarlos o tratarlos y como última opción viable considerar su disposición final adecuada (PNPGIR, 2008).

El artículo 17 de la LGPGIR señala que los residuos metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales, que se definirán en forma genérica en el reglamento según lo estipulado en el artículo 7 fracción III de esta ley, son de regulación y competencia federal. Podrán disponerse finalmente en el sitio de su generación; su peligrosidad y manejo integral, se determinará conforme a las NOM's aplicables, y estarán sujetos a los planes de manejo previstos en esta ley. Se exceptúan de esta clasificación los referidos en el artículo 19, fracción I de este ordenamiento. La gestión de los residuos peligrosos es de dependencia federal.

2.14.1 Objetivos del plan de manejo

Los planes de manejo se establecerán para los siguientes fines y objetivos:

- I.** Promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos así como su manejo integral, a través de medidas que reduzcan los costos de su administración, faciliten y hagan más efectivos, desde la perspectiva ambiental, tecnológica, económica y social, los procedimientos para su manejo;
- II.** Establecer modalidades de manejo que respondan a las particularidades de los residuos y de los materiales que los constituyan;
- III.** Atender a las necesidades específicas de ciertos generadores que presentan características peculiares;
- IV.** Establecer esquemas de manejo en los que aplique el principio de responsabilidad compartida de los distintos sectores involucrados, y
- V.** Alentar la innovación de procesos, métodos y tecnologías, para lograr un manejo integral de los residuos, que sea económicamente factible (artículo 27, capítulo II, LGPGIR, 2003).

2.14.2 Criterios de determinación de un plan de manejo de residuos

La determinación de residuos que podrán sujetarse a planes de manejo se llevará a cabo con base en los criterios siguientes y los que establezcan las NOM's:

- I. Que los materiales que los componen tengan un alto valor económico;
- II. Que se trate de residuos de alto volumen de generación, producidos por un número reducido de generadores;
- III. Que se trate de residuos que contengan sustancias tóxicas persistentes y bioacumulables, y
- IV. Que se trate de residuos que representen un alto riesgo a la población, al ambiente o a los recursos naturales (artículo 30, capítulo II, LGPGIR, 2003).

De acuerdo con el artículo 28 de la LGPGIR, cualquier productor, importador, exportador o distribuidor de productos que al desecharse se convierten en los residuos peligrosos está obligado a formular y ejecutar un plan de manejo. También aquellos residuos peligrosos y productos usados, caducos, retirados del comercio o que se desechen y que estén clasificados como tales en la NOM (artículo 31, capítulo II, LGPGIR, 2003).

Actualmente en el Estado de Baja California se cuenta con un proyecto de NOM denominado; PROY-NOM-160-SEMARNAT-2011, que establece los elementos y procedimientos para formular los planes de manejo de residuos peligrosos. Los criterios establecidos incluyen desde la formulación de una línea base de generación de residuos peligrosos en cuanto a volúmenes y actividades productoras, pasando por una etapa de reducción de la fuente a través de cambios de tecnologías, mejores prácticas, sustitución de materias primas o insumos de otros procesos con el fin de aprovechar o valorizar aquellos residuos que, a partir de la formulación del plan de manejo, son susceptibles de ser utilizados. Posteriormente se llega a la etapa de desecho cuando los materiales no tienen vía de aprovechamiento o valorización como subproducto, y finalmente se procede a confinamiento o disposición final del residuo. En la Figura 10 se presenta un diagrama de flujo para determinar los sujetos obligados a la formulación de planes de manejo.

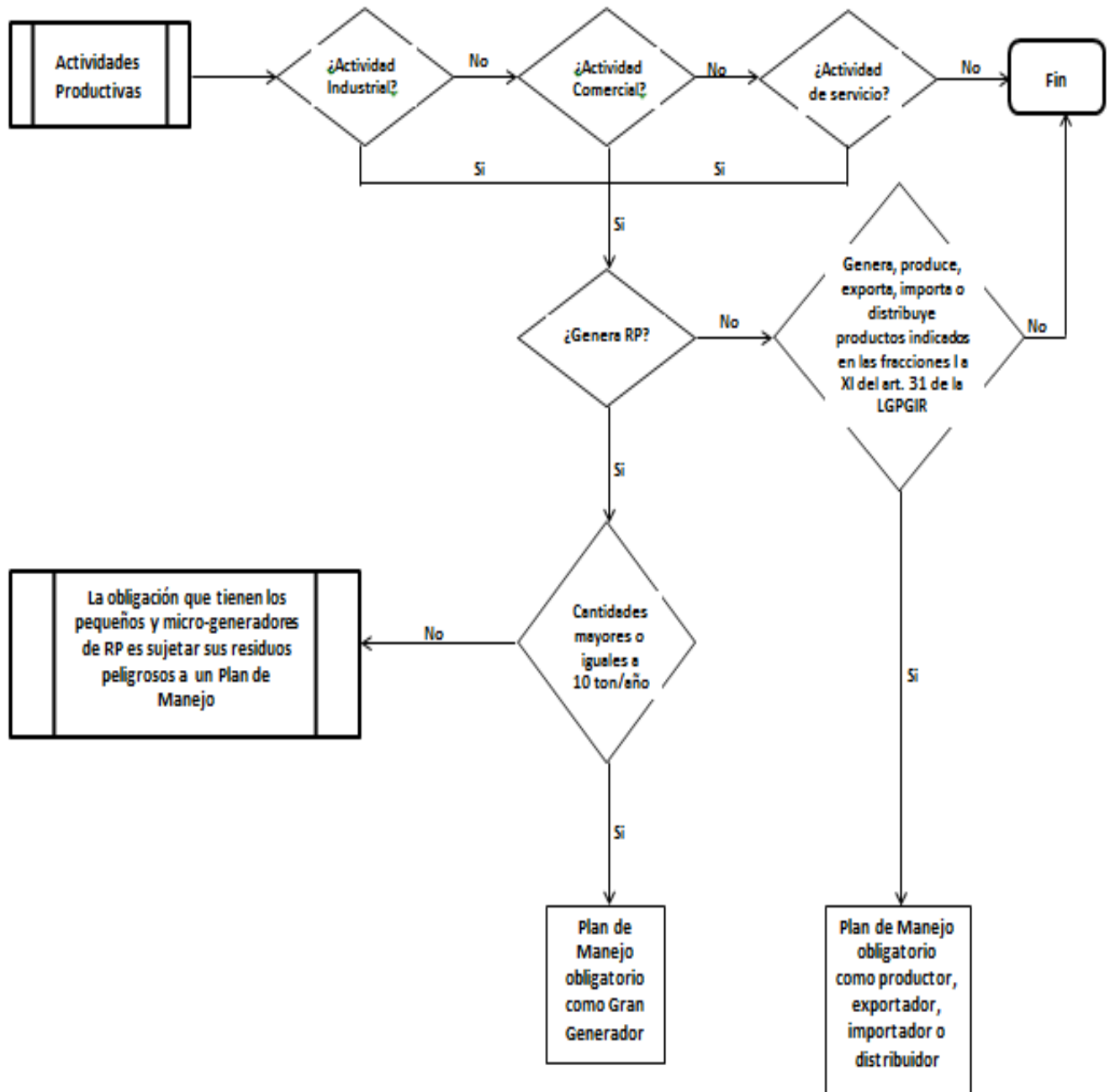


Figura 10. Procedimiento para determinar los sujetos obligados a la formulación de planes de manejo

Fuente: PROY NOM 160 SEMARNAT, 2011

Capítulo III

Metodología

3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión del estado del arte acerca los procesos de acería y de las escorias procedentes de HAE, y de la política ambiental en México en materia de residuos.

3.2 Ubicación del sitio de estudio

Se hizo una visita de reconocimiento del sitio de estudio, se midió la superficie del terreno donde están almacenados los residuos de escoria y se fijaron las coordenadas de los puntos de muestreo. En éste apartado se realizó un reconocimiento del lugar y la determinación geográfica del sitio de estudio.

3.3 Muestreo

El muestreo se realizó en dos etapas y para ello se tomaron en cuenta los siguientes aspectos conforme a la normatividad vigente:

3.3.1 Plan de muestreo

La elaboración del plan de manejo para ambas etapas de muestreo, consistió en desarrollar un seguimiento metodológico en el que se describen aspectos como; el tipo de muestra, el sitio de muestreo, los puntos de muestro y el método de muestreo.

También incluye un apartado de materiales e instrumentos utilizados para el muestreo en campo.

3.3.2 Toma de muestra

Las muestras de escoria se tomaron conforme a la NMX-AA-132-SCFI-2006, la cual establece aspectos importantes como son; el tamaño de muestra, el número de muestra, el tipo de muestreo, la profundidad de toma de muestra y la identificación.

3.3.3 Tratamiento de las muestras

El tratamiento de las muestras consistió en un proceso de secado, molienda y tamizado de los distintos tipos de muestras (escoria, suelo y tierra ferrosa). Posteriormente las muestras se sometieron a un proceso de digestión para la determinación de metales.

3.4 Características físicas y químicas

3.4.1 Análisis de concentración de metales

Para el análisis de metales se utilizó la técnica de espectroscopía de absorción atómica de acuerdo con la NMX-AA-051-SCFI-2001 y la NOM-053-SEMARNAT-1993. En la Tabla 4 se indican los metales analizados en las muestras.

Tabla 4. Metales analizados a muestras de escoria en el laboratorio

PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	NORMA
Metal total: Hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si), níquel (Ni), aluminio(Al), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y arsénico (As).	Espectroscopia de Absorción Atómica	NMX-AA-051-SCFI-2001

3.4.2 Determinación de la composición de la escoria

La composición química de la escoria se determinó en base a los resultados de concentración de metales totales mencionados anteriormente. Se determinó la composición de los siguientes compuestos en forma de óxido: Óxido ferroso (FeO), óxido férrico (Fe₂O₃), óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO), óxido de manganeso (MnO), óxido de magnesio (MgO), óxido de cobre (CuO), óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido de níquel (NiO) y óxido de cromo (Cr₂O₃).

3.4.3 Determinación de propiedades físicas en muestras de escoria

Las propiedades físicas determinadas para escoria se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Determinación de propiedades físicas en muestras de escoria

PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	NORMA
pH	Potenciométrico	NMX-AA-25-1984
Densidad	Método de ensayo normalizado para determinar la densidad	ASTM C128-04a
Granulometría	Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso	ASTM C 136 - 01

3.5 Determinación de compuestos extractables

Se determinó la concentración de metales extractables en las muestras de escoria, utilizando la prueba de extracción PECT establecida en la NOM-053-SEMARNAT-1993, para determinación de plomo, cromo, mercurio, arsénico y cadmio. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 para determinar el grado de peligrosidad de la escoria.

3.6 Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos obtenidos, consistió en la determinación de promedios, desviaciones estándar y ANOVAS para analizar e interpretar el conjunto de datos obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras de escoria, suelo y tierra ferrosa.

También se utilizó para el análisis de datos, la prueba t-student con un intervalo de confianza del 95 %, valores máximos, valores mínimos y coeficientes de variación, para ver el comportamiento de la concentración de los metales contenidos en la escoria y la distribución de la concentración de metales en el sitio de disposición de este residuo. Los resultados presentados son resultados promedio de tres replicaciones del equipo de absorción atómica.

3.7 Comparativo de resultados con los límites máximos permisibles

Los resultados obtenidos del análisis de metales extractables se compararon con los límites máximos permisibles de metales tóxicos establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005.

Capítulo IV

Desarrollo experimental

4.1 Ubicación del sitio de estudio

La Figura 11, muestra el sitio destinado para el almacenamiento de escoria de la PSDM (punto A). El punto B muestra la ubicación geográfica de la PSDM, y el punto C representa el Ejido Guanajuato. Las líneas punteadas de color rojo, delimitan el terreno donde actualmente se acumula la escoria. El terreno tiene un área estimada de nueve hectáreas.



Figura 11. Imagen de la ubicación de la PSDM y sitio de muestreo

Fuente: Google earth, 2008

La PSDM inicia sus labores de almacenamiento de escoria en el predio a partir del año 2010. La Figura 12 obtenida en 2012, muestra cómo se ha ido dando la acumulación de escoria, y las diferentes tonalidades de ésta, las cuales se debe a distintos tipos de

residuos que se generan, ya sea que la escoria provenga de la fase de fusión o de la fase de afino. Algunos materiales que se adhieren al proceso de aceración pueden también cambiar la tonalidad.

El punto **B₁** en la Figura 12, muestra el área destinada para el almacenamiento de residuos de escoria dentro de las instalaciones de la PSDM. En esta área se tienen un sistema de cribas para reciclar los residuos (escorias negras, escorias blancas y tierra ferrosa) del proceso de aceración, para su posterior reincorporación al proceso. El mayor porcentaje de recirculación de residuos al proceso de aceración lo presentan las escorias negras, puesto que este tipo de escorias desechadas por el HAE en su etapa de fusión contiene porcentajes de Fe entre el 20 y 30 %. El otro 10 % lo componen plastas de acero de calderos como remanentes del proceso de aceración.



Figura 12. Ubicación de sitio de almacenamiento de escoria
Fuente: Google earth, 2012

4.2 Muestreo

El muestreo se desarrolló en dos etapas:

En la **primera etapa**, se tomaron veinticinco muestras de escoria a profundidades de 0 a 30 cm, y dos muestras de suelo a profundidades de 0 a 15 cm.

En la **segunda etapa**, se tomaron cinco muestras de escoria las cuales fueron tomadas a mayor profundidad que en la primera etapa de muestreo con el fin de conocer la variación de la concentración de metales en la escoria a lo largo de todo el perfil vertical, es decir, se cubrió todo el espesor del montículo de escoria. Se seleccionaron cinco puntos de muestreo de escoria de manera aleatoria. Adicionalmente se tomó una muestra de suelo como testigo y tres muestras de “tierra ferrosa” (nombre designado por la PSDM al residuo procedente de una planta instalada en los Estado Unidos que pertenece a Grupo Simec). Este residuo es un polvo metálico con coloración café marron.

Los procedimientos de identificación, colección y manejo de las muestras de escoria y suelo se desarrollaron conforme a la NMX-AA-132-SCFI-2006. Esta norma establece las especificaciones técnicas para muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. El tamaño y número de muestras se definió conforme a la NMX-AA-132-SCFI-2006, norma utilizada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), para muestreo y toma de muestra de residuos con características similares a la escoria.

En la Tabla 6 se describen los tipos de muestras tomadas, métodos de muestreo, preparación de muestras y técnicas de análisis que se siguieron la determinación del tamaño de muestra, localización de los puntos de muestro, colección, tratamiento y análisis de las mismas.

Tabla 6. Tipo de muestras tomadas, método de muestreo y de análisis químico

ETAPA	TIPO DE MUESTRA	SITIO	PUNTOS DE MUESTREO Y PROFUNDIDAD	MÉTODO DE MUESTREO	MÉTODO DE ANÁLISIS	MÉTODO DE PREPARACIÓN	TÉCNICA DE ANÁLISIS
PRIMERA	Escoria	Sitio de disposición	25 puntos (0 - 30 cm)	NMX-AA-132-SCFI-2006	NOM-053-SEMARNAT-1993	NOM-053-SEMARNAT-1993	Absorción Atómica
	Suelo	Sitio de disposición	1 Punto (0 - 15 cm)				
		Parcela Aledaña	1 Punto (0 - 15 cm)				
SEGUNDA	Escoria	Sitio de disposición	4 puntos (0-105 cm)	ASTM C702 AASHTO T249	NOM-021-RENAT-2000	SPECTROFLAME ICP CODIGO ACA 10 102	NMX-AA-051-SCFI-2001
		Sitio de disposición	1 Punto (0-220 cm)				
	Suelo	Sitio de disposición	1 Punto (0 - 15 cm)				
	Tierra Ferrosa	Sitio dentro de PSDM	3 Puntos (0 - 15 cm)				

Las coordenadas geográficas de cada uno de los puntos de muestro se obtuvieron durante la visita de reconocimiento. Sin embargo, una vez en el sitio de estudio, las coordenadas para el trazado de la retícula y ubicación de cada punto de toma de muestra se ajustaron con un equipo portátil GPS de mayor precisión. En la Tabla 7 se presentan las coordenadas geográficas de cada punto de muestreo en la primera etapa, así como la profundidad a la cual fueron tomadas y los parámetros analizados.

Tabla 7. Coordenadas de los sitios de muestreo de la primera etapa del estudio

MUESTREO	NO.	LOCALIZACIÓN DE PUNTOS		PROFUNDIDAD	PARÁMETROS A ANALIZAR
Escoria (E)	1	32°30'56.22"N	115°20'51.27"O	0 - 30 cm	Metales tóxicos totales: As, Hg, Pb, Cd, Cr y Ni.
	2	32°30'57.70"N	115°20'51.98"O		
	3	32°30'59.22"N	115°20'52.70"O		
	4	32°31'0.72"N	115°20'53.41"O		
	5	32°31'2.14"N	115°20'54.73"O		
	6	32°30'56.05"N	115°20'55.08"O		
	7	32°30'57.54"N	115°20'55.81"O		
	8	32°30'59.04"N	115°20'56.54"O		
	9	32°31'0.51"N	115°20'57.26"O		
	10	32°31'2.05"N	115°20'58.01"O		
	11	32°30'55.86"N	115°20'58.92"O		
	12	32°30'57.36"N	115°20'59.66"O		
	13	32°30'58.84"N	115°21'0.39"O		
	14	32°31'0.33"N	115°21'1.12"O		
	15	32°31'1.70"N	115°21'1.79"O		
	16	32°30'55.67"N	115°21'2.74"O		
	17	32°30'57.17"N	115°21'3.47"O		
	18	32°30'58.66"N	115°21'4.21"O		
	19	32°31'0.15"N	115°21'4.94"O		
	20	32°31'1.61"N	115°21'5.62"O		
	21	32°30'55.51"N	115°21'6.56"O		
	22	32°30'57.00"N	115°21'7.29"O		
	23	32°30'58.46"N	115°21'8.01"O		
	24	32°30'59.93"N	115°21'8.76"O		
	25	32°31'1.43"N	115°21'9.50"O		
Suelo (S)	1	32°31'2.10"N	115°21'1.98"O	0 - 15 cm	
	2	32°31'2.56"N	115°21'2.00"O		

En la Tabla 8 se presentan las coordenadas geográficas de los puntos para la toma de muestra de escoria, suelo y tierra ferrosa establecidos para la segunda etapa. Las profundidades para la toma de muestras de escoria se establecieron en relación a la altura total de escoria acumulada, para ello se definieron cuatro puntos con profundidades de 0 a 105 cm y un punto de 0 a 210 cm. En cada punto de muestreo se tomaron alícuotas cada 15 cm a lo largo de todo el perfil vertical de cada punto muestreado, considerando la capacidad y longitud de perforación de la barrena riverside

(ver figura 14). Para el análisis se hicieron muestras compuestas con profundidades de; 0 a 30 cm; 30 a 75 cm; 75 a 105 cm para los puntos E6, E7, E10 y E13. En tanto que para el punto E15 se tuvieron muestras compuestas con profundidades de; 0 a 30 cm; 30 a 75 cm; 75 a 105 cm; 105 a 150 cm y 150 a 210 cm. Las muestras de suelo (S3) y tierra ferrosa (TF1, TF2 y TF3), se obtuvieron a profundidades de 0 a 15 cm.

Tabla 8. Coordenadas de los sitios de muestreo de la segunda etapa del estudio

MUESTREO	LOCALIZACIÓN DE PUNTOS		PROFUNDIDAD	PARÁMETROS A ANALIZAR
Escoria (E)	6	32°30'56.05"N 115°20'55.08"O	0 - 30 cm 30 - 75 cm 75 - 105 cm	Metales tóxicos totales: As, Hg, Pb, Cd, Cr y Ni.
	7	32°30'57.54"N 115°20'55.81"O	0 - 30 cm 30 - 75 cm 75 - 105 cm	
	10	32°31'2.05"N 115°20'58.01"O	0 - 30 cm 30 - 75 cm 75 - 105 cm	Metales totales para óxidos: Fe, Mn, Mg, Al Si y Ca.
	13	32°30'58.84"N 115°21'0.39"O	0 - 30 cm 30 - 75 cm 75 - 105 cm	
	15	32°31'1.70"N 115°21'1.79"O	0 - 30 cm 30 - 75 cm 75 - 105 cm 105 -150 cm 150 -210 cm	
Suelo (S)	3	32°31'1.70"N 115°21'1.79"O	0 - 15 cm	
Tierra Ferrosa (TF)	1	32°30'40.64"N 115°21'2.26"O	0 - 15 cm	
	2	32°30'40.62"N 115°21'2.34"O		
	3	32°30'40.58"N 115°21'2.42"O		

4.2.1 Material y equipo utilizado para la toma de muestras

A continuación se presenta un listado de materiales y equipos necesarios para efectuar el muestreo en escoria, suelo y tierra ferrosa (ver Figura 13).

A) Equipo de protección personal

1. Guantes
2. Cubre bocas
3. Lentes
4. Bata de laboratorio
5. Gorra
6. Botas o zapato cerrado
7. Pantalón de mezclilla y camisa manga larga
8. Gel bactericida
9. Bloqueador solar
10. Botiquín de primeros auxilios

B) Equipo y material para toma de muestras

1. GPS (*Global Positioning System*)
2. Bolsas de polietileno con sello hermético (capacidad 800 g)
3. Pala de mano metálica (20 piezas)
4. Pala pocera (para perfil)
5. Flexómetro de 50 m
6. Fotografía aérea de la zona de muestreo, con la ubicación de los puntos de muestreo
7. Marcador permanente para identificar muestras
8. Cámara fotográfica
9. Agua Destilada (20 L)
10. Agua potable (20 L)
11. Jabón libre de fosfatos
12. Lona de plástico de 1 X 1 m (40 piezas)
13. Banderines (35 piezas)
14. Brocha de 4"
15. Caja de plástico (2 piezas)
16. Marro 4"
17. Báscula

C) Protección del Ambiente

1. Bolsas para basura

Adicionalmente para la segunda etapa se utilizó una barrena tipo riverside (ver Figura 14) para facilitar la obtención de cada uno de los núcleos de muestras que componen el perfil vertical del punto de muestreo.



Figura 13. Material y equipo de muestreo



Figura 14. Barrena Riverside
Fuente: Proeti, 2014

4.2.2 Ubicación de puntos de muestreo de la primera etapa

Se utilizó la metodología establecida en la NMX-AA-132-SCFI-2006, para determinar los puntos de muestreo de escoria y suelo de la PSDM:

1. Mediante una fotografía aérea de la zona, se trazó una retícula sobre la superficie total donde se encuentra almacenada la escoria procedente de la PSDM. Debido a que el terreno de almacenamiento de escoria posee forma irregular, se trazó un polígono con una superficie de 200 X 400 m. El área establecida se subdividió posteriormente en varios cuadrantes de dimensiones 50 X 100 m. Sobre cada uno de los vértices formados en la retícula se colocó un punto de muestreo, obteniéndose un total de 25 puntos de muestreo (**E1** hasta **E25**), como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Imagen aérea que muestra el trazado de retícula en el sitio de almacenamiento de escoria
 Fuente: Google earth, 2013

El trazado de la retícula en la Figura 15, sirvió de base para ubicar los puntos de muestreo sobre el sitio de almacenamiento de escoria. Las coordenadas de cada punto de muestreo se ajustaron al momento de la toma de muestra mediante un equipo GPS de mayor precisión, obteniéndose finalmente los puntos que se muestran en la Figura 16, y que corresponden a las coordenadas geográficas mostradas anteriormente en la Tabla 7.

Las muestras tomadas como blanco o testigo están se identifican como **S1** y **S2** con coordenadas $32^{\circ}31'2.10''\text{N}$, $115^{\circ}21'1.98''\text{O}$ y $32^{\circ}31'2.56''\text{N}$, $115^{\circ}21'2.00''\text{O}$, respectivamente (ver Figura 16). S1 es un punto de muestreo de suelo dentro del sitio de disposición de escoria que presenta el suelo original sin ninguna capa de escoria que lo cubra. En tanto que el punto S2 es suelo de terreno agrícola muy próximo al sitio de estudio. Cabe destacar que en ambos casos el suelo no presenta ninguna alteración.

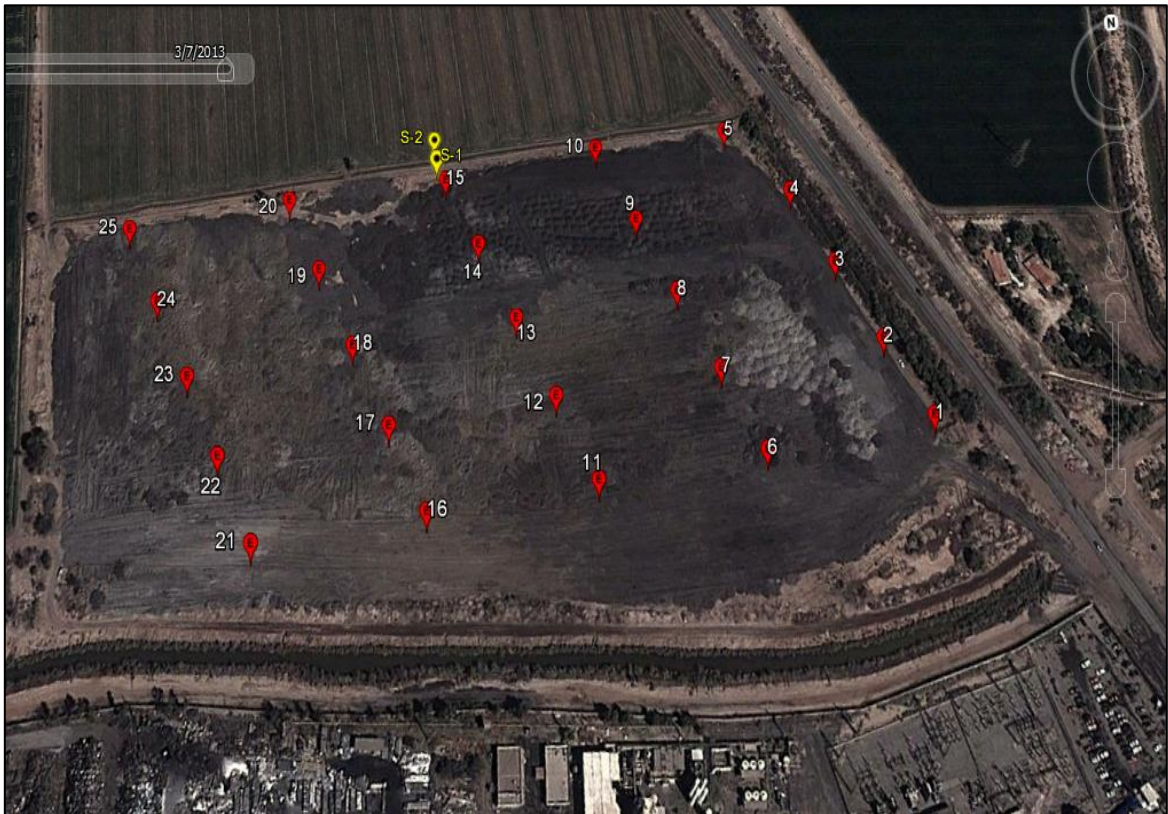


Figura 16. Puntos de muestreo en el sitio de almacenamiento de escoria de la primera etapa

Fuente: Google earth, 2013

Con ayuda del flexómetro se establecieron los puntos de muestreo en base a la retícula previamente elaborada, colocándose un banderín en cada punto de muestreo ubicado, como se muestra en las Figuras 17 y 18.



Figura 17. Trazado de retícula para muestreo



Figura 18. Ubicación de punto de muestreo

4.2.2.1 Muestreo primera etapa

Una vez identificados los puntos de muestreo, se hicieron perfiles verticales en cada punto muestreado y se tomaron las muestras de escoria

Con la ayuda de la pala pocera, se hicieron los perfiles verticales de para la toma de muestras de escoria en cada punto establecido a una profundidad de 0 a 30 cm, cubriendo el espesor total del punto muestreado. La muestra total de cada punto, se colocó sobre una lona de plástico y posteriormente se procedió a homogenizar la muestra de escoria con la pala de mano (en algunos casos se necesitó hacer uso del marro para estandarizar la granulometría de la muestra) y se aplicó el procedimiento de la ASTM C 702 AASHTO T248 para la reducción de muestras a agregados a tamaño de ensayo por el método de cuarteo. De cada muestra homogénea se pesaron 1000 g de escoria y se colocaron en bolsas de polietileno con sello hermético. Finalmente se procedió a identificar las muestras de escorias obtenidas. Parte de éste procedimiento se presenta en la Figura 19.

Para el caso de muestras de suelo el procedimiento fue similar, obteniéndose 1000 g de muestras homogéneas de suelo un perfil de profundidad de 0 a 15 cm, conforme a la NMX-AA-132-SCFI-2006.



Figura 19. Toma de muestra de escoria

Observaciones:

- Se lavó la pala pocera después de cada muestreo. Primero con agua potable y posteriormente con agua destilada. Evitando contaminación entre las muestra de cada uno de los perfiles.
- Se evitó el uso de material en mal estado o deteriorado, así como el que contiene pintura como protección, dado que son fuentes de contaminación con zinc, cadmio y plomo.

4.2.3 Ubicación de puntos de muestreo de la segunda etapa

Tomando como punto de partida los puntos de muestreo de la primera etapa, la ubicación de los puntos de toma de muestra para cada tipo de residuo se establecieron de la siguiente forma:

1. **Escoria.** Para el caso de muestras de escoria se tomaron cinco puntos de manera aleatoria de la retícula elaborado durante el primer muestro. Estos corresponden a los puntos E6, E7, E10, E13 y E15, como se observa en la Figura 20 y sus coordenadas son las mismas que las presentadas en la primera etapa de muestreo. Para la ubicación de puntos de muestreo en escoria también se establecieron criterios de tiempo de envejecimiento de escoria y altitud del montículo de escoria con respecto al nivel del suelo.
2. **Suelo testigo.** S3 es un punto de muestreo de suelo, ubicado dentro del sitio de almacenamiento de escoria con coordenadas **32°31'2.10"N, 115°21'1.98"O**.

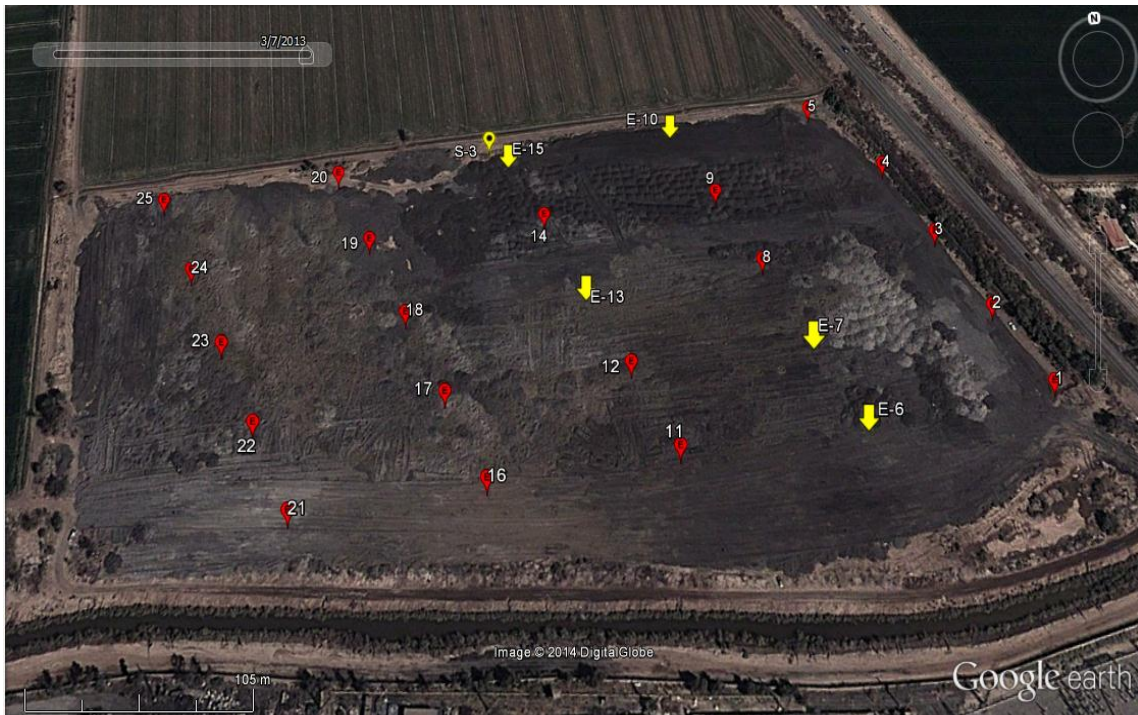


Figura 20. Puntos de muestreo en el sitio de almacenamiento de escoria de la segunda etapa
 Fuente: Google earth, 2013

3. Tierra ferrosa. Para el muestreo de tierra ferrosa se establecieron tres puntos de muestreo dentro de las instalaciones de la PSDM en un almacén temporal de escoria. Los tres puntos son próximos uno del otro debido a que existía menor cantidad de residuo de tierra ferrosa dentro del sitio. La ubicación de los puntos se presenta en la Figura 21 y sus coordenadas geográficas se presentan en la Tabla 8.

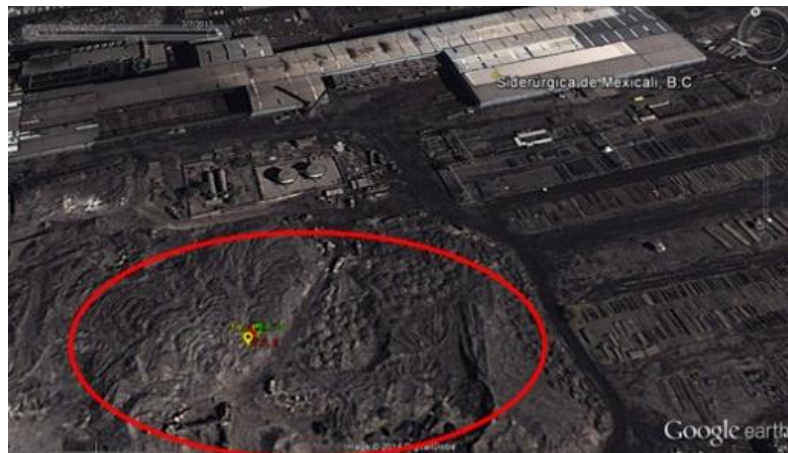


Figura 21. Imagen aérea de puntos de muestreo de tierra ferrosa
 Fuente: Google earth, 2013

El área delimitada por la circunferencia que se muestra en la Figura 21, es un sitio de disposición temporal de residuos; 90 % de escoria, 5 % de plastas de acero fundido, 3 % de tierra ferrosa y el 2 % de residuos de material refractario, ferroaleaciones y otros residuos. Por tal motivo el muestreo en tierra ferrosa es muy puntual.

En la Figura 22 se muestra el residuo llamado “tierra ferrosa”, cuya coloración es café marrón. Dicho residuo es introducido a México, proveniente de las plantas localizadas en Estados Unidos que pertenecen a Grupo Simec para su disposición adecuada. Sin embargo, actualmente este residuo se encuentra mezclado con la escoria dentro del predio de nueve hectáreas.



Figura 22. Residuo denominado “tierra ferrosa”

4.2.3.1 Muestreo segunda etapa

El proceso para la toma de muestras de escoria se realizó de la siguiente manera:

1. Una vez ubicados los puntos de muestreo con GPS, se señalaron y se hicieron perfiles empleando la barrena riverside para extraer muestras de escorias cada 15 cm de profundidad. Se establecieron profundidades de 0 a 105 cm para los puntos E6, E7, E10 y E13 y una profundidad de 0 a 210 cm para el punto E15.
2. A partir de las muestras de 15 cm se realizaron muestras compuestas para cada perfil del punto de muestreo. Como resultado de este procedimiento se obtuvieron cuatro muestras compuestas para cada punto con profundidades de 0 a 30 cm, 30 a 45 cm, 45 a 75 cm y 75 a 105 cm. Para el punto E15 se obtuvieron dos muestras adicionales a profundidades de 105 a 150 cm y 150 a 210 cm.

3. Cada muestra compuesta con un peso 1000 g se colocó en una bolsa de plástico y se procedió a identificarlas. También se tomaron muestras de tierra ferrosa y de suelo a profundidades de 15 cm de acuerdo con la norma NMX-AA-132-SCFI-2006.

4.2.3 Identificación de las muestras

Las etiquetas de las muestras que se colocaron a cada bolsa de plástico incluyen los siguientes datos:

- a. Nombre de la empresa y responsable del muestreo
- b. Fecha del muestreo
- c. Número de muestra
- d. Profundidad de toma de muestra

Las muestras se transportaron al Laboratorio Químico-Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California para su posterior tratamiento y análisis, como se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Muestras de escoria y suelo

4.3 Tratamiento de muestras para su análisis de metal total y extractable

El tratamiento de las muestras para su análisis se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UABC. Se emplearon tres métodos para el tratamiento de muestras de escoria, suelo y tierra ferrosa.

4.3.1 Digestión de muestras para determinación de metales totales

El tratamiento de las muestras consistió en pesar 200 g de cada muestra de escoria, suelo y tierra ferrosa. Posteriormente se sometieron a un proceso de trituración y molienda, seguida de un tamizado la obtención de muestras con una granulometría de malla 65. Se tomaron 5 g de cada muestra tamizada y se sometieron a una digestión ácida de acuerdo al método: 3050B de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) (EPA, 1996). El proceso de tratamiento de las muestras se ilustra en las Figuras 24, 25 y 26. Finalmente se obtuvieron muestras en solución.



Figura 24. Molienda y tamizado de escoria



Figura 25. Digestión ácida de escoria



Figura 26. Tratamiento final

4.3.2 Tratamiento de muestras para determinación de sílice

Esta técnica es específica para el tratamiento y digestión de escorias de acerías aprobado por la ASTM. ESPECTROFLAME-ICPD con código ACA-10-012, es una técnica del manual de usuario del equipo espectrofotométrico Inductively Coupled Plasma (ICP; por sus siglas en inglés) marca SPECTRUM. La técnica consiste en tomar una porción de muestra de escoria inferior a un tamiz de malla 65. La alícuota de muestra de escoria junto con el fundente (en este caso; carbonato de sodio Na_2CO_3 y borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) son agregados a un crisol para su fundición. La pasta resultante se ataca con ácido y se lleva al volumen deseado. Parte del procedimiento descrito anteriormente se muestra en las Figuras 27, 28 y 29.

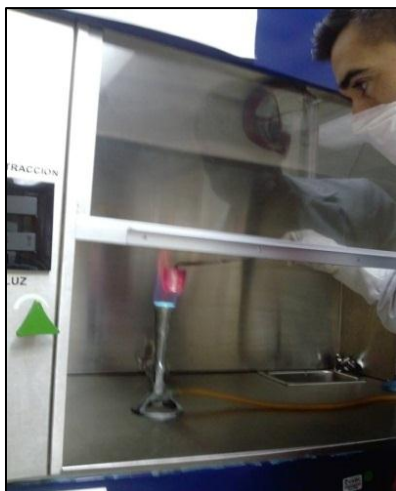


Figura 27. Escoria y fundente sometidos a calentamiento



Figura 28. Escoria y fundente completamente líquidos



Figura 29. Tratamiento final

4.3.3 Prueba de extracción de compuestos tóxicos (PECT) para la determinación de metales extractables

La Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993 establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción (PECT) para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Para tratar las muestras por este método, se utilizó un agitador rotatorio marca Millipore a 30 rpm \pm 2. El reactivo para la extracción de metales se determinó de acuerdo al pH de las muestras. Para escoria con pH alcalino, se utilizó el reactivo de extracción a base de ácido acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$. En las Figuras 30, 31 y 32, se muestra el proceso de tratamiento hasta la obtención de las muestras.

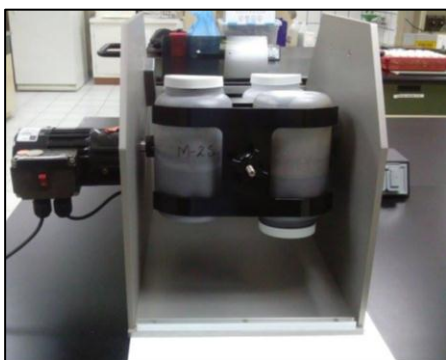


Figura 30. Agitador rotatorio PECT



Figura 31. Agitador rotatorio (24h)



Figura 32. Tratamiento final

4.4 Análisis de laboratorio

Las muestras de escoria, suelo y tierra ferrosa se analizaron en el laboratorio Químico-Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Se hizo el análisis cuantitativo de hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si), níquel (Ni), aluminio(Al), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd), por el método de Espectroscopía de Absorción Atómica, con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 3100. La determinación de mercurio (Hg) y arsénico (As) se realizó en el Instituto de Investigación en Ciencias Veterinarias de la UABC, utilizando la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica y Generador de Hidruros. De acuerdo con la NMX-AA-051-SCFI-2001.

Capítulo V

Resultados y discusión

5.1 Resultados de densidad y pH en escoria de HAE

Los resultados promedios obtenidos de las mediciones de pH y densidad en escoria de HAE de la PSDM, B.C, se presentan en la Tabla 9. De las mediciones realizadas a 15 muestras se obtuvo un valor promedio de pH de 11 para la escoria de la PSDM: Estos valores de pH son similares al valor promedio reportado por Cañas (2012) quien indica un valor de pH de 10.5 en su estudio. Se obtuvo un valor promedio de densidad de la escoria de 3.35 kg/m³ y este valor obtenido es similar al valor de 3.39 reportado por el Ministerio de Fomento (2011) en un estudio para escoria de grano grueso.

Tabla 9. Propiedades físicas de la escoria de HAE obtenidas de diferentes fuentes y datos de este estudio

PROPIEDADES FÍSICAS DE ESCORIA DE HAE			
Propiedad	Grano Grueso	Grano fino	PSDM (Grano grueso)
pH promedio	11.0	ND	10.5
Tamaño (mm)	4.76 - 25.0	0 - 4.76	> 4.75
Densidad (kg/m ³)	3.35	3.70	3.39

Fuente: Cañas, 2012; Ministerio de Fomento, 2011

ND= No determinado

5.2 Resultados de análisis de metal total en muestras de escoria de la primera etapa

Los resultados obtenidos del análisis de concentración de metales en muestras de escoria se presentan en la Tabla 10. El conjunto de datos registrados representan el valor promedio de tres réplicas de cada una de las veinticinco muestras analizadas por espectrofotometría de absorción atómica. En la Tabla 10, también se observa el valor de concentración promedio de las veinticinco muestras de escoria de cada elemento analizado. Se obtuvieron concentraciones promedio para Fe 117.80 g/kg, Ca 116.39 g/kg, Si 106.37g/kg y Mg 55.18 g/kg. El Al y Mn presentaron concentraciones de 20.77 g/kg y 10.46 g/kg de escoria respectivamente. Para los otros elementos analizados se encontraron concentraciones promedio menores a 1 g/kg, entre los que se encuentra el Cr 0.39 g/kg, Cu 0.61 g/kg, Ni 0.18 g/kg, Pb 0.99 g/kg, Cd 0.19g/kg As 0.0003 g/kg y Hg 0.0065 g/kg

Tabla 10. Resultados de concentración promedio de 3 réplicas de cada muestra de escoria

No. Muestra	Elemento (g/kg)												
	Fe	Mn	Mg	Ca	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Pb	Cd	Hg	As
E1	160.00	17.60	62.50	124.99	95.00	22.46	0.66	0.46	0.11	0.82	0.014	0.0001	0.0048
E2	135.00	10.00	65.00	174.99	85.00	21.60	0.34	0.46	0.14	0.40	0.008	0.0001	0.0076
E3	180.00	14.80	56.00	139.99	65.75	17.90	0.56	0.64	0.15	0.96	0.017	0.0001	0.0079
E4	173.33	15.60	67.50	124.99	87.13	18.52	0.55	0.62	0.14	1.80	0.030	0.0001	0.0072
E5	126.66	15.20	64.00	119.99	87.88	18.13	0.51	0.42	0.09	1.12	0.020	0.0001	0.0054
E6	123.33	8.00	34.00	74.99	146.25	23.80	0.34	0.74	0.24	1.02	0.017	0.0005	0.0089
E7	86.66	7.60	45.00	89.99	135.00	23.20	0.26	0.84	0.24	0.88	0.018	0.0013	0.0092
E8	113.33	7.20	48.00	109.99	133.75	23.80	0.28	0.78	0.24	0.74	0.013	0.0005	0.0091
E9	140.00	8.80	67.50	169.99	73.75	15.52	0.29	0.54	0.18	0.36	0.007	0.0000	0.0072
E10	150.00	16.80	42.00	99.99	87.50	19.30	0.52	0.55	0.16	0.94	0.017	0.0001	0.0066
E11	123.33	11.20	30.00	84.99	127.50	28.00	0.31	0.79	0.26	1.20	0.025	0.0006	0.0095
E12	75.00	6.80	80.00	194.99	100.13	21.06	0.22	0.44	0.17	0.48	0.009	0.0003	0.0054
E13	116.66	8.00	60.00	109.99	124.38	25.80	0.32	0.76	0.23	0.76	0.015	0.0005	0.0070
E14	140.00	16.80	54.00	129.99	75.25	16.22	0.57	0.66	0.16	1.60	0.031	0.0001	0.0068
E15	120.00	16.80	36.66	54.99	95.88	15.32	0.56	0.54	0.10	2.00	0.033	0.0001	0.0074
E16	120.00	10.00	41.00	99.99	94.13	22.22	0.64	0.78	0.19	3.00	0.083	0.0002	0.0047
E17	110.00	4.00	16.25	18.74	181.25	36.28	0.45	1.36	0.42	1.60	0.029	0.0012	0.0105
E18	110.00	2.60	16.25	31.24	185.00	30.24	0.22	1.04	0.34	1.20	0.020	0.0011	0.0128
E19	81.66	10.00	55.00	149.99	100.00	20.92	0.44	0.40	0.15	0.40	0.007	0.0002	0.0040
E20	116.66	12.80	55.00	119.99	95.13	15.74	0.36	0.40	0.13	0.80	0.014	0.0001	0.0041
E21	63.33	7.20	80.00	169.99	85.50	16.76	0.23	0.26	0.11	0.32	0.007	0.0001	0.0033
E22	85.00	7.60	72.00	109.99	81.25	13.72	0.23	0.28	0.09	0.28	0.006	0.0001	0.0034
E23	75.00	7.20	85.00	139.99	124.38	19.16	0.28	0.45	0.15	0.58	0.013	0.0003	0.0034
E24	100.00	9.20	75.00	144.99	96.13	17.62	0.35	0.50	0.16	0.54	0.011	0.0002	0.0039
E25	120.00	9.60	72.00	119.99	96.38	15.92	0.38	0.48	0.14	1.00	0.018	0.0002	0.0034
Promedio(N = 25)	117.80	10.46	55.18	116.39	106.37	20.77	0.39	0.61	0.18	0.99	0.019	0.0003	0.0065
Desv. Std	30.03	4.22	18.96	42.53	31.04	5.27	0.14	0.24	0.08	0.63	0.015	0.0004	0.0025
I.C 95%	12.37	1.74	7.81	17.52	12.79	2.17	0.06	0.10	0.03	0.26	0.006	0.0001	0.0011
Lim. Inferior	105.42	8.71	47.37	98.87	94.20	18.70	0.34	0.51	0.15	0.73	0.013	0.0002	0.0055
Lim. Superior	130.17	12.20	62.99	133.91	118.54	22.83	0.45	0.71	0.21	1.25	0.026	0.0005	0.0076
Máx	180.00	17.60	85.00	194.99	185.00	36.28	0.66	1.36	0.42	3.00	0.083	0.0013	0.0128
Mín	63.33	2.60	16.25	18.74	65.75	13.72	0.22	0.26	0.09	0.28	0.006	0.0001	0.0033

La Figura 33, muestra el comportamiento de la concentración de los metales totales con mayor concentración en las muestras de escoria de la primera etapa. Donde la concentración promedio para Fe, Si, Ca, Mg, Al y Mn se encuentran un intervalo de 10 a 100 gramos de dichos elementos por cada kilogramo de escoria (g/kg). Sin embargo, para Cr y Cu se detectaron concentraciones inferiores a 1 g/kg de escoria. En esta figura observaron variaciones significativas en la concentración, presentando incrementos el silicio, aluminio y cobre, y decaimientos en la concentración de calcio, magnesio, manganeso y cromo en las muestras E15, E16, E17 y E18. Esta variación se atribuye a dos causas; 1) El contenido de residuo “tierra ferrosa”, y 2) la variabilidad de la carga metálica o chatarra.

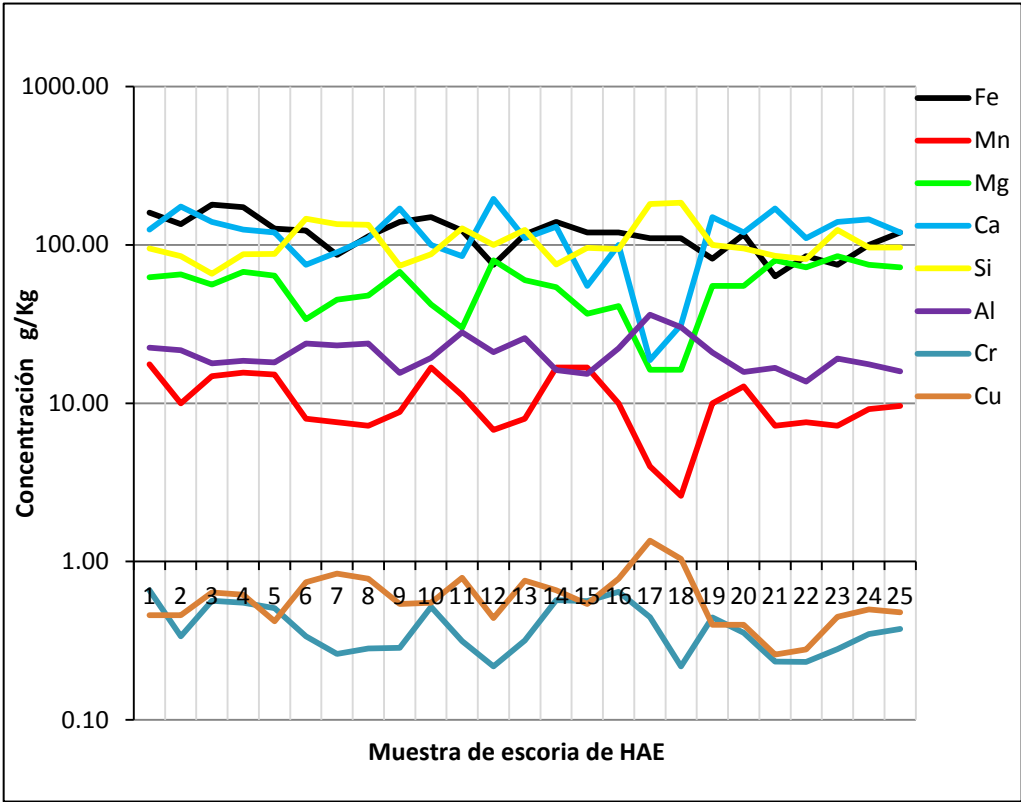


Figura 33. Resultados de concentración promedio de metales total en escoria HAE (primera etapa)

En la Figura 34 se ilustra la concentración de plomo, cadmio, mercurio, arsénico y níquel analizados en muestras de escoria, presentando incrementos en sus concentraciones dentro del intervalo de muestras de los puntos E15 al E18. A excepción

de mercurio que además presenta tres elevaciones en las muestras, E7, E10 y E13. Dicho comportamiento se atribuye a las mismas causas de la Figura 33 para muestras del intervalo E15 a E18, y que tiene gran porcentaje del material que la PSDM denomina “tierra ferrosa”. Residuo que se encuentra mezclado con la escoria HAE, en el sitio de disposición.

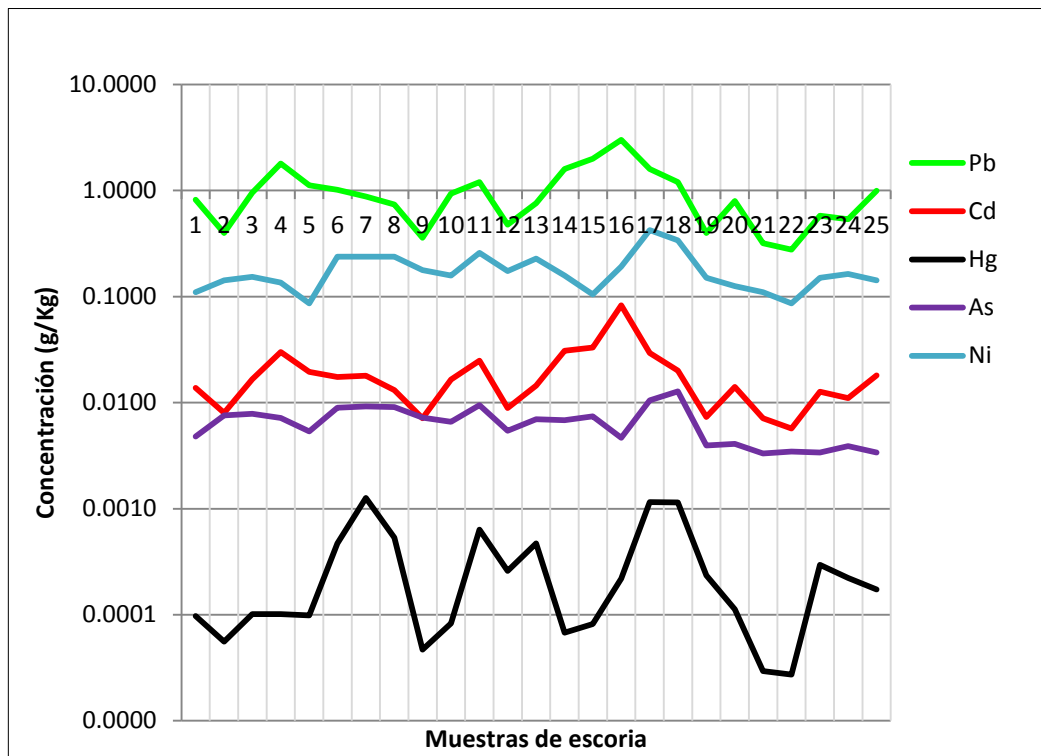


Figura 34. Resultados de concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE (Primera etapa)

5.2.1 Resultados calculados de la concentración de metales en forma de óxidos

Los resultados de óxidos metálicos calculados a partir de la concentración para los elementos; Fe, Si, Ca, Mg, Mn, Al, Cr, Cu y Ni, se presenta en la Tabla 11. Éstos resultados son valores promedios de composición porcentual en forma de óxidos metálicos de los componentes característicos de la escoria y, corresponden a las muestras analizadas para la primer etapa de muestreo. Los valores promedios de concentración porcentual fueron; FeO 15.16 %, Fe₂O₃ 28.19 %, SiO₂ 22.78 %, CaO 16.30 %, MgO 9.15 %, Al₂O₃ 6.07 %, MnO 1.35 %, Cr₂O₃ 0.12 %, CuO 0.08 % y NiO 0.02 %. Estos valores se asemejan a los resultados de valor promedio reportados por Sakar, 2010 y Gómes, 2006 para compuestos óxidos en escoria provenientes de HAE. En Brasil, Polese *et al* (2006) realizó una caracterización microestructural de escoria de acería de HAE donde obtuvo valores promedios de Fe₂O₃ 31.02 %, SiO₂ 16.47 %, CaO 37.78 %, MgO 4.81 % y Al₂O₃ 5.76 %. Estos resultados muestran también que los óxidos de calcio y magnesio libre, son los principales responsables de la expansión de la escoria de acería.

Los resultados promedios de la composición porcentual en peso de los óxidos metálicos presentes en la escoria de la PSDM son resultados similares a los valores promedios encontrados por Abu *et al.*, 2012 (SiO₂ 17.23 %, FeO 20.04 %, MgO 9.23 %, Al₂O₃ 4.08 %, MnO 0.70 % y CaO 39.62 %). Este último con un valor de % CaO mayor al encontrado en la PSDM. La elevada concentración porcentual de CaO en escoria puede deberse a la operación y eficiencia del horno eléctrico, así como, a la adición excesiva de cal viva (CaO) y cal hidratada (CaOH), al horno para proteger el refractario. Así como también, cuando en el interior del HAE existe escoria espumosa que arrastra estos compuestos de calcio fuera del horno adheridos en la escoria.. Los valores promedios encontrados por Iacobescu *et al.*, 2011 fueron; SiO₂ 18.10 %, FeO 26.30 %, MgO 2.53 %, Al₂O₃ 13.30 %, MnO 3.94 % y CaO 32.50 %.

Tabla 11. Resultados de composición porcentual de la escoria (primera etapa)

No. Muestra	% FeO	%Fe ₂ O ₃	%SiO ₂	%CaO	% MgO	%Al ₂ O ₃	%MnO	%Cr ₂ O ₃	%CuO	%NiO
E1	20.59	38.29	20.34	17.51	10.36	6.57	2.27	0.19	0.06	0.01
E2	17.37	32.31	18.20	24.51	10.78	6.31	1.29	0.10	0.06	0.02
E3	23.17	43.08	14.08	19.61	9.29	5.23	1.91	0.17	0.08	0.02
E4	22.31	41.48	18.66	17.51	11.19	5.41	2.01	0.16	0.08	0.02
E5	16.30	30.31	18.82	16.81	10.61	5.30	1.96	0.15	0.05	0.01
E6	15.87	29.52	31.32	10.50	5.64	6.96	1.03	0.10	0.09	0.03
E7	11.15	20.74	28.91	12.60	7.46	6.78	0.98	0.08	0.11	0.03
E8	14.59	27.12	28.64	15.40	7.96	6.96	0.93	0.08	0.10	0.03
E9	18.02	33.51	15.79	23.81	11.19	4.54	1.14	0.08	0.07	0.02
E10	19.30	35.90	18.74	14.00	6.96	5.64	2.17	0.15	0.07	0.02
E11	15.87	29.52	27.30	11.90	4.97	8.18	1.45	0.09	0.10	0.03
E12	9.65	17.95	21.44	27.31	13.27	6.16	0.88	0.06	0.05	0.02
E13	15.01	27.92	26.63	15.40	9.95	7.54	1.03	0.09	0.10	0.03
E14	18.02	33.51	16.11	18.21	8.95	4.74	2.17	0.17	0.08	0.02
E15	15.44	28.72	20.53	7.70	6.08	4.48	2.17	0.16	0.07	0.01
E16	15.44	28.72	20.15	14.00	6.80	6.50	1.29	0.19	0.10	0.02
E17	14.16	26.33	38.81	2.62	2.69	10.61	0.52	0.13	0.17	0.05
E18	14.16	26.33	39.61	4.38	2.69	8.84	0.34	0.06	0.13	0.04
E19	10.51	19.54	21.41	21.01	9.12	6.12	1.29	0.13	0.05	0.02
E20	15.01	27.92	20.37	16.81	9.12	4.60	1.65	0.10	0.05	0.02
E21	8.15	15.16	18.31	23.81	13.27	4.90	0.93	0.07	0.03	0.01
E22	10.94	20.34	17.40	15.40	11.94	4.01	0.98	0.07	0.03	0.01
E23	9.65	17.95	26.63	19.61	14.09	5.60	0.93	0.08	0.06	0.02
E24	12.87	23.93	20.58	20.31	12.44	5.15	1.19	0.10	0.06	0.02
E25	15.44	28.72	20.64	16.81	11.94	4.65	1.24	0.11	0.06	0.02
Promedio (N=25)	15.16	28.19	22.78	16.30	9.15	6.07	1.35	0.12	0.08	0.02
Desv. Std	3.87	7.19	6.65	5.96	3.14	1.54	0.55	0.04	0.03	0.01
I.C. 95%	1.59	2.96	2.74	2.45	1.30	0.63	0.22	0.02	0.01	0.004
Lim. Inferior	13.57	25.23	20.04	13.85	7.86	5.44	1.13	0.10	0.06	0.02
Lim. Superior	16.75	31.15	25.52	18.75	10.45	6.70	1.57	0.13	0.09	0.03
Max	23.17	43.08	39.61	27.31	14.09	10.61	2.27	0.19	0.17	0.05
Min	8.15	15.16	14.08	2.62	2.69	4.01	0.34	0.06	0.03	0.01

La Figura 35 ilustra la concentración porcentual en peso de los óxidos presentes en la escoria de la PSDM con valores porcentuales promedios de Fe₂O₃ 28.19 %, SiO₂ 22.78 %, CaO 16.3 %, FeO 15.16 %, MgO 9.15 %, y Al₂O₃ 6.07 %, y el resto en concentraciones inferiores al 2 %, para MnO 0.34 %, Cr₂O₃ 0.06 %, CuO 0.03 % y NiO 0.01 %, así como otros óxidos en concentraciones trazas que se encuentran integrados en la escoria.

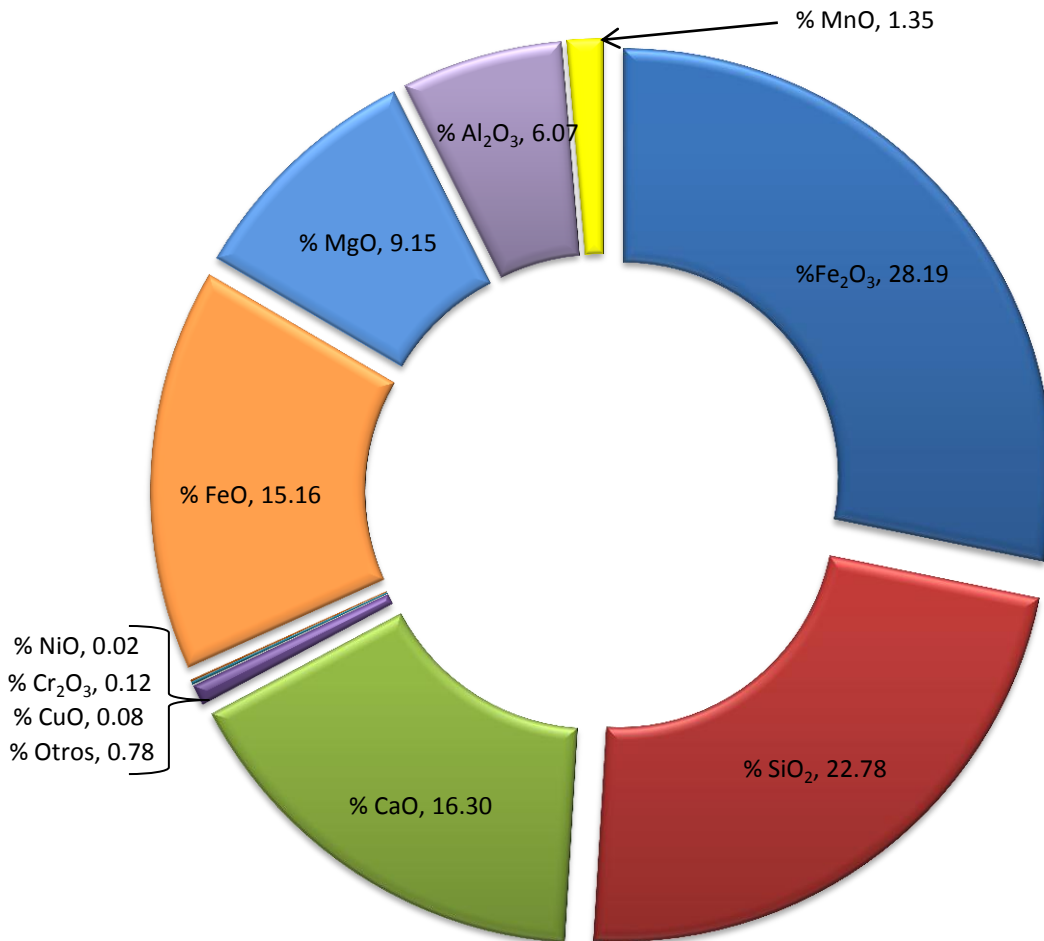


Figura 35. Resultados de concentración porcentual de óxidos metálicos en escoria (Primera etapa)

5.3 Resultados de análisis de metales en muestras de escoria de la segunda etapa

Los resultados del análisis de concentración de metales en escoria para la segunda etapa de muestreo de escoria de HAE se presentan en la Tabla 12. Para muestras de escoria de la segunda etapa se obtuvieron valores promedios de concentración de metal total en; Fe 123.04 g/kg, Ca 142.64 g/kg, Si 84.85 g/kg, Mg 67.31 g/kg, Al 17.70 g/kg y Mn 15.02 g/kg. Por consiguiente en el sitio de disposición obtenemos un volumen elevado de metales, si se multiplica la concentración por el volumen promedio de generación anual de escoria HAE de la PSDM, cuya estimación anual es de 25,500 toneladas de escoria.

Se obtuvo también un elevado contenido de concentración en metal total para Cr, Cu, Ni, Pb, Cd, Hg y As, cuyos valores promedio no rebasaron el 1 g/kg de escoria.

En la Tabla 12 se observa que ciertos metales para muestras de escoria de profundidad de 0 a 30 cm presentaron caídas de concentración durante esta primera sección del perfil vertical (ver Figura 36). Es decir, ocurrió un fenómeno de reducción de concentración para metales como; Fe, Ca y Mg debido a la erosión y/o degradación éste residuo. El bajo porcentaje de concentración para dichos elementos, también se adjuntó a la precipitación pluvial. Esto ocurre cuando el agua de lluvia cae disolviendo dióxido de carbono (CO_2) del aire y forma ácido carbónico (H_2CO_3), por lo que se acidifica ligeramente. Este ácido reacciona con los iones de Ca y Mg presentes, y otros cationes como el aluminio (Al^{3+}) y el hierro (Fe^{3+}). El comportamiento descrito anteriormente se refleja en la Figura 36, así mismo, se muestra el comportamiento de concentración en g/kg para otros elementos como Si, Cr, Cu y Mn contenidos en la escoria HAE.

Las concentraciones encontradas durante el análisis de este residuo hacen posible pensar en procesos factibles integrar este residuo como materia prima para otros procesos dándole un valor agregado al ser valorizado, lo cual convertirá este paso en un gran ahorro e impulso económico a la PSDM, B.C.

Tabla 12. Resultados de concentración promedio de metales totales de tres réplicas de cada muestra para escoria a diferentes profundidades

No. Muestra	Profundidad	Elemento (g/kg)											
		Fe	Mn	Mg	Ca	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Pb	Cd	Hg
E6	0 - 30 cm	123.33	8.00	34.00	74.99	146.25	23.80	0.34	0.74	0.24	1.02	0.017	0.0005
	30 - 75 cm	150.00	11.86	100.00	184.99	68.25	18.26	0.30	0.60	0.15	1.17	0.029	0.0004
	75 - 105 cm	130.00	12.00	100.00	164.99	76.75	15.52	0.28	0.52	0.16	0.98	0.025	0.0005
E7	0 - 30 cm	86.66	7.60	45.00	89.99	135.00	23.20	0.26	0.84	0.24	0.88	0.018	0.0013
	30 - 75 cm	160.00	13.20	85.00	189.99	67.63	17.76	0.30	0.49	0.13	0.72	0.024	0.0007
	75 - 105 cm	140.00	15.20	86.66	209.99	72.63	17.80	0.42	0.49	0.12	1.04	0.035	0.0007
E10	0 - 30 cm	150.00	16.80	42.00	99.99	87.50	19.30	0.52	0.55	0.16	0.94	0.017	0.0001
	30 - 75 cm	130.00	9.60	85.00	179.99	73.25	15.04	0.28	0.61	0.17	0.70	0.019	0.0003
	75 - 105 cm	145.00	8.80	86.66	184.99	73.88	16.38	0.28	0.67	0.19	0.78	0.022	0.0003
E13	0 - 30 cm	116.66	8.00	60.00	109.99	124.38	25.80	0.32	0.76	0.23	0.76	0.015	0.0005
	30 - 75 cm	150.00	22.40	85.00	184.99	66.13	16.60	0.64	0.45	0.08	1.23	0.019	0.0003
	75 - 105 cm	110.00	23.20	65.00	174.99	71.50	16.00	0.60	0.39	0.07	0.78	0.015	0.0004
E15	0 - 30 cm	120.00	16.80	36.66	54.99	95.88	15.32	0.56	0.54	0.10	2.00	0.033	0.0001
	30 - 75 cm	75.00	22.13	60.00	144.99	68.38	14.78	0.91	0.31	0.16	0.54	0.075	0.0003
	75 - 105 cm	100.00	20.93	55.00	119.99	73.25	14.92	0.82	0.37	0.10	0.82	0.016	0.0002
	105 -150 cm	110.00	20.26	58.33	129.99	70.25	14.90	0.79	0.45	0.11	0.97	0.017	0.0002
	150 -210 cm	95.00	18.53	60.00	124.99	71.50	15.58	0.64	0.43	0.10	1.49	0.023	0.0003
Promedio (N=17)		123.04	15.02	67.31	142.64	84.85	17.70	0.49	0.54	0.15	0.99	0.02	0.0004
Desv. Std		24.69	4.22	18.96	46.10	25.43	5.27	0.14	0.24	0.05	0.35	0.014	0.0003
I.C 95%		12.70	2.17	9.75	23.71	13.08	2.71	0.07	0.13	0.03	0.018	0.01	0.0001
Lim. Inferior		110.34	12.85	57.56	118.93	71.77	15.00	0.41	0.42	0.12	0.810	0.01	0.0003
Lim. Superior		135.73	17.19	77.06	166.35	97.92	20.41	0.56	0.67	0.18	1.170	0.03	0.0005
Máx		160.00	23.20	100.00	209.99	146.25	25.80	0.91	0.84	0.24	2.00	0.08	0.0013
Min		75.00	7.60	34.00	54.99	66.13	14.78	0.26	0.31	0.07	0.54	0.01	0.0001

Las Figura 36 y 37 muestran valores de concentración promedio de metal total de las muestras analizadas durante la segunda etapa. Dichos valores presentaron un comportamiento similar a los valores de concentración de metales analizados en la primera etapa, lo cual significa que la variación de la concentración de cada metal con respecto a la profundidad del punto muestreado no es significativa.

No así para muestras de 0 a 30 cm de profundidad, las cuales si presentan caídas de concentración en Ca, Mg y Fe como se muestra en la Figura 36. La Figura 37 presenta los valores de concentración de metales pesados de las muestras de la segunda etapa.

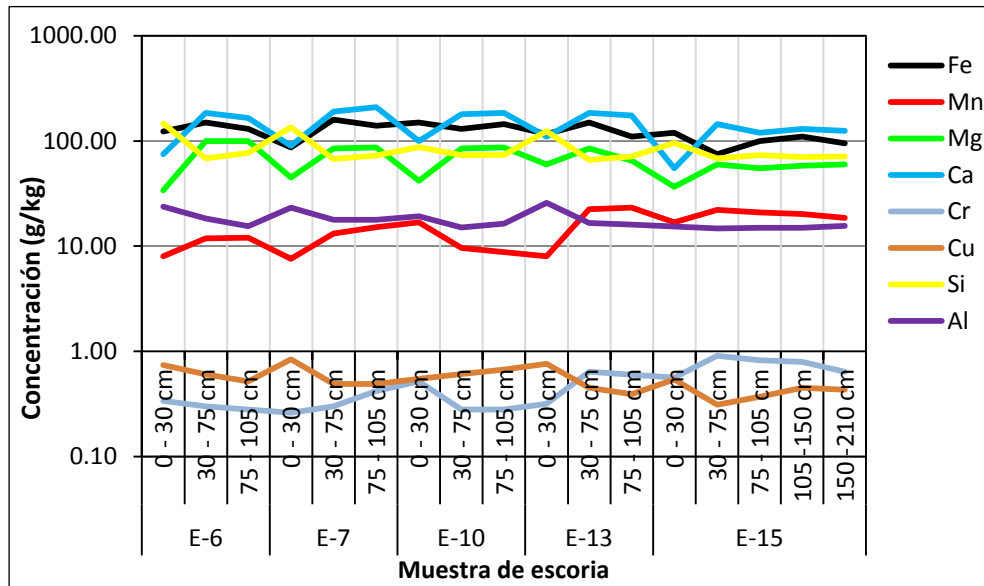


Figura 36. Concentración promedio de metales total en escoria HAE (segunda etapa)

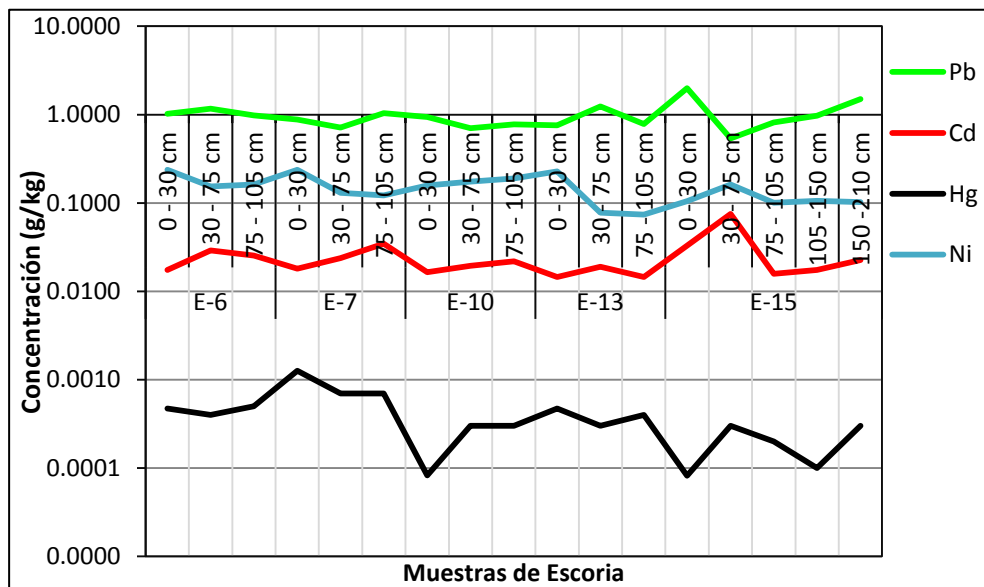


Figura 37. Concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE (segunda etapa)

5.3.1 Resultados de composición porcentual de metales totales en forma de óxidos

La obtención de los valores en concentración porcentual para las muestras de escoria que se presentan en la Tabla 13, se realizaron a partir de cálculos estequiométricos. Se calculó una distribución de probabilidad t-student para un total de 17 datos, con un intervalo de confianza (I.C.) del 95 %. Los datos de la Tabla 13, son valores promedios de composición porcentual de la segunda etapa de muestreo de escoria. A partir del tratamiento estadístico t-student se obtuvieron los siguientes resultados; FeO 15.83 ± 1.63 %, Fe_2O_3 27.45 ± 3.04 %, SiO_2 18.17 ± 2.08 %, CaO 19.98 ± 3.32 %, MgO 11.16 ± 1.84 %, Al_2O_3 5.17 ± 0.52 %, MnO 1.94 ± 0.37 %, Cr_2O_3 0.14 ± 0.03 %, CuO 0.07 ± 0.01 % y NiO 0.02 ± 0.003 %. Estos intervalos indican los valores de concentración promedio con probabilidad igual al 95% para cada óxido metálico en escoria de HAE de la segunda etapa.

Por otra parte también se encontró el promedio de distribución porcentual de metales óxidos en escoria con valores de FeO 15.83 %, Fe_2O_3 27.45 %, SiO_2 18.17 %, CaO 19.98 %, MgO 11.16 %, Al_2O_3 5.17 %, MnO 1.94 %, Cr_2O_3 0.14 %, CuO 0.07 % y NiO 0.02 %. Dichos valores de concentración porcentual son similares a los resultados obtenidos durante la primera etapa de muestreo cuyos valores fueron de; FeO 15.16 %, Fe_2O_3 28.19 %, SiO_2 22.78 %, CaO 16.3 %, MgO 9.15 %, Al_2O_3 6.07 %, MnO 1.35 %, Cr_2O_3 0.12 %, CuO 0.08 % y NiO 0.02 %. De ahí, que se puede destacar que la concentración porcentual en óxidos en escoria de HAE para la PSDM, no presenta variación con respecto a la profundidad de toma de muestra. Así mismo, se puede deducir que el control en los contenidos de material metálico agregado al horno de fundición es muy estandarizado, por lo que la escoria no presenta gran desviación con respecto a su composición porcentual en forma óxida.

El resultado promedio de composición para óxidos en escoria de las dos etapas es de FeO 15.50 %, Fe_2O_3 27.82 %, SiO_2 20.47 %, CaO 18.16 %, MgO 10.16 %, Al_2O_3 5.62 %, MnO 1.64 %, Cr_2O_3 0.13 %, CuO 0.07 % y NiO 0.02 %.

Tabla 13. Resultados de composición porcentual de la escoria (segunda etapa)

No. Muestra	Profundidad	% FeO	%Fe ₂ O ₃	% SiO ₂	% CaO	% MgO	% Al ₂ O ₃	% MnO	% Cr ₂ O ₃	% CuO	% NiO
E-6	0 - 30 cm	15.87	27.52	31.32	10.50	5.64	6.96	1.03	0.10	0.09	0.03
	30 - 75 cm	19.30	33.90	14.61	25.91	16.58	5.34	1.53	0.09	0.08	0.02
	75 - 105 cm	16.73	29.11	16.43	23.11	16.58	4.54	1.55	0.08	0.06	0.02
E-7	0 - 30 cm	11.15	18.74	28.91	12.60	7.46	6.78	0.98	0.08	0.11	0.03
	30 - 75 cm	20.59	36.29	14.48	26.61	14.10	5.19	1.70	0.09	0.06	0.02
	75 - 105 cm	18.02	31.51	15.55	29.41	14.37	5.20	1.96	0.12	0.06	0.02
E-10	0 - 30 cm	19.30	33.90	18.74	14.00	6.96	5.64	2.17	0.15	0.07	0.02
	30 - 75 cm	16.73	29.11	15.69	25.21	14.10	4.40	1.24	0.08	0.08	0.02
	75 - 105 cm	18.66	32.70	15.82	25.91	14.37	4.79	1.14	0.08	0.08	0.02
E-13	0 - 30 cm	15.01	25.92	26.63	15.40	9.95	7.54	1.03	0.09	0.10	0.03
	30 - 75 cm	19.30	33.90	14.16	25.91	14.10	4.85	2.89	0.19	0.06	0.01
	75 - 105 cm	14.16	24.33	15.31	24.51	10.78	4.68	3.00	0.18	0.05	0.01
E-15	0 - 30 cm	15.44	26.72	20.53	7.70	6.08	4.48	2.17	0.16	0.07	0.01
	30 - 75 cm	9.65	15.95	14.64	20.31	9.95	4.32	2.86	0.26	0.04	0.02
	75 - 105 cm	12.87	21.93	15.69	16.81	9.12	4.36	2.70	0.24	0.05	0.01
	105 -150 cm	14.16	24.33	15.04	18.21	9.67	4.36	2.62	0.23	0.06	0.01
	150 -210 cm	12.23	20.74	15.31	17.51	9.95	4.55	2.39	0.19	0.05	0.01
Promedio (N=17)		15.83	27.45	18.17	19.98	11.16	5.17	1.94	0.14	0.07	0.02
Desv. Std		3.18	5.91	5.44	6.46	3.57	1.00	0.72	0.06	0.02	0.01
I.C. 95 %		1.63	3.04	2.80	3.32	1.84	0.52	0.37	0.03	0.01	0.003
Lim. Inferior		14.20	24.41	15.37	16.66	9.33	4.66	1.57	0.11	0.06	0.02
Lim. Superior		17.47	30.48	20.97	23.30	13.00	5.69	2.31	0.17	0.08	0.02
Max		20.59	36.29	31.32	29.41	16.58	7.54	3.00	0.26	0.11	0.03
Min		9.65	15.95	14.16	7.70	5.64	4.32	0.98	0.08	0.04	0.01

La Figura 38 esquematiza los resultados de concentración promedio porcentual de óxidos metálicos para las muestras de escoria de la segunda etapa de muestreo de la PSDM.

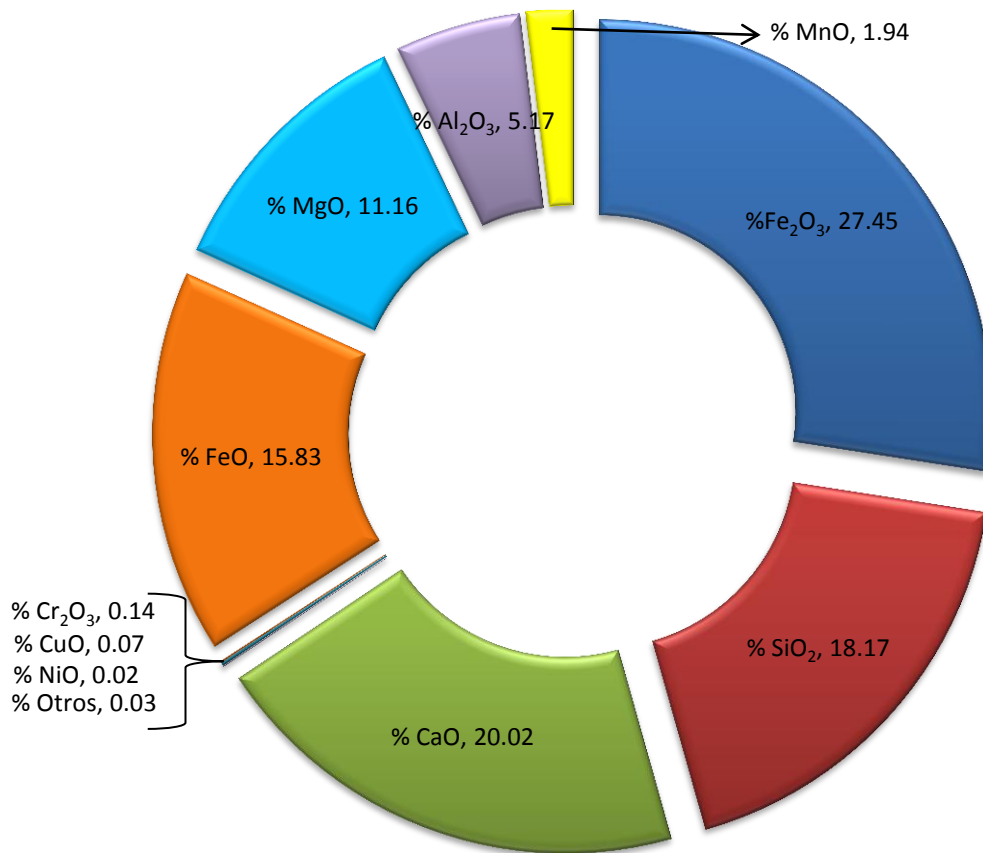


Figura 38. Resultados de concentración porcentual de óxidos metálicos en escoria (segunda etapa)

Baricova *et al* (2012) realizó un estudio para la producción de mezclas de concretos donde caracterizó la escoria de HAE con valores de concentración de FeO 14.22 %, Fe₂O₃ 27.73 %, SiO₂ 12.36 %, CaO 24.44 %, MgO 6.93 %, Al₂O₃ 5.25 % y MnO 5.59 %, cuyos valores son próximos a los mostrados en la Figura 38.

5.4 Resultados de concentración de metales totales en tierra ferrosa

Durante el desarrollo de la investigación se encontró un material llamado *tierra ferrosa*, cuya composición química fue necesaria caracterizar debido a que este residuo alteró los datos de los resultados obtenidos durante la primera etapa para algunas muestras de escoria para el intervalo E15 al E18, que presentaron caídas y elevaciones notorias en la concentración de los metales analizados. De ahí surgió la necesidad de realizar la segunda etapa de muestreo de escoria.

Los resultados presentados en la Tabla 14, son valores concentración promedios en gramos de metal por cada kilogramo de tierra ferrosa (g/kg), resultado de tres replicaciones. Tales valores de concentración promedio de los elementos analizados en tierra ferrosa presentados en la tabla 8, corresponden a; Fe 78.66 g/kg, Si 254.58 g/kg, Al 26.36 g/kg, Pb 1.34 g/kg, Cu 1.30 g/kg y Cr 0.32 g/kg. Dichos valores de concentración en metal total son superiores a los valores detectados en muestras de escoria para ambas etapas. Así mismo, la tierra ferrosa, presentó valores inferiores en contenidos de metales totales con respecto a las concentraciones de escoria, entre los que se encuentran; Mg 4.53 g/kg, Mn 1.09 g/kg, Ca 0.88 g/kg, Ni 0.41 g/kg, Cd 0.023 g/kg, Hg 0.0001 g/kg y As no detectado dentro del análisis.

Tabla 14. Resultados de concentración de metales totales en tierra ferrosa

No. Muestra	Elemento (g/kg)												
	Fe	Mn	Mg	Ca	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Pb	Cd	Hg	As
Tierra Ferrosa 1	72.00	1.09	4.80	0.75	261.75	28.60	0.24	1.23	0.34	1.29	0.022	0.0001	ND
Tierra Ferrosa 2	76.00	1.10	4.40	0.75	267.75	27.56	0.36	1.23	0.42	1.33	0.021	0.0001	ND
Tierra Ferrosa 3	88.00	1.08	4.40	1.15	234.25	24.88	0.36	1.43	0.48	1.41	0.026	0.0001	ND
Promedio	78.66	1.09	4.53	0.88	254.58	26.36	0.32	1.30	0.41	1.34	0.023	0.0001	ND
Desv. Std	8.33	0.01	0.23	0.23	17.86	1.92	0.07	0.12	0.07	0.06	0.003	0.0000	ND

ND= No Detectado

5.4.1 Análisis comparativo de concentración de metales totales en escoria con concentración de metales totales en tierra ferrosa

En la Tabla 15, se muestra un comparativo de las concentraciones promedios de metal total en g/kg detectados en escoria para la primera y segunda etapa, y se realiza un comparativo con la concentración en g/kg de metal total determinados en tierra ferrosa.

Tabla 15. Comparativo de resultados de concentración de metales totales en escoria y tierra ferrosa

Tipo de muestra	Elemento (g/kg)												
	Fe	Mn	Mg	Ca	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Pb	Cd	Hg	As
Tierra ferrosa	78.66	1.09	4.53	0.88	254.58	26.36	0.32	1.3	0.41	1.34	0.023	0.0001	ND
Escoria 1C	117.80	10.46	55.18	116.39	106.37	20.77	0.39	0.61	0.18	0.99	0.020	0.0003	0.0065
Escoria 2C	123.04	15.02	67.31	142.64	84.85	17.70	0.49	0.54	0.15	0.99	0.020	0.0003	ND

Escoria 1C= Resultados del análisis de escoria de la primera etapa

Escoria 2C= Resultados del análisis de escoria de la segunda etapa

ND= No Detectado

Las Figuras 39 y 40 presentan el comportamiento de los niveles de concentración de metales totales presentes en la escoria y tierra ferrosa. En ambas figuras se observa un comportamiento similar en escoria de la primera etapa y segunda etapa. Así mismo, en la Figura 39 se observaron bajas concentraciones de metales como Ca, Mg y Mn para tierra ferrosa, así mismo, concentraciones elevadas de fierro (Fe) y silicio (Si), para dicho residuo. Este último con un valor promedio de concentración de Si 254.58 g/kg, lo cual representa el doble de la concentración obtenida en muestras de escoria de la PSDM. Por otro lado, la concentración de Fe 78.66 g/kg en tierra ferrosa, indica que este residuo proviene de un proceso metalúrgico.

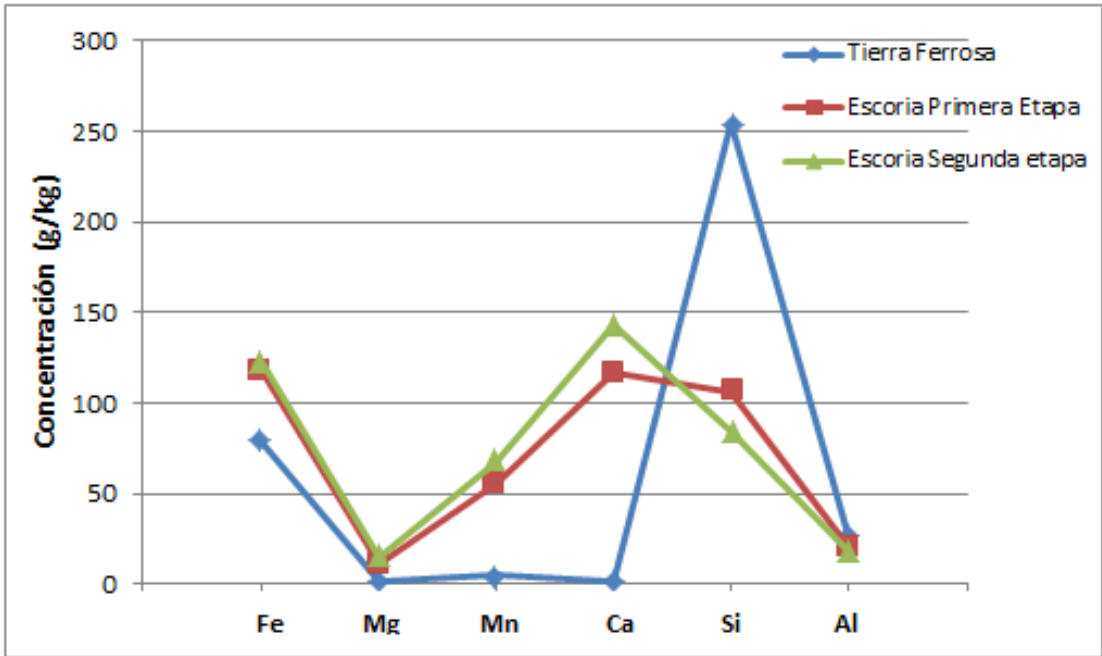


Figura 39. Concentración promedio de metal total en escoria HAE y tierra ferrosa

La Figura 40, describe el comportamiento de la concentración de metales pesados en bajas concentraciones encontradas en escoria y tierra ferrosa. Donde se encontró valores de concentración promedio de Cu 1.30 g/kg, Ni 0.41 g/kg y Pb 1.34 g/kg con niveles superiores a los valores promedios de concentración de las muestras de escoria de ambas etapas.

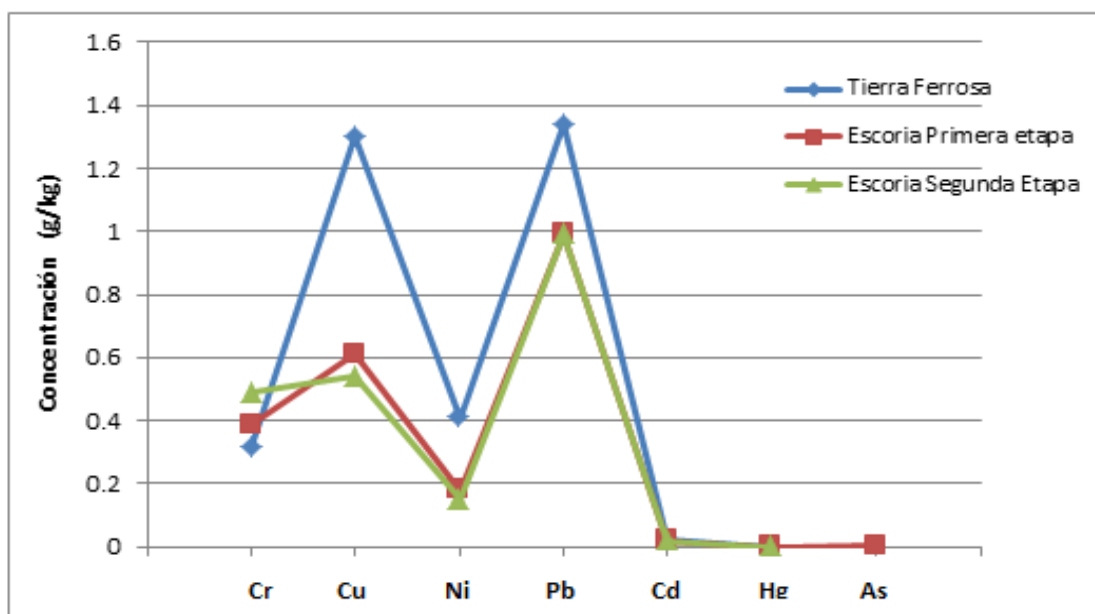


Figura 40. Concentración promedio de metales pesados total en escoria HAE y tierra ferrosa

5.5 Resultados de concentración de metales totales en suelo

Los resultados obtenidos de la concentración para metales presentes en suelo se presentan en la Tabla 16, para los cuales se obtuvieron valores de concentración bajas en comparación con los valores de concentración de muestras de escoria. Encontrando un suelo rico en minerales de Fe, Ca, Mg, Al, Si y Ni. Este último con mayor concentración promedio en suelo; Ni 20.67 g/kg de suelo, en tanto que en muestras de escoria el valor no superó los 0.42 g/kg. Por otro lado, para el caso específico del punto S1 testigo, se encontró un ligero aumento en la concentración de Fe y Ca con respecto a los puntos S2 y S3. Este fenómeno se debe a que el punto S1 se encontraba directamente expuesto y próximo a la escoria, y que por efecto de la erosión y el desgaste del residuo aumentó la composición mineralógica del suelo.

Tabla 16. Resultados de concentración promedio de metales totales de tres réplicas en muestras de suelo

No. Muestra	Elemento (g/kg)												
	Fe	Mn	Mg	Ca	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Pb	Cd	Hg	As
Suelo S1	55.00	0.48	18.13	64.99	30.00	31.20	0.03	0.07	22.00	0.04	0.001	ND	0.003
Suelo S2	20.00	0.44	19.20	54.99	29.98	34.60	0.03	0.03	20.00	0.04	0.001	ND	0.004
Suelo S3	25.00	0.46	20.00	62.25	34.99	28.60	0.04	0.02	20.00	0.03	0.001	ND	ND
Promedio	33.33	0.46	19.11	60.74	31.66	26.36	0.03	0.04	20.67	0.04	0.001	ND	ND

ND= No detectado

5.5.1 Análisis comparativo de concentración de metales totales en suelo con los límites máximos permisibles (LMP)

Los resultados del análisis de muestras de suelo testigo presentan valores inferiores a los establecidos en la NOM-052-SEMARNAT 2005, en relación a concentración de metales pesados para residuos peligrosos. Los valores presentados en la Tabla 17, son valores de concentración de metal total en suelo tomado como blanco testigo y control con respecto a los resultados de concentración de metales pesados determinados en muestras de escoria.

Tabla 17. Comparativo de resultados de concentración de metales totales en suelo con los límites máximos permisibles (LMP)

No. Muestra	mg/l				
	Cd	Pb	Cr	Hg	As
Suelo S1	0.07	1.9	1.65	0.0014	0.0031
Suelo S2	0.07	1.9	1.58	0.0010	0.0039
Suelo S3	0.07	1.6	2.00	0.0012	0.0033
Promedio	0.07	1.80	1.74	0.0012	0.0034
LMP (NOM-052 SEMARNAT-2005)	1.0	5.0	5.0	0.2	5.0

5.6 Análisis comparativo de escoria HAE

5.6.1 Análisis comparativo de composición porcentual de escoria con otros estudios

Los datos obtenidos en el presente estudio se han comparado con algunos datos registrados por otros autores para composición porcentual de metales en escoria de HAE en relación a reuso y valorización de este tipo de residuo en diferentes procesos como son; medio filtrantes en agua, elaboración de cementos, vitrocerámicas y relleno de carreteras como material granulado.

La escoria de la PSDM presenta composiciones similares a las encontradas en diversos procesos donde se ha estado utilizando, dando un valor agregado a este residuo del proceso de fundición del acero para otros procesos productivos. Sin embargo, es necesario llevar a cabo pruebas con este residuo para determinar el grado de factibilidad de este residuo en procesos como; elaboración de cemento, vitrocerámicas y mezclas asfálticas. En la Tabla 18 se presentan los resultados de composición química porcentual promedio en muestras de escoria para la primera y segunda etapa, así como resultados obtenidos en otros estudios.

Tabla 18. Composición porcentual de escoria de la PSDM y resultados de otros estudios

Composición Química (%)	PSDM		INDIA (Sarkar, 2010)	PORTUGAL (Gomes, 2006)	ITALIA (Pasetto, 2012)	BRASIL (Polese, 2006)
	Primera etapa	Segunda etapa				
FeO	15.16 ± 3.87	15.83 ± 3.18	ND	ND	ND	ND
Fe ₂ O ₃	28.19 ± 7.19	27.45 ± 5.91	42.4	41.2±8	33.84	31.02
SiO ₂	22.78 ± 6.65	18.17 ± 5.44	20.3	ND	13.02	16.47
CaO	16.30 ± 5.96	19.98 ± 6.46	22.8	18.4±0.9	29.6	37.78
MnO	1.35 ± 0.55	1.94 ± 0.72	ND	3.9±0.4	5.09	ND
MgO	9.15 ± 3.14	11.16 ± 3.57	8.0	3.9±0.4	3.65	4.81
Cr ₂ O ₃	0.12 ± 0.04	0.14 ± 0.06	ND	0.95±0.1	4.03	ND
CuO	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02	ND	ND	ND	ND
Al ₂ O ₃	6.07 ± 1.54	5.17 ± 1.00	7.3	5.2±0.8	9.3	5.76
NiO	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	ND	ND	ND	ND

Nd=No determinado

5.6.2 Resultados de concentración de metales tóxicos en escoria de la PSDM

En la Tabla 19 se presentan los resultados promedios de las concentraciones en mg/l de los metales pesados analizados en escoria de la PSDM obtenidos durante las dos etapas. Donde se registraron concentraciones de valores promedios de Pb 49.50 mg/l, Cr 19.73 mg/l, Cd 0.96 mg/l, As 0.327 mg/l y Hg 0.016 mg/l respectivamente. Aunque para Cd, Hg y As no se obtuvieron valores promedios superiores a 1 mg/l; para Cadmio se alcanzó un valor máximo de 4.14 mg/l. Dichos valores en la prueba PECT no rebasaron los límites máximos permisibles por la NOM-052-SEMARNAT-2005

Tabla 19. Resultados de concentración promedio de metales totales en escoria de la primera y segunda etapa.

ESCORIA HAE	Cd	Pb	Cr	Hg	As
	mg/l				
Promedio	0.96	49.50	19.73	0.016	0.327
Máx	4.14	149.90	32.99	0.062	0.640
Min	0.29	13.90	10.89	0.001	0.165
Desv. Std	0.77	31.36	7.01	0.0180	0.1272
I.C 95%	0.30	12.29	2.75	0.0071	0.0499
Lim. Superior	1.26	61.79	22.48	0.0228	0.3771
Lim. Inferior	0.66	37.21	16.98	0.0087	0.2773

Sin embargo, en lugares de trabajo, el límite permisible promedio de plomo es 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por la jornada de 8 horas (OSHA, Occupational Safety Health Administration, Department of Labor, Washington, DC). Pero, OSHA requiere pruebas de plomo en sangre para trabajadores expuestos a concentraciones de $\geq 30 \mu\text{g}/\text{dL}$ en el aire por más de 30 días al año. Si el nivel sanguíneo es $> 40 \mu\text{g}/\text{dL}$, la compañía debe notificar al empleado por escrito ofreciéndole una evaluación médica. Si el nivel sanguíneo llega a $60 \mu\text{g}/\text{dL}$ o resulta en un promedio de $\geq 50 \mu\text{g}/\text{dL}$ en ≥ 3 pruebas, la compañía debe relevarlo de esa exposición excesiva, manteniendo su sueldo y tiempo de servicio hasta un nivel $< 40 \mu\text{g}/\text{dL}$ (Poma, 2008). De ahí que para la PSDM se encontró valores de Pb $4,900 \mu\text{g}/\text{dL}$, los cuales pueden estar siendo transportados como material particulado al ambiente en el que están trabajando las personas que reciclan la escoria.

5.7 Resultados de concentración de metales de la prueba PECT

5.7.1 Análisis comparativo de concentración de metales pesados con límites máximos permisibles (LMP)

Se realizó la prueba PECT de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, la cual establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de

extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. En la Tabla 20, se muestran los resultados promedio de la prueba PECT para muestras de escoria de la PSDM y otros estudios de acuerdo a la literatura.

Se determinaron concentraciones de metales pesados extractables para la escoria de HAE de la PSDM con concentraciones promedios de Pb 0.3 mg/l, Hg < 0.0025 mg/l, Cd 0.35 mg/l, Cr < 0.5 mg/l y As < 0.002 mg/l. Valores promedios que se encuentran en los rango de concentración de metales pesados determinados por lixiviación analizados por Montgomery (2005) y Pasetto (2012). Todos estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la NOM-052-SEMARNAT-2005. Por lo que se puede afirmar que la escoria no es un residuo peligroso, pero deberá ser considerado como un residuo de manejo especial debido a los grandes volúmenes de generación que presenta la PSDM.

Tabla 20. Resultados de pruebas de lixiviación de escoria de HAE de diferentes fuentes y datos del estudio

COMPARATIVO DE CONCENTRACIÓN EN ESCORIAS DE HAE						
ELEMENTO	ESTUDIO		PAÍS		LÍMITE MÁXIMO PERMISCIBLE	
	PSDM	Suelo	*Chile	**Italia	EPA	México NOM-052
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
As _{Tot}	< 0.002	< 0.002	< 0.5	< 0.05	5	5
Ba	ND	ND	< 0.5	ND	100	100
Cd _{Tot}	0.35	0.2	< 0.01	< 0.005	1	1
Cr _{Tot}	< 0.5	< 0.5	< 0.05	< 0.05	5	5
Pb _{Tot}	0.3	0.2	< 0.05	< 0.05	5	5
Hg _{Tot}	< 0.0025	< 0.0025	< 0.001	< 0.001	0.2	0.2
Se	ND	ND	< 0.5	< 0.01	1	1
Ag _{Tot}	ND	ND	< 0.02	ND	5	Nd
Ni	ND	ND	ND	< 10	Nd	Nd

Fuente: *Montgomery, 2005, **Pasetto, 2012

ND= No Detectado

Nd= No determinado

5.8 Utilización de la escoria

Mediante investigaciones científicas y la actividad práctica se demostró que el procesamiento integral y el uso racional de la escoria y otros residuos metalúrgicos, mejoran los índices económicos de la industria (Lovera, 2004). Algunos países entre los que destacan primordialmente España, Brasil y Estados Unidos han realizado estudios detallados enfocados a la valorización y reutilización de escorias provenientes de industrias siderúrgicas. De acuerdo con Puertas (1993), los modelos y métodos utilizados para la valorización de la escoria siderúrgica, toman aspectos tan variados como; características e influencia de la estructura de su fase vítrea, composición química, mecanismos que rigen su proceso de hidratación, resistencia hidráulica, activadores y mecanismos del proceso de activación.

En Brasil, algunas investigaciones han centrado sus estudios en la valorización de la escoria para producción de vitro-cerámicas, agregado en concretos y cementos. En la producción de vitro-cerámica, Bellini (2002) concluye que es posible obtener cristales a partir de escoria de acero, con un ajuste adecuado de la composición química de la mezcla a través de adiciones de arena y carbonato de sodio. Con una mezcla que contiene 60 % en peso de escoria, 35 % de arena y 5 % Na_2CO_3 .

Rodríguez *et al* (1997) en España, indica que los cementos con escorias, ya sean siderúrgicos o Portland con escorias, tienen ciertas propiedades específicas que los diferencian de los otros tipos de cementos como, por ejemplo; mayor resistencia a los sulfatos, al agua de mar, menores problemas de reacciones y menor calor de hidratación, lo cual los hacen más adecuados para determinados usos. En Argentina, Castellano (2012) evaluó el mecanismo de hidratación y propiedades mecánicas de pastas con contenido variable de escoria granulada, concluye que el aumento del grado de hidratación de las pastas con escoria, se produce cuando se incrementa la relación agua/material cementable (a/mc). Para alcanzar una resistencia similar a la pasta de Cemento Portland, en cada relación a/mc el contenido de escoria que se incorpore al cemento debe ser menor al 20 % con un tiempo de 2 días de envejecimiento. No obstante, el trabajo desarrollado por Castellano (2009) en Chile, mostró que los

cementos con escoria presentan una disminución de la resistencia inicial, que suele limitar su empleo.

Se puede obtener escoria granulada con la característica de endurecerse al contacto con el agua cuando su enfriamiento es rápido y escoria cristalizada si el enfriamiento es lento. El empleo de bases y sub-bases granulares de escoria en las capas que conforman una estructura de pavimento tuvo efectos favorables, ya que incrementan la resistencia y densidad seca. Sin embargo, estos parámetros dependen directamente del tamaño granulométrico de la escoria (Reyes, 2003). Andrade (2010) en Brasil, evaluó la factibilidad de uso de residuos de alto horno con contenidos de zinc para suministro en cultivos de arroz. Sin embargo, la alta correlación entre las concentraciones de zinc, cadmio y el plomo extraídos de los suelos con Ácido Dietilen Triamino Pentaacético (DTPA) y acumulado de éstos en la plantas de arroz, indicó la poca viabilidad del empleo de este residuo siderúrgico para cultivo de arroz por el grado de toxicidad de metales pesados (Cd y Pb).

Otro estudio poco factible fue realizado en Suecia por Johansson (2010) enfocado a la reutilización de escoria de altos hornos de industrias siderúrgicas para la remoción de fósforo (P) en aguas residuales. Las altas tasas de eliminación de fósforo se encontraron en las pruebas de laboratorio, mientras que la baja capacidad de eliminación de fósforo se observó en las pruebas de campo. Los problemas surgidos durante los experimentos están relacionados con la hidráulica, por ejemplo, los efectos de obstrucción y lixiviados posible de metales y azufre.

Adicionalmente el procesamiento de las escorias y su conversión en un producto ayudaría a elevar el grado de eficiencia económica de las empresas metalúrgicas (Valdés *et al*, 2001). Por otro lado, Iacobescu *et al.*, 2011, al igual que Abu *et al.*, 2012 encontró valores factibles para valorizar la escoria en industrias cementeras. Los resultados de composición óxida de la escoria de la PSDM, en ambas etapas de muestro tienen valores promedios muy parecidos e igual similitud en su desviación estándar. Sin embargo, para la segunda etapa donde el muestro se realizó a distintas profundidades, si presentó pequeñas variaciones en su composición porcentual y concentración de metales totales.

Sin embargo, para casos especiales de valorización en procesos de agregados de concreto, vitrocerámicas y mezclas asfálticas, la concentración es poco variable ya que el material es adicionado en este tipo de procesos en forma de mezcla homogénea. Por tanto, considerando los resultados promedios obtenidos para ambas etapas, encontramos valores muy poco variables que hacen posible su utilización, puesto que los valores promedios calculados indican un comportamiento homogéneo de la escoria.

Capítulo VI

Conclusiones

De la presente investigación se puede concluir que:

- La escoria de PSDM tiene concentraciones de metales pesados extractables inferiores a los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Por lo que se determinó que la escoria, no es un residuo peligroso y de acuerdo al volumen de generación anual de escoria está clasificado como residuo de manejo especial.
- El alto contenido de metales totales en la escoria presenta un riesgo para las personas que recolectan este residuo. Debido a la exposición a partículas PM 10 con concentraciones altas de metales pesados.
- La concentración promedio de óxidos metálicos en la escoria para ambas etapas fue similar en todo el volumen de escoria, independientemente de la profundidad a la que se tomó la muestra de la primera y segunda etapa del muestreo.
- Se encontraron valores de concentraciones de metal total para plomo y cromo superiores a los valores establecidos como límites máximos permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Sin embargo, dichos constituyentes tóxicos en el extracto PECT no rebasaron los límites máximos permisibles de la norma. De ahí que la escoria no es considerada como un residuo peligroso.
- De acuerdo con la caracterización fisicoquímica de la escoria se comprobó que ésta mantiene uniformidad con respecto a su composición química, independientemente del grado de acero producido por la PSDM.

- En base a las referencias bibliográficas se puede afirmar que las propiedades físicas y químicas de la escoria son similares a las reportadas en otros estudios similares.

6.1 Recomendaciones

De acuerdo con los resultados y conclusiones de este estudio se han realizado las siguientes recomendaciones:

- Es importante realizar un estudio sobre los riesgos a la salud que puede ocasionar la escoria por exposición, contacto con la piel e inhalación.
- Construir una barda perimetral para confinar el sitio de disposición de escoria y evitar el arrastre partículas hacia áreas de cultivo o comunidades cercanas.
- Se recomienda mejorar la seguridad y vigilancia del sitio de disposición para evitar que las personas que trabajan recolectando este residuo entren al sitio de disposición.
- Formular un plan de manejo de residuos, considerando los elementos y procedimientos con respecto al PROY-NOM-160-SEMARNAT-2011. De tal forma que cuando entre en vigor, la empresa cumpla con los requisitos establecidos por dicha norma. Esto contribuirá en el desarrollo de mejores prácticas para su proceso y el cumplimiento ante las autoridades regulatorias.
- Buscar alternativas con otras empresas para crear una simbiosis, donde el residuo de su proceso sea una materia prima para la otra empresa. Entre éstas se pueden citar; industrias cementeras, de construcción, elaboradoras de materiales vítreos (vitrocerámicas) o industrias que se dedican a la recuperación de metales.
- Acondicionar el terreno para evitar que los metales extractables se transporten a los cuerpos de agua subterráneos y superficiales.

Referencias bibliográficas

1. Abu-Eishah, Samir I.; El-Dieb, Amr S & Bedir Mostafa S. (2012). *Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf región*. Construction and Building Materials, 34, 249-256.
2. Amaral, de L., Luciana & Vázquez R., Enric (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tesis de doctorado en Ingeniería. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
3. ASTM (2004). ASTM C128-04a. Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos.
4. ASTM (1993). ASTM C 136-01. Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso.
5. ASTM (2003). ASTM C702 AASHTO T248. Reducción de muestras a agregados a tamaño de ensayo (Método B: Cuarteo).
6. Baptista, P.L., Aparecido, V.E., Soares, T.J., Fiorotti, P.R. & Oliveira, J. (2011). *Caracterização da mistura de residuos de granito e escória de aciaria LD*. Metalurgia y materiales, 64(2), 169-174.
7. Baricova, D., Pribulová, A., Demeter, P., Bul'ko, B., & Rosova, A. (2012). *Utilizing of the metallurgical slag for production of cementless concrete mixtures*. Metalurgija, 51(4), 465-468.
8. Berridi, A. Iokin (2008). *Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón*. Tesis. Barcelona, España.

9. Boza, R. Maile (2011). *Utilización de las escorias de acería como material de construcción*. *Ciencia & futuro*. 1(4), 31-40.
10. CANACERO (2006). *Escorias*. Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero. 1-14. Recuperado de: <http://www.cmic.org/mnsectores/Agua/Semarnat/canacero/> ESCORIAS 2006. Consultado: 20 de septiembre de 2012.
11. Cañas, G. Jordi (2012). *Estudio del comportamiento de hormigones con áridos siderúrgicos de horno eléctrico*. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 4-18.
12. Carrasco, M.F., Bonavetti, V.L., Menéndez, G. & Irassar, E.F. (2007). *Contracción por secado de cementos a medida con material calcáreo y escoria granulada de alto horno*. *Revista de la construcción*, 6(1), 73-87.
13. Carrasco, M. M. (2002). *La gestión ambiental de los residuos peligrosos generados por la industria maquiladora en Mexicali, Baja California*. Tesis de Maestría. Universidad Iberoamericana Tijuana, Tijuana, B.C.
14. Casaravilla, G., Briozzo, C., & Watanabe, E. H. (2000). *Filtro activo de mínimo costo ajustado a la carga de un horno de arco y a las reglamentaciones sobre emisión armónica aplicables*. In XIII CBA-Brazilian Conference on Automatic Control (pp. 1108-1113).
15. Castellano, C., Bonavetti, V.L., & Irassar E. (2009). *Influencia de la finura de la escoria y la temperatura de curado sobre la Resistencia de pastas de cemento mezcla*. *Revista de la construcción*, 8(2), 120-128.
16. CATEDU (2014). Centro Aragonés de Tecnología para la Educación. Gobierno de Aragón, España. Obtenido de: www.catedu.es/tecnologiautrillas/materiales/web3.htm. Consultado: 08 de Abril del 2014.

17. Chavéz, O. C (2013). Política ambiental / prevención y gestión integral de residuos 2013 – 2018. Primer encuentro de los actores en la gestión de los residuos urbanos. SEMARNAT, México, D.F, 25 de abril del 2013.
18. Chiquito Guamanquispe, L. E., & Martinez Lozano, E. R. (2009). *Diseño de un sistema de extracción de humos y polvos secundarios para el proceso de producción de acero mediante horno de arco eléctrico*. Tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
19. Della, V.P., Junkes, J.A., Kuhn, I., Hiella, H.G., & Hotza, D. (2005). *Utilización de subproductos de recuperación de escoria metálica de aceros inoxidables en síntesis de pigmentos cerámicos: caracterización de materia prima*. *Cerámica*, 51, 111-116.
20. de la Federación, D. O. (2007). *La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)*. Diario Oficial de la Federación, 28.
21. de la Federación, D. O. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. Diario Oficial de la Federación, publicado el 7 de junio del 2013.
22. ECOL (1993). NOM-054-ECOL-1993. Que establece los procedimientos para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la NOM-052-ECOL-1993.
23. EPA (1996). Método 3050B: Procedimiento de digestión ácida para la recuperación de metales totales disueltos en sedimentos, suelo y lodos para el análisis por espectrofotometría de absorción atómica por flama (FLAA). Revisión 2 diciembre de 1996.
24. Frías, M., San-José, J.T. & Vegas, I. (2010). *Steel slag aggregate in concrete: the effect of ageing on potentially expansive compounds*. *Materiales de construcción*, 60(297), 33-46.

25. García, G.J., Correcher, V., Recio, V.L., Crespo, F.E., González, M.R. & Tormo, L. (2012). *Influencia de la acumulación de escoria de acero en el medio ambiente: determinación de metales pesados en sólidos*. Revista de la academia de ciencias brasileña, 82(2), 267-277.
26. García, J. F. A. (1999). *Reflexiones críticas sobre la nueva Ley de Residuos*. Medio Ambiente & Derecho: Revista electrónica de derecho ambiental, (3), 3.
27. Gomes, J. F. P. & Pinto, C. G. (2006). *Leaching of heavy metals from steelmaking slags*. Revista de metalurgia, 42 (6), noviembre-diciembre, pp. 409-416.
28. González, O. M. (2011). *Caracterización experimental de escorias negras de alto horno*. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 5-40.
29. Grupo Simec (2012). *Grupo Simec: líder en aceros especiales (SBQ) en Norteamérica*. Recuperado de <http://www.gsimec.com.mx>. Consultado: 2 de octubre de 2012.
30. Hernández, P. J., Vázquez, R. E. & Barra, B. M. (2007). *Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico*. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 8-19.
31. Iacobescu, R.I.; Koumpouri, D.; Pontikes, Y.; Saban, R. & Angelopoulos, G.N. (2011). *Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements*. Journal of Hazardous Materials, 196, 287-294.
32. INE (1994). *Anteproyecto de la norma oficial mexicana que regula el manejo de residuos peligrosos provenientes de la industria siderurgia*. Instituto Nacional de Ecología, México, 23-55.
33. INEGI (2014). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/mapadigital>. Consultado: 29 de abril de 2014.

34. Issouribehere, F., Agüero, J.L., & Battaiotto, P.E. (2007). *Diseño de un statcom para la mitigación de flicker producido por hornos de arco eléctrico*. XII ERIAC (Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ), 1-8.
35. Johansson W.L. (2010). *The use of blast furnace slag for removal of phosphorus from wastewater in sweden - A review*. Water, 2(4), 826-837.
36. Kellner, A. (2010). *The effect of stress on sleep quality in teenagers, the analysis of metal contamination due to heaps of steel-slag accumulation in southern Madrid (Spain), and a review of the mechanisms of glutamine action during severe illnesses*. Editorial note. Anais da Academia Brasileira de Ciencia, 82(2), 261-262.
37. Landín, P. (2013). *Tecnología ESO. Obtención de aceros y fundiciones*. Obtenido de: <http://pelandintecno.blogspot.mx>. Consultado el 08 de abril del 2014.
38. Lovera, D., Arias, V. & Coronado, R. (2004). *La valorización de las escorias metalúrgicas como recursos industriales*. Revista del instituto de investigación FIGMMG, 7(13), 26-30.
39. Martín, H. M. (2003). *Aplicación tecnológica de un residuo de la industria del acero en la eliminación de metales contaminantes*. Tesis. Universidad complutense de Madrid, España, 5-6.
40. Micheli, J. (2002). *Política ambiental en México y su dimensión regional*. Región y sociedad, 14(23), 129-1.
41. Ministerio de fomento, Ministerio de medio ambiente rural y marino & Centro de estudios y experimentación de obras públicas (2011). *Escorias de acería de horno de arco eléctrico*. Ficha técnica, España, 1-19.
42. Montgomery, W., Harza (2005). *Análisis toxicidad muestreo de escorias compañía minera Ojos del Salado Tierra Amarilla*. Reporte de MWH Chile Ltda, Chile, CCMOS Muestreo de Escorias, Mayo 2005, pp. 1-11.

43. NMX (1984). NMX-AA-25-1984. Que establece la protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos-determinación del pH-método potenciométrico.
44. NMX (2001). NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
45. NMX (2006). NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
46. Olaya, J., Klinger, R., & Delgado, J. (2004). *Una aplicación del muestreo aleatorio simple para la caracterización elemental de residuos sólidos en la industria*, Scientia Et Technica, 10(24), 207–212.
47. Oliver, S. (2011). *Reach en la Siderurgia. Caso concreto: agregados secundarios en REACH*. Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID), España. Recuperado de: http://inforeach.gencat.cat/pdf/UNESID_Experiencia_Siderurgia.
48. Padilla, C.J. (2007). *Modelado del horno de arco eléctrico para estudios relacionados con la calidad de la energía eléctrica*. Tesis. Instituto politécnico nacional, México, D.F., 10-12.
49. Pasetto, Marco & Baldo, Nicola (2012). *Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation*. Materials and structures, 45, 411-425.
50. PESPA (2012). *Programa Estatal de Protección al Ambiente de Baja California 2009 – 2013*. Secretaría de Protección al Ambiente. Gobierno de Baja California. 28 de agosto de 2012.
51. PNPGIR (2008). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Marzo 25 de 2008.

52. Polese, M. D. O.; Carreiro, G. L.; Silva, M. G. D. & Silva, M. R. (2006). *Steel slag microstructural characterization*. *Matéria* (Rio de Janeiro), 11(4), 442-452.
53. Poma A. Pedro (2008). *Intoxicación por plomo en humanos*. *An Fac med. University of Illinois*. Chicago, EE UU 69(2), 120-6
54. Proeti (2014). *Producción de equipos técnicos e industriales S.A.* Madrid, España. Obtenido de: www.proetisa.com. Consultado: 08 de abril de 2014.
55. Puertas, F. (1993). *Colaboraciones escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico*. *Materiales de construcción*, 43(229), 37-48.
56. Renzi, M. & Rovira, S. (2005). *Metallurgical slags from the phoenician site of La Fonteta (alicante). A preliminary study*. VI Congreso ibérico de arqueometría, 163-171.
57. Reyes, O.J. & Camacho, J.F. (2003). *Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y sub-bases granulares*. *Ciencia e ingeniería neogradiana*, 013, 25-30.
58. RENAT (2000). NOM-021-RENAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
59. Rodríguez, R.A., Suárez del Río, L.M., Calleja, E.L., & Ruiz de Argandoña, V.G. (1997). *Métodos microscópicos para la cuantificación del contenido en fase vítrea de escorias siderúrgicas*. *Materiales de construcción*, 47(245), 45-51.
60. Rodríguez, A. Jafeth (2012). *Hidrodinámica del acero líquido durante el llenado de la olla. Tesis doctoral*. Instituto Politécnico Nacional - Escuela superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, México, D.F.
61. Rohde, Luciana (2002). *Escoria de acería eléctrica en camas granulares de pavimento-estudio de laboratorio. Tesis de maestría*. Universidad de Federal de Río Grande del sur, Porto Alegre, Brasil.

62. Sarkar, Ritwik; Singh, Nar & Kumar Das, Swapan (2010). *Utilization of steel melting electric arc furnace slag for development of vitreous ceramic tile*. Indian Academy of Sciences. Bull. Mater. Sci., Vol. 33, No. 3, June 2010, pp. 293–298.
63. Secretaria de salud (2014). *Normas oficiales mexicanas*. Subsecretaria de prevención y promoción de la salud. Recuperado: <http://www.spps.gob.mx>. Consultado: 24 de marzo de 2014.
64. SEMARNAT (2012). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: <http://www.semarnat.gob.mx>. Consultado: 20 de marzo de 2014.
65. SEMARNAT (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
66. SEMARNAT (1993). NOM-053-SEMARNAT-1993. Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
67. SEMARNAT (2003). NOM-055-SEMARNAT-2003. Que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos excepto de los radiactivos.
68. SEMARNAT (2003). NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
69. SEMARNAT (2002). NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. Protección ambiental-salud ambiental-residuos peligrosos biológico-infecciosos-clasificación y especificaciones de manejo.

70. SEMARNAT (2002). NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental – incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.
71. SEMARNAT (2004). 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.
72. SEMARNAT (2011). PROY-NOM-160-SEMARNAT-2011. Que establece los elementos y procedimientos para formular los planes de manejo de residuos peligrosos.
73. SPECTRUM (2003). ESPECTROFLAME–ICP; Inductively Coupled Plasma. *Instructivo para el análisis de escoria: Técnica del manual de usuario de equipo SPECTRUM*. Código ACA-10-012. (Accesado: 01 de enero de 2014).
74. Solórzano, J.E. (2003). *Caracterización de la escoria de hornas de la planta SIDEGUA como puzolana artificial*. Tesis. Facultad de ingeniería, Guatemala, 24-31.
75. Valdés, R. Z., Bogachkov, A. N., Gómez, A. C., & Robau, D. T. (2001). *Utilización de las escorias de los hornos de arco eléctrico y de cuchara como materiales de construcción*. Ingeniería Mecánica, 1, 19-26.
76. Walton, F.H. & Reyes, J. (1983). *Análisis químico e instrumental moderno*. Barcelona, España: Ed. Reverté.