

50521  
22



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

MÉTODOS DE DESACTIVACIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS  
GENERADOS EN LAS ÁREAS DE ANÁLISIS DE (ABSORCIÓN  
ATÓMICA, CROMATOGRAFÍA DE GASES Y GASES MASAS)  
DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL  
AMBIENTE (LAFQA)

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

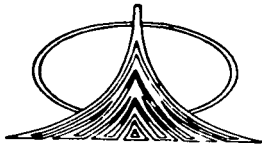
**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTAN

**GARCÍA MARTÍNEZ JOSÉ DE JESÚS  
HERNÁNDEZ GARCÍA HEDGAR**

ASESORES: I.Q. EDUARDO LOYO ARNAUD

M. en C. MARGARITA EUGENIA GUTIERREZ RUIZ



MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2003.

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/071/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: GARCIA MARTINEZ JOSE DE JESUS**

**P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Eduardo Loyo Arnaud</b>
<b>Vocal:</b>	<b>M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz</b>
<b>Secretario:</b>	<b>M. en C. A. Lourdes Castillo Granada</b>
<b>Suplente:</b>	<b>Q.F.B. Enriqueta Castrejón Rodríguez</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.B.Q. Hilda Olvera del Valle</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

México, D. F., 23 de Septiembre de 2002

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRES AQUINO CACHOEA**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**B**



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/072/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: HERNANDEZ GARCIA HEDGAR**  
**P r e s e n t e.**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

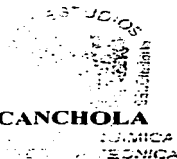
<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Eduardo Loyo Arnaud</b>
<b>Vocal:</b>	<b>M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz</b>
<b>Secretario:</b>	<b>M. en C. A. Lourdes Castillo Granada</b>
<b>Suplente:</b>	<b>Q.F.B. Enriqueta Castrejón Rodríguez</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.B.Q. Hilda Olvera del Valle</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
México, D. F., 23 de Septiembre de 2002

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA**



C

## *DEDICATORIAS*

*José de Jesús:*

*A mis padres Sandra Martínez y Lauro García, por enseñarme el valor de la honestidad y la superación personal para el bien propio. Esto es algo que nunca se puede pagar y solo cuando es enseñado con amor es aprendido.*

*A mi hija Frida por ser el motivo de superación día tras día, eres el regalo mas grande que dios me pudo dar.*

*A Paola por aguantar las noches en vela y darme ánimos para poder terminar este trabajo.*

*A mis hermanas Adriana y Katia, por estar ahí y hacerme la vida mas fácil y divertirme con ustedes.*

*A toda mi familia por estar siempre de mi lado y en los momentos en que mas los necesite. Gracias por su apoyo incondicional, mis tíos Jesús y Luz Clara, mis primos Elizabeth, Daniel y Mauricio y sus "chamaquitos".*

*A mis amigos, para que no se desanimen y vean que si se puede; a mi cuate "MOE" con el que he vivido muchas experiencias que nos han unido como amigos.*

*A Dios por darme la vida y poder seguir adelante.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*Hedgar:*

*A mis padres José Hernández y Rosa María García por el amor que me demuestran día con día, por perdonar todos mis errores y por enseñarme el valor que tiene la honestidad y la perseverancia que se necesitan para convertirme en un hombre de bien, esperando se sientan orgullosos. Gracias por ser como son, los quiero mucho.*

*A mi hermano Néstor que siempre esta conmigo en los momentos en los que lo necesito, y que con sus ganas de salir adelante me motiva siempre.*

*A mis abuelos Miguel Hernández y Cirenía Reyes por el cariño que me demuestran.*

*A toda mi familia que en los momentos difíciles han estado conmigo.*

*A todos mis amigos, que con su apoyo y amistad han hecho mas divertida mi vida. A los amigos de la FES que hicieron menos dura la estancia en la escuela. A "el orejon" con quien he pasado cosas muy chidas y quien me a ayudado mucho, formando una amistad sincera.*

*A Dios por haberme dado una familia y amigos como los que tengo.*

*La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía, UNAM.*

## **AGRADECIMIENTOS**

### **AGRADECEMOS:**

*A la UNAM y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por instruirnos y proporcionarnos los medios necesarios para la realización de nuestros estudios y nuestra formación como profesionistas.*

*Al LAFQA del Instituto de Geografía, por permitirnos hacer uso de sus instalaciones para el desarrollo de este trabajo.*

*A la organización alemana Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH-México, a través de su representante el Dr. Bertram Nagel por el apoyo económico brindado durante la realización del presente trabajo.*

*A nuestro asesor el I.Q. Eduardo Loyo Arnaud por los conocimientos y experiencias aportados para la realización de esta tesis. Ingeniero, gracias por la amistad sincera brindada desde el inicio de nuestra carrera, nos ayudo a orientarnos y a ser lo que somos.*

*A la M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz por su valiosa participación y aporte de experiencias y conocimientos para el enriquecimiento de la presente tesis.*

*A la Q.F.B. Claudia Luz Hernández Villegas por compartir sus conocimientos y experiencia de trabajo en laboratorio con nosotros. Claudia (Ruca), gracias por aguantar y soportar a este par de zánganos, ya que sin tu apoyo no hubiera sido posible.*

*A todo el personal académico del LAFQA por su apoyo y ayuda durante nuestra estancia en el laboratorio: Dra. Silke Cram, M. en C. Pilar Fernández, M. en C. Irene Summer, M. en C. Estela Carmona, M. en C. Gerardo Martínez, M. en C. Hilda Rivas, M. en C. Rutilio Ortiz, M. en C. Germán Anaya.*

*A nuestros compañeros tesisistas y demás personal: Elena Guzmán, Ivone Cruz, José Luis Cruz, Aída González, Norma Guzmán, Berenice Martínez, Eduardo Martínez, Sara Meoli, Antonio Pavón, Tania Ramírez, Juan Manuel Rodríguez y los que en este momento escapan de nuestra memoria.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## INDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>7</b>
1.1 Origen de los residuos .....	7
1.2 Características de los residuos peligrosos .....	10
1.3 Fundamentos legales para el manejo de residuos peligrosos .....	12
1.3.1 Legislación Internacional (Rosas, 1998) .....	13
1.3.2 Legislación Mexicana .....	17
1.4 Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos .....	19
1.5 Tratamiento de residuos peligrosos .....	22
1.5.1 Bases para el establecimiento de un programa de tratamiento ...	22
1.5.1.1 Clasificación del residuo .....	24
1.5.1.2 Caracterización del residuo .....	24
1.5.1.3 Selección de la tecnología de tratamiento .....	24
1.5.2 Métodos de tratamiento .....	25
1.5.2.1 Neutralización (Batstone, 1989) .....	26
1.5.2.2 Sorción/Precipitación química .....	28
1.5.2.3 Filtración .....	33
1.5.2.4 Destilación .....	34
<b>2. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>36</b>
2.1 Identificación de los residuos .....	38
2.2 Clasificación de los residuos .....	38
2.3 Caracterización de los residuos .....	39
2.3.1 Métodos de análisis .....	39
Fundamentos de la Espectrofotometría de absorción atómica (LAFQA, 2001) .....	39
Fundamentos de la extracción de hidrocarburos .....	40
2.4 Selección del método de tratamiento .....	41
<b>3. PARTE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

3.1	Reactivos, equipo e instrumentos utilizados.....	43
3.2	Tratamiento de efluentes residuales de AA .....	44
3.2.1	Descripción del tratamiento de los efluentes sin mezclar a temperatura ambiente.....	45
3.2.2	Descripción del tratamiento de los efluentes sin mezclar con calentamiento a temperatura de ebullición.....	46
3.2.3	Descripción del tratamiento de efluentes mezclados a temperatura ambiente.....	47
3.2.4	Descripción del tratamiento de efluentes mezclados con calentamiento a temperatura de ebullición.....	48
3.3	Cuantificación de metales.....	49
3.4	Recuperación de disolventes.....	50
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.1	Efluentes residuales.....	52
4.2	Recuperación de disolventes.....	62
4.3	Elaboración de los procedimientos del sistema de calidad.....	65
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>68</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>70</b>
	<b>APENDICE 1. Cálculo de la columna de destilación.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO A. Prueba CRETIB.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO B. Etiquetas para los residuos y sustancias recuperadas.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO C. Equilibrio químico.....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO D. Condiciones de trabajo del instrumento de Absorción Atómica.....</b>	<b>86</b>
	<b>ANEXO E. Condiciones de trabajo del Cromatógrafo de Gases.....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO F. Estabilización / Solidificación.....</b>	<b>105</b>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## RESUMEN

Los procesos naturales son cíclicos (cerrados en materia) por lo que no generan desechos, mientras que los procesos antropogénicos (industriales y de servicios) son lineales (abiertos en materia), por lo que generan además de productos, materiales sin valor de uso que se conocen como desechos o residuos.

De acuerdo a la normatividad ambiental de México, los desechos que son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables o biológico infecciosos se clasifican como residuos peligrosos. La disposición en el ambiente de estos residuos o de los productos de su incineración, impactan al ambiente y, dependiendo la vulnerabilidad del medio, pueden representar un riesgo para la biota, especialmente para los seres humanos.

La prioridad para el manejo de los residuos peligrosos debe ser la reducción en fuente, su minimización o su reuso. En caso de que no puedan valorizarse y tengan que ser dispuestos en el ambiente, deben tratarse para convertirlos en materiales que la naturaleza pueda integrar.

En los laboratorios de los centros de investigación y docencia se generan diversas emisiones al ambiente, entre ellas, efluentes y residuos peligrosos que requieren ser manejados adecuadamente, como es el caso de los disolventes orgánicos, los cuales son tóxicos e inflamables; y los efluentes que contienen metales transicionales, los cuales

dependiendo de la dosis pueden ser desde esenciales para la vida hasta tóxicos. En el presente trabajo se describe los procedimientos para la remoción de estos elementos que se denominan como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's): Cd, Cu, Pb y Zn de las aguas residuales que se generan durante la cuantificación de estos elementos por espectrofotometría de absorción atómica (AA)- flama; así como la recuperación del hexano y diclorometano, que son los disolventes empleados en la etapa de extracción de hidrocarburos para su análisis por cromatografía de gases (CG). Todos estos residuos son generados en el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía de la UNAM.

En esta tesis se realizó la identificación, clasificación y caracterización de los residuos antes mencionados, además se estableció el método de tratamiento para los efluentes residuales de AA y el método para la recuperación de los disolventes residuales (Hexano-Diclorometano), adecuados a los volúmenes de generación y a la infraestructura disponible. Asimismo se consideró que los métodos propuestos sean ambientalmente aceptables y puedan ser aplicados a otros laboratorios similares ya sea de la UNAM o de otros centros de investigación.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la actividad industrial y de servicios, así como el crecimiento de la población y del consumo, están disminuyendo rápidamente la disponibilidad de los recursos no renovables y renovables y se está contaminado el ambiente. La contaminación se relaciona con la liberación de emisiones (materia y energía) que alteran los procesos naturales.

Los volúmenes de los residuos generados por los procesos lineales (abiertos en materia) cada vez son mayores y su composición es más compleja, ya que contienen mayor cantidad de sustancias no biodegradables, algunas de las cuales presentan propiedades físicas y químicas que los vuelven peligrosos (capaces de causar un daño).

Dada la magnitud del problema causado por los residuos, se ha desarrollado una política para su manejo, la cual identifica a los residuos por el tipo de generador. Los desechos sólidos producidos por la población y los servicios, independientemente de su composición están a cargo de los municipios, mientras que los residuos industriales se clasifican como peligrosos y no peligrosos.

La política mexicana establece para el manejo de los residuos peligrosos los siguientes métodos: minimización, reciclaje, reuso, tratamiento, confinamiento e incineración, jerarquizándolos de acuerdo a su nivel de impacto al ambiente (Figura 1).

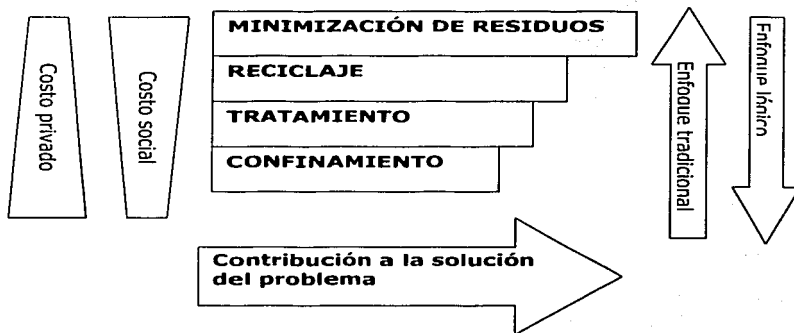


Figura 1. Manejo de los residuos peligrosos (Semarnap, 1996)

En forma generalizada, la mayor prioridad se le otorga a la prevención de la generación en la fuente (reducción), mediante cambios a los procesos o adaptaciones de los mismos; así como la minimización (reducción de volumen) a través de procesos de reciclado y optimización del proceso; y su valorización en el mercado (reuso) para ser utilizados en otros procesos directa o indirectamente, con o sin tratamiento previo. En los casos en que no es posible aplicar estos métodos, se recomienda transformarlos a materiales estables, posibles de disponer en el ambiente en las formas y cantidades que permitan su integración a los ciclos naturales, evitando su confinamiento e incineración, ya que son técnicas ambientalmente no aceptables.

Existen diferentes metodologías para el tratamiento de los residuos antes de su disposición final, cuyo objetivo es modificar sus propiedades físicas o químicas, así como reducir el volumen e inmovilizar a los componentes tóxicos. La selección del método más adecuado para tratar un determinado residuo, depende de muchos factores, incluyendo las normas de seguridad y costos (Espindola, 1994).

El mejor método para transformar los residuos en materiales posibles de disponer en el ambiente es el que logra que las especies químicas que tienen características peligrosas se transformen a compuestos termodinámicamente estables, similares a los que existen en la naturaleza. En general, estas especies son:

- a) Sustancias reducidas
- b) Minerales oxidados insolubles
- c) Compuestos que se degradan y liberan sustancias esenciales para la vida en cantidades adecuadas.

Estos métodos no son muy populares, pues en general los residuos peligrosos se prefieren enviar a confinamiento, en lugar de establecer métodos de manejo que requieren un alto grado de participación por parte de todos los sectores involucrados. Una de las posibilidades para promover este tipo de solución es aplicarlas en los laboratorios de investigación y docencia, ya que estos centros generan una gran variedad de residuos en bajo volumen, que, en su mayor parte son peligrosos y se mezclan con la basura municipal o se envían al drenaje, y, en el mejor de los casos, se incineran.

Para promover este concepto, el LAFQA ha iniciado una serie de estudios para desarrollar métodos ambientalmente aceptables posibles de aplicar con la infraestructura disponible. Dentro de los residuos peligrosos generados en el LAFQA, se seleccionaron para esta tesis, los efluentes residuales del espectrofotómetro de absorción atómica que se generan cuando se realizan análisis de EPT's por flama; y los disolventes hexano y diclorometano que se utilizan en la extracción de hidrocarburos para su cuantificación por cromatografía de gases.

El objetivo general de esta tesis es identificar, clasificar, caracterizar y seleccionar métodos de tratamiento para los residuos antes mencionados, para lo cual se establecieron las siguientes metas:

1. Remover los metales transicionales potencialmente tóxicos presentes en los efluentes residuales, que son: zinc (Zn) y cobre (Cu), clasificados como esenciales para la vida; así como plomo (Pb) y cadmio (Cd ) que son elementos sin una función vital conocida.
2. Determinar las condiciones de operación para la destilación de la mezcla residual hexano - diclorometano, para su recuperación y reciclado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Origen de los residuos

La industrialización ha traído grandes beneficios, sin embargo también ha ocasionado diversos problemas difíciles de resolver, ya que los procesos de producción de bienes de consumo que la sociedad demanda, consumen materias primas y energía, disminuyendo la disponibilidad de recursos naturales no renovables; y además, como los procesos se llevan a cabo de manera lineal, se generan emisiones (gases, líquidos o sólidos) que alteran el equilibrio de la naturaleza.

Estas emisiones se generan durante todos los pasos de un proceso industrial; al purificar o preparar las materias primas quedan impurezas o sobrantes y durante el proceso primario, en el cual las materias primas son transformadas en productos, se obtienen desechos también conocidos como residuos cuya composición y volumen dependen de las condiciones específicas de cada operación. En algunas industrias también se llevan a cabo procesos secundarios mediante los cuales los productos primarios son transformados en otros que se conocen como secundarios o terminales, y también se generan residuos. Finalmente los productos, después de ser utilizados por el consumidor, pierden su valor y también se desechan.

Todo residuo puede reciclarse en el mismo proceso con o sin tratamiento previo, o pueden ser reutilizados en otros procesos para recuperar su valor de uso (Gutiérrez Ruiz M., Macías Guzmán P.1999 ).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

No obstante, cuando las características físicas o químicas no son las ideales, o simplemente no existen las condiciones adecuadas (técnicas, administrativas, sociales o económicas), no es posible recuperar los residuos, por lo que son enviados a algún lugar para su disposición final. (Figura 2).

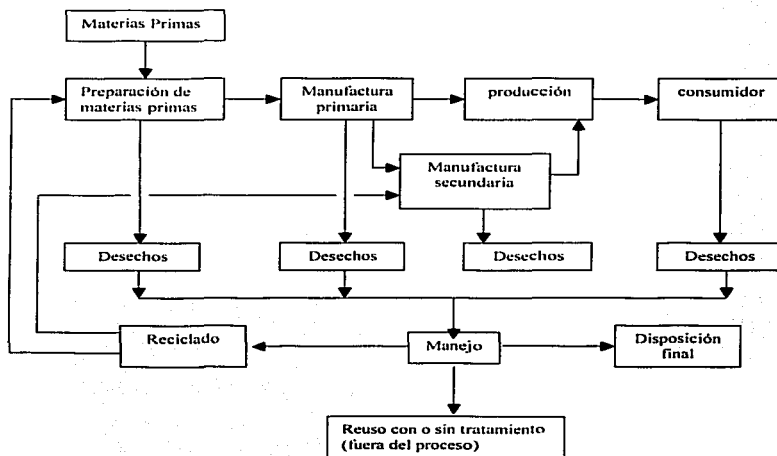
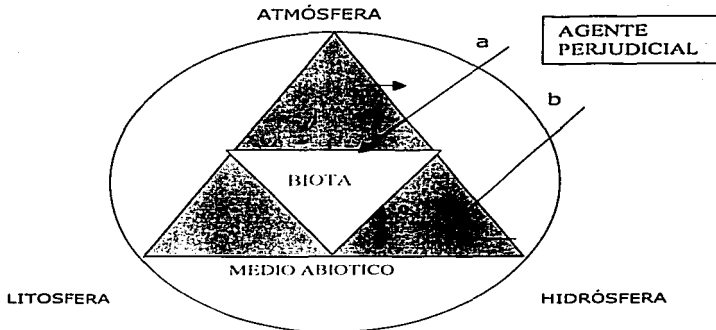


Figura 2. Generación de residuos en un proceso abierto en materia lineal (Gutiérrez *et. al* 1996.)

Dependiendo el volumen, composición química y propiedades físicas de los desechos, éstos pueden reintegrarse a los sistemas naturales o impactar el ambiente (zona de interacción del medio abiótico y biota) e inclusive dañar directamente a la biota (Figura 3).



- a. Afectaciones a la biota
- b. Afectaciones al medio abiótico
- c. Afectación indirecta a través de la alteración de los equilibrios naturales

Figura. 3 Concepto de peligrosidad para el ambiente, Gutiérrez *et. al* 1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.2 Características de los residuos peligrosos

Cuando el modelo de desarrollo económico actual se generalizó, los daños por el aumento de la población, la explotación de recursos y la contaminación se hicieron patentes para la mayor parte de la población.

Al principio se le dio más importancia a la contaminación del aire y del agua, dado que la vía de ingreso es directa, sin embargo paulatinamente se observó que también los residuos sólidos causaban problemas (Gutiérrez Rulz, 1990).

Los primeros signos de impacto se observaron en los sitios de disposición de los desechos municipales (tiraderos a cielo abierto), pero según aumentaba el nivel de industrialización, la composición de la basura cambió y la presencia de residuos industriales en suelos y cuerpos de agua fue evidente (ibidem, 1990).

Todos los residuos incluyendo los domésticos son peligrosos, pero la capacidad de absorción del ambiente es mayor para aquellos residuos que son biodegradables de los que no lo son, por lo que el nivel de riesgo es mayor para este tipo de residuos y, por lo tanto, son clasificados como peligrosos o de manejo especial.

La peligrosidad de los materiales y residuos es la capacidad de causar un daño, mientras que el riesgo es la posibilidad de que éste ocurra. De acuerdo a Gutiérrez *et al.* (1996) los factores de peligrosidad de un residuo son:

a) Naturaleza química. Esto es ser reactivo, lo cual implica que el residuo reaccione bajo las condiciones ambientales, para liberar la energía suficiente para causar una onda de choque, calor o formar gases o líquidos tóxicos; o sea potencialmente tóxico (alterar el metabolismo), o sea inerte químicamente pero su acumulación dentro de los organismos altere el metabolismo.

b) Cantidad. Se requiere que los componentes químicamente peligrosos superen la capacidad amortiguadora del ambiente y al introducirse en los organismos también supere los mecanismos de defensa del mismo. Desde hace más de 1000 años los Chinos decían que "todo es veneno y nada es veneno", refiriéndose a la importancia de la dosis, y Paracelso médico europeo del siglo XVI, postuló que "La dosis hace al veneno".

c) Disponibilidad Física. Para que una sustancia químicamente peligrosa pueda estar disponible en cantidades que superen las dosis máximas permisibles, se requiere que se transporte y llegue a la atmósfera (aire) y/o a los cuerpos de agua o al suelo. Por lo que este factor depende principalmente del estado físico, la solubilidad, el tamaño de partícula y la polaridad. Por ejemplo, un residuo sólido con alto contenido de elementos potencialmente tóxicos en formas insolubles bajo ciertas condiciones ambientales, por ejemplo la escoria vitrificada, no es peligroso y el riesgo únicamente está asociado a problemas de manejo físico. Estos factores se representan en la Figura 4.

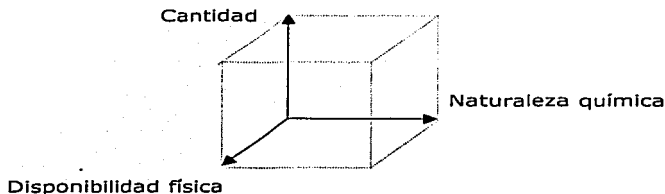


Figura 4. Factores de peligrosidad de un residuo (Gutiérrez *et. al.*, 1996).

Cuando un residuo es peligroso, para que represente un riesgo para la biota y, especialmente, para los seres humanos, se requiere que el ambiente sea vulnerable. Por lo tanto, el riesgo es función del peligro y la vulnerabilidad, y esta relación se expresa como sigue:

$$\text{Riesgo} = f(\text{peligro, vulnerabilidad})$$

### 1.3 Fundamentos legales para el manejo de residuos peligrosos

La definición, identificación y clasificación de los residuos peligrosos son temas legalmente complicados y los criterios varían de país en país. Generalmente se han clasificado con base en listados y/o pruebas rápidas de laboratorio. A continuación se presentan las bases de la legislación de algunos países importantes como referencia y las de México.

TESIS CON  
FALLA DE URGEN

### 1.3.1 Legislación Internacional (Rosas, 1998).

#### *Estados Unidos de Norte América.*

La EPA considera que un residuo es peligroso si presenta cualquiera de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad (presencia de componentes tóxicos en una prueba de lixiviado).

**Inflamabilidad:** Un residuo es inflamable cuando genera fuego bajo ciertas condiciones o se quema espontáneamente.

**Corrosividad:** Los residuos corrosivos son ácidos o bases capaces de corroer metal, tales como, tanques, contenedores y recipientes.

**Reactividad:** Un residuo se considera reactivo cuando es inestable bajo condiciones "normales". Pueden causar explosiones, gases tóxicos o vapores cuando se mezclan con agua.

**Toxicidad:** los residuos tóxicos pueden ser peligrosos o letales cuando se ingieren o absorben. Cuando son depositados en confinamientos, el lixiviado del residuo puede contaminar las aguas subterráneas. La toxicidad la definen por medio de Procedimiento de las Características Tóxicas del Lixiviado (TCLP). El TCLP nos permite identificar las concentraciones del lixiviado del residuo que pueden ser peligrosas para la salud y el ambiente.

Además, la EPA cuenta con una lista de otros residuos peligrosos los cuales no necesariamente presentan estas características (Libritzzi, 1990).

La legislación actual de los residuos sólidos data de 1965 cuando el congreso decretó el Acta de Disposición de Residuos Sólidos (The Solid Waste Disposal Act). Dicha acta se transformó en 1970 en el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) que indica las normas detalladas para el manejo de residuos, particularmente, reglamentos vitales sobre residuos peligrosos.

En 1976, se promulgó el Acta de Control de Sustancias tóxicas (The Toxic Substances Control Act), cuyo objetivo era reglamentar la introducción al mercado y el empleo de productos químicos peligrosos, con el fin de identificar y controlar la presencia de estas sustancias en el ambiente.

En 1980, el congreso promulgó el Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (The Comprehensive Response, Compensation and Liability Act, CERCLA), la cual establece disposiciones de responsabilidades, compensación y limpieza para los lugares inactivos de disposición de residuos peligrosos, también se le conoce como Acta del Superfondo (The Superfund Act), Debido a que cuenta con un fideicomiso en respuesta a los problemas de contaminación originados por sustancias peligrosas en el cual la



industria proporciona 7/8 partes del dinero y el 1/8 restante lo aporta el gobierno (Libritzzi, 1990).

Con esta reglamentación, se autorizó a la EPA a recolectar y evaluar la información relacionada a estos productos y en caso que determine que presentan un riesgo para la salud humana o el ambiente, tiene el poder de restringir su distribución, uso o hasta su producción.

En 1984 hubo reformas a los residuos sólidos y peligrosos (The Solid Hazardous Waste Amendments) las cuales se enfocaron a las prácticas de manejo de residuos peligrosos actuales y futuras.

En 1986 se decretó el Acta de Reformas y Reautorización del superfondo (The Superfund Amnedments and Reauthorization Act), como una extensión del CERCLA para limpiar las liberaciones peligrosas no controladas o los lugares de disposición de residuos peligrosos (LaGrega, 1996).

#### *Canadá*

En este país el principal ordenamiento ecológico es el Acta de Protección al Ambiente Canadiense (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) que regula la evaluación del impacto ambiental, el manejo de residuos, las normas de agua potable y la conservación de tierras.

De acuerdo a la CEPA los residuos peligrosos son los que por "su naturaleza o cantidad, son potencialmente dañinos para la salud y/o el

ambiente y que requieren de técnicas especiales para su disposición" (CEPA en Rosas, 1998).

La CEPA se encuentra dividida en siete partes. Lo referente al tema de los residuos peligrosos se encuentra en la "Parte 2", que contiene las disposiciones para el control de las sustancias tóxicas en todo el ciclo de vida, que incluye importación o producción, transporte, distribución y disposición final. Sin embargo, el nivel de protección no es igual en todo Canadá, ya que todas las provincias y territorios han promulgado su propia legislación ambiental en las que se establece los derechos y las responsabilidades ambientales a nivel regional.

### *España*

La Dirección General de Medio Ambiente y Patrimonio Arquitectónico de la comunidad de Madrid define desde 1987 a un residuo peligroso como "Todo producto, materia o elemento que tras su producción manipulación o uso no posee valor de mercancía en unas condiciones históricas, técnicas y económicas (espacio y tiempo) determinadas".

Son todos aquellos materiales sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos contenidos en recipientes que, siendo el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor destine al abandono y contengan en su composición alguna de las sustancias y materiales que figuran en los anexos (listas de residuos peligrosos por componente y peligrosidad) y en cantidades y concentraciones tales que representen un riesgo para la salud humana, los recursos naturales y/o el ambiente (Sans, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.3.2 Legislación Mexicana

En México se define como un residuo peligroso, de acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente a:

"Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables o biológico-infecciosas representa un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente" (LGEEPA, 1996).

Las normas ecológicas que actualmente se encuentran vigentes en México son enlistadas en la tabla 1.

Tabla 1. Normas Ecológicas Mexicanas.

Normas	Rubro	Dependencia
Le y general de equilibrio ecológico	Equilibrio ecológico	Instituto Nacional de Ecología
NOM-001-ECOL-1996	Limites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Instituto Nacional de Ecología
NOM-052-ECOL-1999 NOM-053-ECOL-1999 NOM-054-ECOL-1999	Clasificación de sustancias peligrosas y los componentes considerados como peligrosos	Instituto Nacional de Ecología
NOM-003-SCT/2000 NOM-007-SCT2/1994 NOM-011-SCT2/1994	Características de etiquetas y envases para el manejo y transporte de sustancias y residuos peligrosos	Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
NOM-055-ECOL-1993 NOM-056-ECOL-1993 NOM-057-ECOL-1993 NOM-058-ECOL-1993	Características de un confinamiento controlado de residuos peligrosos	Instituto Nacional de Ecología
NOM-005-STPS/1998 NOM-010-STPS/1999 NOM-018-STPS-2000	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporte, almacenen o procesen sustancias químicas peligrosas (HDS)	Secretaría del Trabajo y Previsión Social.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo a la definición y normas antes mencionada los residuos se clasifican como peligrosos por sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, y actividad biológica infecciosa. Las siglas de estas características se utilizan para denominar la prueba como CRETIB.

La C que proviene de la corrosividad se refiere a aquellos residuos que presentan valores de acidez o basicidad extremas o corroen al acero.

La R corresponde a reactividad y se identifica observando si el residuo reacciona con aire, agua, ácidos, bajo ciertas condiciones de calor y presión.

La E se relaciona con la explosividad, ya que la norma separa en un rango diferente a aquellos desechos que reaccionan en forma explosiva o detonante a 25°C y 1 atm de presión.

La T se relaciona con la toxicidad que se determina analizando en extractos acuosos y orgánicos la presencia de una serie de sustancias muy comunes en la industria que causan daños a los humanos y animales; la concentración permitida es igual o menor a un valor límite que se fija en función de la dosis letal (concentración que produce la muerte bajo ciertas condiciones, al 50% de la población evaluada).

La I de inflamabilidad se refiere a los desechos que pueden causar incendios por ser sustancias con alta energía interna que son volátiles o se oxidan, hidrolizan, etc.

Finalmente la B de la característica biológica-infecciosa, se refiere a la presencia de bacterias, virus o cualquier microorganismo capaz de generar infecciones y/o toxinas que dañen al hombre.

La toxicidad se mide determinando especies potencialmente tóxicas en extractos, ya sea como elementos o como compuestos.

#### **1.4 Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos**

Hasta hace pocos años los métodos para el tratamiento de los residuos considerados como peligrosos, se basaban en métodos conocidos como de "destrucción" o "eliminación" que se refieren a la incineración o a su disposición final en confinamientos controlados.

Sin embargo, estas soluciones han causado otros problemas, inclusive de mayor envergadura que los asociados a los residuos por lo que las legislaciones de residuos peligrosos están modificándose para estimular la aplicación de otros métodos de manejo, ambientalmente más "amables".

Estos métodos buscan modificar las propiedades físicas, químicas o biológicas para inmovilizar a los componentes peligrosos y tóxicos, o transformarlos en otros compuestos que no sean peligrosos. Asimismo, se busca reducir el volumen con el fin de facilitar su manejo.

### *1. Procesos físicos*

Estos procesos involucran el uso de procesos físicos, que a través de un cambio en la concentración y/o estado físico facilitan la separación de los constituyentes peligrosos, por ejemplo estos procesos pueden ser utilizados como pretratamientos en la separación de metales en residuos acuosos (Batstone, 1989).

### *2. Procesos químicos*

Son aquellos en los que se involucra el uso de reacciones químicas, en las que se emplean reactivos para transformar las corrientes residuales peligrosas en sustancias menos peligrosas que representen un menor riesgo para el ambiente o salud, para su posterior envío a disposición final. Además, este tipo de procesos fomentan la recuperación y el reuso de sustancias químicas, obteniéndose así subproductos útiles y efluentes residuales ambientalmente aceptables (Espíndola, 1994).

Como los procesos físicos y químicos para tratar residuos industriales se desarrollan a nivel laboratorio y se escalan a nivel piloto antes de aplicarse al proceso industrial, son adecuados para tratar a los residuos generados en un laboratorio.

### *3. Procesos biológicos*

Los procesos biológicos tienen por objeto reducir los compuestos orgánicos biodegradables presentes en materiales contaminados, como

agua residual, desechos sólidos y material celular, este tipo de tratamiento, generalmente se aplica a desechos municipales y aguas industriales que presentan una concentración límite de sustancias tóxicas, las cuales pueden ser tratadas por medios anaeróbicos y aeróbicos (Libritzzi, 1990).

#### *4. Procesos térmicos*

Consisten básicamente en utilizar calor para producir altas temperaturas que transformen los componentes peligrosos orgánicos. Este tipo de tratamientos generalmente se aplican a disolventes halogenados, no halogenados, orgánicos clorados, residuos aceitosos y bifenilos policlorados (PCB's). Este tipo de procesos no funcionan para soluciones acuosas con componentes metálicos ni para reactivos químicos (Espíndola, 1994). Los procesos térmicos pueden ser oxidantes o reductores, siendo estos últimos los más recomendables por su bajo impacto al ambiente.

#### *5. Disposición final*

Consiste en construir celdas de confinamiento en las cuales se depositan los residuos con o sin tratamiento previo. Las celdas deben estar ubicadas y construidas de tal manera que reduzcan los riesgos ecológicos y de salud. En ellas se depositan todo tipo de residuos, excepto los radiactivos, como son cenizas de la incineración, lodos procedentes de las plantas de tratamiento biológico del agua y lodos de los tratamientos fisicoquímicos. Cabe mencionar que un volumen

significativo de los residuos depositados no han experimentado tratamiento previo (Bosque, 1995).

Este procedimiento se realiza en sitios construidos en zonas alejadas a las urbes. Existen varios tipos de confinamientos desde los que se depositan sobre el suelo formando una colina, hasta aquellos en que los residuos líquidos son inyectados al subsuelo; aunque las características de cada confinamiento depende de la geografía del sitio y del tipo de residuos que son almacenados.

Sin embargo, los confinamientos se encuentran prohibidos en algunos países, debido al alto riesgo que representan al subsuelo y a los altos costos de su manejo; así como al importante pasivo ecológico que representan para las siguientes generaciones.

## **1.5 Tratamiento de residuos peligrosos**

### **1.5.1 Bases para el establecimiento de un programa de tratamiento**

Un programa de tratamiento de residuos implica en primer término la reducción en fuente, esto es cambiar el proceso para dejar de generar residuos.

En segundo término es recomendable modificar el proceso y el control de la operación para reducir el volumen generado de los residuos, cambiar su composición o lograr su reciclado, pues de esta manera se resuelven conjuntamente el control de emisiones al aire y agua, así como el ruido, y polvos, mejorando las condiciones de seguridad dentro



y fuera de la planta industrial. Cuando no es posible lograr estos cambios, se deben implementar soluciones para tratar a los residuos y eliminar su peligrosidad, mediante procesos ambientalmente aceptables.

Por lo que los principios de un programa de manejo de residuos se basa en:

- Dejar de generar residuos peligrosos.
- Si no es posible evitar su producción, hacerlo en cantidades mínimas.
- Reciclarlos.
- Reusarlos con o sin tratamiento previo.
- Estabilizarlos termodinámicamente (transformarlos a especies similares a las naturales para su disposición).
- Confinar únicamente aquellos residuos para los que no hay tecnologías de estabilización o reuso y de ser posible realizar estudios específicos con apoyo de universidades y centros de investigación para su desarrollo.

Para seleccionar los métodos y tecnologías para el manejo de los residuos, es necesario preliminarmente (Gutiérrez, 1994):

- a. Clasificar el residuo.
- b. Caracterizar el residuo.
- c. Selección de la tecnología de tratamiento.

#### 1.5.1.1 Clasificación del residuo

La clasificación de un residuo se lleva a cabo con base al análisis de la peligrosidad de acuerdo a la prueba CRETIB, que a parte de cumplir con las exigencias legales puede complementar la información sobre él o los elementos peligrosos contenidos en el residuo y determinar si es o no peligroso, previa identificación del lugar de donde son generados o al tipo de generador.

#### 1.5.1.2 Caracterización del residuo

El análisis de los residuos para su caracterización se lleva a cabo con base en las propiedades físicas y químicas de los reactivos utilizados, así como el proceso al que se le sujeta y a los resultados de laboratorio, cuando es posible conviene tener datos de las especies involucradas.

Ya con los datos del laboratorio, o al menos los datos obtenidos por los análisis en gabinete del propio proceso, se lleva a cabo la identificación de contaminantes por medio de etiquetas.

#### 1.5.1.3 Selección de la tecnología de tratamiento

La selección de la tecnología más adecuada para un residuo caracterizado, depende de muchos factores, como son las normas de seguridad, infraestructura y costos, de manera general deberían llevarse a cabo las siguientes actividades:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Generar una lista de las tecnologías de punta que sean adecuadas para cada grupo de residuos.
- Llevar a cabo una investigación de los fundamentos de cada una de las tecnologías.
- Investigar el manejo y pretratamiento de los materiales para cada tecnología y para cada grupo de residuos.
- Evaluar los beneficios y restricciones de cada una las tecnologías.

### 1.5.2 Métodos de tratamiento

Existe una gran variedad de métodos para el tratamiento de residuos peligrosos tal y como lo ilustra la Tabla 2.

Tabla 2. Aplicación de los procesos físicos y químicos a residuos peligrosos.

Residuo / Tratamiento	Corrosivos	Cianuros	Solventes Halogenados	Organicos no Halogenados	Organicos Clorados	Otros organicos	Desechos grasos	PCB's	Soluciones acuosas con metales	Soluciones acuosas con orgánicos	Reactivos	Suelos contaminados
Filtración		X	X	X	X	X		X	X			
Precipitación Química	X							X				
Fotólisis												
Oxidación / R. Q.		X							X			
Deshalogenación			X		X		X					X
Ozonación		X	X	X	X	X					X	
Evaporación			X	X	X	X	X					
Solidificación	X	X										X
Destilación			X	X	X	X						

Fuente: Freeman, 1984.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Generalmente los efluentes líquidos son enviados al desagüe, por lo que es importante asegurar que no contengan especies potencialmente tóxicas. Para lograrlo, se seleccionaron los siguientes procesos físicos y químicos, considerando la infraestructura del LAFQA y el volumen de generación:

- Neutralización
- Sorción/Precipitación química
- Filtración
- Destilación

#### 1.5.2.1 Neutralización (Batstone, 1989)

La neutralización es una tecnología ampliamente probada y utilizada en la industria para el tratamiento de residuos. En un sentido estricto, la neutralización es el ajuste de pH a 7, en el que el nivel de concentraciones de iones hidrógeno e hidroxilo son iguales, aunque en la práctica se lleva a pH ligeramente mayores. La neutralización es la interacción de un ácido con una base lo que involucra la adición de una sustancia química para cambiar su pH hasta un nivel neutro, con este procedimiento frecuentemente es posible eliminar el peligro específico asociado con el residuo (Espindola, 1994).

Es factible que la neutralización se lleve a cabo en tanques, lagunas, columnas absorbedoras etc., en operaciones discontinuas o de flujo continuo, dependiendo en parte del volumen y velocidad de flujo.

La adición del agente neutralizante se monitorea y ajusta por mediciones y control del pH. En el tratamiento discontinuo, el operador puede tomar muestras, medir el pH y adicionar la dosis requerida de ácido o base.

La neutralización de un residuo ácido o básico es necesaria en gran cantidad de situaciones por ejemplo:

- En la precipitación de metales pesados disueltos.
- Para prevenir la corrosión o daño a materiales o construcciones.
- Como tratamiento preliminar para permitir la correcta operación de algún proceso de tratamiento de tipo biológico.

La selección de algún neutralizante químico depende de factores como precio, disponibilidad y compatibilidad con el proceso.

Existen diversas formas aceptables de neutralizar residuos, por ejemplo:

- Mezclando residuos ácidos y básicos para obtener un pH cercano al neutro (en el intervalo de 6 a 8).
- Hacer pasar residuos ácidos por camas de carbonato de calcio.
- Agregar al residuo ácido soluciones concentradas de álcalis (por ejemplo, hidróxido de sodio o carbonato de sodio).

### 1.5.2.2 Sorción/Precipitación química

La sorción/precipitación es aplicable al tratamiento de los residuos peligrosos acuosos que contengan constituyentes tóxicos que puedan convertirse en insolubles; esto comprende residuos que contienen los metales arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, selenio, plata, tallo y zinc, principalmente.

La sorción/precipitación química se basa en lograr cambios en el equilibrio químico para que los iones solubles pasen a una fase sólida. Hay dos posibilidades o se logra concentrar la solución y aumentar el pH para que se supere el producto de solubilidad y se formen sólidos cristalinos o amorfos del compuesto; o por que formen enlaces entre los iones del elemento tóxico y la superficie de un sólido amorfo o poroso, como puede ser el hidróxido de aluminio, hidróxido de hierro o carbonatos de calcio.

En el proceso se adiciona un precipitante químico al metal contenido en el residuo acuoso. Los metales disueltos se convierten en insolubles por una reacción química entre los compuestos metálicos solubles y el precipitante; los sólidos suspendidos resultantes se separan por sedimentación o filtración.

La elección del reactivo es la primera consideración en la precipitación de metales; la segunda consideración es la solubilidad, ya que la precipitación depende de la solubilidad del compuesto indeseable (el metal que va a separarse); esta solubilidad se ve afectada por la

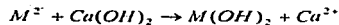
temperatura. Existen diferentes precipitantes químicos para la remoción de metales pesados de los residuos acuosos. El método más empleado es la precipitación de los iones metálicos como hidróxidos, utilizando cal, aunque la mayoría de los metales también pueden precipitarse como sulfuros y algunos de ellos como carbonatos.

#### *Precipitación con hidróxidos.*

Hay dos razones por las cuales la precipitación como hidróxidos es tan extensamente utilizada (Ayres en Espindola, 1994):

1. Hay diferencias grandes entre las solubilidades de los hidróxidos metálicos.
2. La utilización de reguladores de pH permite ajustarlo a un valor predeterminado y constante con objeto de efectuar la separación.

Dicha precipitación utiliza como precipitante el hidróxido de calcio (cal) o hidróxido de sodio (sosa cáustica) para remover los metales como hidróxidos metálicos insolubles. Para la separación de metales divalentes utilizando cal, la reacción se ilustra en la siguiente ecuación:



Los hidróxidos de algunos metales con altos potenciales iónicos (carga/radio) son anfóteros; es decir, su solubilidad es alta en valores extremos de pH y generalmente baja en el intervalo de neutro a ligeramente básico. El intervalo óptimo de pH para lograr una

precipitación adecuada es diferente para los diversos metales. Es decir, en un punto de pH donde la solubilidad de un hidróxido metálico es mínima, para otro es relativamente alta. En la mayoría de los casos, un pH entre 9 y 11, seleccionado con base a pruebas o experiencias de operación con el residuo, produce una calidad del efluente aceptable.

Cuando las concentraciones de los iones son muy bajas, se logra su remoción mediante procesos de sorción. En este caso es necesario adicionar sales de metales que formen en el intervalo de pH de 8 a 10 hidróxidos amorfos, como es el caso del hierro y del aluminio.

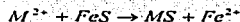
#### *Precipitación con sulfuros.*

En la precipitación con sulfuros la separación de cationes se fundamenta en los mismos principios que la separación como hidróxidos; existen grandes diferencias entre las solubilidades de los sulfuros y el equilibrio del sulfuro de hidrógeno está marcadamente influenciado por la concentración de ión hidrógeno en la disolución, ajustando el pH de la disolución se puede, por tanto, controlar la precipitación de los sulfuros (Ayres en Espindola, 1994).

Este tipo de precipitación presenta ciertas ventajas potenciales como una alternativa de la precipitación de hidróxidos. Las solubilidades de los sulfuros son menores que las correspondientes de los hidróxidos; los sulfuros metálicos se descomponen a pH ácidos, por lo cual es muy importante trabajar solamente a pH básicos.



El proceso involucra la combinación de iones de metales pesados con un radical sulfuro, como se ilustra en la siguiente reacción de un metal divalente con sulfuro ferroso:



Se utilizan varias fuentes de sulfuros, como el sulfuro de sodio ( $Na_2S$ ) o el hidrosulfuro de sodio ( $NaHS$ ), las cuales son solubles y el sulfuro ferroso ( $FeS$ ) que es ligeramente soluble.

Una desventaja importante en la precipitación de sulfuros es la generación de ácido sulfhídrico gaseoso tóxico, por lo que como ya se comentó, para evitar su formación se debe mantener un pH superior a 8.

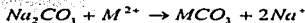
Una segunda desventaja se debe a que como es necesario un exceso de sulfuro para que sea completa la reacción (0.5 mg/L) de precipitación, se liberan el exceso de sulfuros al efluente y por lo tanto se requiere implementar un postratamiento.

#### *Precipitación con carbonatos.*

Este proceso no es efectivo para todos los metales, sin embargo la precipitación con carbonatos para algunos de ellos, como para el cadmio y plomo, puede lograr una eficiencia de remoción comparable con la precipitación con hidróxidos, pero con mayores ventajas, ya que se requiere un pH menor y una densidad de operación más baja, y además

se obtiene un lodo de mejor consistencia (más filtrable). Por ejemplo, mientras que la precipitación de Pb y Cd como hidróxidos requiere de un pH mínimo de 9, para formar los carbonatos solamente se requiere de un intervalo de pH 7.5 a 8.5.

La precipitación de metales por carbonato de sodio se lleva a cabo como se muestra en la siguiente reacción, donde M representa el metal divalente: (Manual de Laboratorio de Ciencia Básica II, 1995).



En la Tabla 3 de muestran algunas ventajas y desventajas de los diferentes métodos de precipitación.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los precipitantes.

	PRECIPITACIÓN CON HIDRÓXIDOS		PRECIPITACIÓN CON CARBONATOS	PRECIPTACIÓN CON SULFUROS
	CAL	SOSA		
<b>VENTAJAS</b>	-Costo químico bajo. -Precipitado mas sedimentable y filtrable.	-Mas reactivo. -Fácilmente manejable.	-Precipitación similar a la de hidróxidos. -Lodo más filtrable.	-Solubilidades menores.
<b>DESVENTAJAS</b>	-Manejo difícil. -Mayor cantidad de lodos.	-Costo químico alto -Precipitado menos sedimentable y filtrable. -Mas sólidos disueltos en el efluente.	-No es efectivo para todos los metales.	-Generación de ácido sulfhídrico. -Liberación de exceso de sulfuros en el efluente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.5.2.3 Filtración

La filtración es un proceso de separación de las partículas sólidas de un medio líquido, o de las sólidas o líquidas que se hallan en un medio gaseoso por medio de procesos de absorción o adsorción en un cuerpo sólido poroso. La fuerza que lleva a cabo una filtración es el gradiente de presión, causado por gravedad, fuerza centrífuga, vacío, o la presión atmosférica.

La aplicación de la filtración al tratamiento de residuos peligrosos se divide en dos categorías:

#### *a) Clarificación.*

En este método las partículas de sólidos suspendidos en concentraciones típicamente por debajo de las 100 ppm son removidas de un medio acuoso. Esta es usualmente acompañada por una filtración a contracorriente. La primer corriente produce un efluente transparente y los sólidos suspendidos se concentran en la corriente que se quiere separar.

#### *b) Decantación.*

Se aplica a efluentes que contienen típicamente del 1 al 30 % de sólidos en peso. El objetivo es sedimentar los sólidos mediante la gravedad para formar una pasta, que puede ser filtrada o en algunos casos separada del la fase líquida por decantación.

#### 1.5.2.4 Destilación

##### *Destilación simple.*

La destilación simple es uno de los principales métodos para separar mezclas de líquidos. La separación se fundamenta en la diferencia de la presión de vapor de los diferentes componentes de la mezcla.

Al calentarse la mezcla los componentes se evaporan para condensarse posteriormente y durante el proceso, el vapor y, por lo tanto, el condensado, se enriquece con los componentes más volátiles. Esta operación se conoce como destilación.

Una regla empírica importante que se debe tomar en consideración es la siguiente: para que una destilación simple, que es equivalente a un proceso de evaporación único, sea eficaz, los puntos de ebullición de los componentes deben tener una diferencia entre ellos de al menos 80°C (Kesse, 1990).

##### *Destilación múltiple (fraccionada).*

La mayoría de las destilaciones comerciales involucran una serie de destilaciones simples, que se conocen como destilación múltiple o fraccionada, la cual permite separar sustancias con menor diferencias en sus puntos de ebullición, ya que se logra aumentar la eficiencia de las operaciones de vaporización y condensación.

En este tipo de destilación el diseño de la columna se hace de manera en que el vapor sobrecalentado, condensado en la parte alta de la columna, regrese en forma de reflujo, de manera que este líquido tenga un mayor contacto con los vapores ascendentes, con lo cual se logre una mayor transferencia de masa. El grado de separación de los componentes está dado por la configuración del sistema, el cual depende de las condiciones de operación, el número de etapas y la cantidad de reflujo.

Existen dos tipos de columnas de destilación fraccionada:

*Columna de platos o etapas.*

En la que el número de platos o etapas está dado por la proporción del reflujo, es decir si el reflujo se incrementa el número de platos disminuye, y si el número de platos es muy grande se necesitará una proporción mínima de reflujo.

*Columnas empacadas.*

Es el método más económico de contacto entre corrientes líquidas y gaseosas en columnas de destilación, particularmente en columnas de diámetro pequeño. Existen diferentes tipos de empaques que son colocados de manera aleatoria dentro de la columna como los anillos Rasching o Pall.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente estudio se realizó en cinco etapas (Figura 5). A continuación se describe cada una de ellas:

1. Identificación de los residuos con base al tipo de generador o al área de la cual son generados. Para lo cual se etiqueta cada recipiente de acuerdo a las normas NOM-003-SCT/2000, NOM-007-SCT2/1994, NOM-011-SCT2/1994, NOM-STPS-026.
2. Clasificación de los residuos con base en sus principales componentes y propiedades peligrosas, de acuerdo a las indicaciones generales de la NOM-052-ECOL-1999.
3. Caracterización de los residuos con base en sus propiedades físicas y químicas, así como al proceso al que fue sujeto. Para lo cual se determina la composición probable de los residuos con base en los métodos analíticos que los generan.
4. Selección y aplicación de los métodos de tratamiento.
5. Análisis de los resultados de los tratamientos.

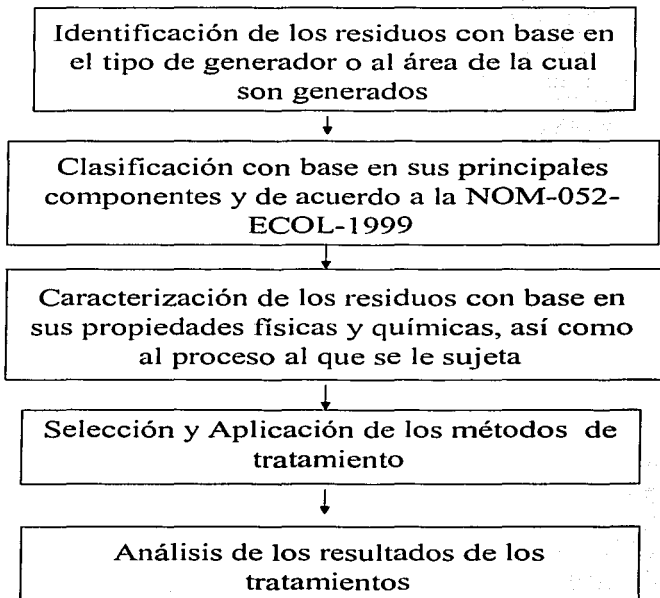


Figura 5. Metodología del estudio

## 2.1 Identificación de los residuos

Los residuos generados en el LAFQA se identificaron por el área de análisis de la cual provienen (AA y CG) como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Identificación de los residuos generados por área de análisis.

Área de análisis	Residuo
Espectrofotometría de Absorción Atómica (AA)	Efluentes residuales ácidos
Determinación Cromatografía de Gases (CG)	Disolventes orgánicos

Posteriormente, los residuos fueron almacenados temporalmente antes de su tratamiento en recipientes que se etiquetaron con base a los formatos marcados por las normas NOM-003-SCT/2000, NOM-007-SCT2/1994, NOM-011-SCT2/1994, NOM-STPS-026 (Anexo B).

## 2.2 Clasificación de los residuos

Después de identificar los principales componentes de los residuos se realizó la clasificación siguiendo los lineamientos de la NOM-052-ECOL-1999 (Anexo A) obteniendo la siguiente tabla:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tabla 5. Clasificación de los residuos DEL LAFQA

<b>PRUEBA</b>	<b>RESIDUO</b>	<b>EFLUENTES LIQUIDOS RESIDUALES DEL AREA DE AA</b>	<b>DISOLVENTES RESIDUALES DEL AREA DE CG</b>
Corrosividad		Si	No
Reactividad		Si	Si
Explosividad		Si	Si
Toxicidad		NR	NR
Inflamabilidad		No	Si
Biológico-Infeccioso		No aplica	No aplica

NR= No realizada

## 2.3 Caracterización de los residuos.

### 2.3.1 Métodos de análisis

Fundamentos de la Espectrofotometría de absorción atómica (LAFQA, 2001)

El objetivo de la espectrofotometría de absorción atómica con flama (aspiración directa), generalmente se utiliza para cuantificar metales y elementos de frontera. Esta técnica se aplica a muestras en solución, por lo que es necesario disolver las muestras mediante ataques ácidos o básicos, u oxidaciones térmicas (digestión). Los efluentes se generan durante la cuantificación de Cd, Cu, Pb y Zn en muestras ambientales, de manera que estos son los elementos que contienen (Tabla 6).

Tabla 6. Caracterización de los efluentes residuales de AA

Elemento Analizado	Efluente Residual (Reaccion en HNO <sub>3</sub> )	Vol. de la Solución Residual (aprox.)
Cadmio	$3Cd + 8HNO_3 \rightarrow 3Cd^{++} + 6NO_3^- + 4H_2O + 2NO \uparrow$	3.5 L/día*
Cobre	$3Cu + 8HNO_3 \rightarrow 3Cu^{++} + 6NO_3^- + 4H_2O + 2NO \uparrow$	3.5 L/día*
Plomo	$Pb + 4HNO_3 \rightarrow Pb^{++} + NO_3^- + H_2O + NO \uparrow$	3.0 L/día*
Zinc	$3Zn + 8HNO_3 \rightarrow 3Zn^{++} + 6NO_3^- + 4H_2O + 2NO \uparrow$	3.5 L/día*

\* 1 Día 8 hrs. de trabajo

#### Fundamentos de la extracción de hidrocarburos

La extracción de hidrocarburos en muestras sólidas se realiza utilizando disolventes orgánicos no polares y es una etapa preliminar antes de que se cuantifiquen estas sustancias por cromatografía de gases.

Esta etapa consiste en separar los hidrocarburos de una muestra por medio de una mezcla de disolventes (hexano-diclorometano) en un equipo soxhlet. Posteriormente el extracto obtenido se concentra en el rotavapor para después separar las fracciones de aromáticos y alifáticos con hexano en una columna de separación. Finalmente se concentra la muestra en el rotavapor y el extracto restante se evapora a sequedad bajo un flujo de nitrógeno.

Los residuos generados en cada proceso de extracción de hidrocarburos contienen las proporciones indicadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización de los disolventes residuales de CG

<b>Residuo</b> \ <b>Método</b>	<b>Extracción por soxhlet</b>	<b>Columnas cromatográficas</b>
Hexano	-	540 mL
Hexano-Diclorometano	1080 mL (1 : 1)	180 mL (9 : 1) 120 mL (1 : 1)

Los disolventes resultantes de la extracción en el equipo soxhlet y la columna de separación, forman una mezcla residual hexano-diclorometano (0.55:0.45), donde el volumen promedio de mezcla generada es de 9 L/mes (United Nation Environmental Programme, 1992).

#### 2.4 Selección del método de tratamiento

De acuerdo a la identificación, clasificación, caracterización de los residuos generados en las áreas de AA y CG, y al análisis de los fundamentos de las tecnologías anteriormente descritas (Sección 1.5.2), se seleccionaron los siguientes métodos de tratamiento:

- > Neutralización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- > Precipitación química
- > Filtración

Y se combinaron para lograr un tren de tratamiento con los siguientes pasos: neutralización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , remoción por sorción/precipitación y la separación por filtración.

Mientras que para tratar los disolventes utilizados en el proceso de extracción de hidrocarburos se seleccionó la destilación fraccionada, que permite reciclar o reutilizar estas sustancias.

Para determinar el tipo de columna a emplear, se calculó sus dimensiones: longitud, diámetro y número de platos teóricos de acuerdo al algoritmo de FENSKE-UNDERWOOD-GILLIGAND (Henley, 1996) (Apéndice 1).

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

#### 3.1 Reactivos, equipo e instrumentos utilizados.

➤ *Para tratamiento de efluentes residuales de AA.*

Ca(OH)<sub>2</sub> grado industrial marca Reasol  
Papel filtro marca Watthman Núm.40  
Embudo de filtración tallo corto  
Vaso de precipitados de 2000 mL  
Matraz erlenmeyer de 250 mL  
Frasco de vidrio de 1000 mL  
Espectrofotómetro de absorción atómica  
Parrilla de agitación y calentamiento marca Thermolyne

➤ *Para el tratamiento de disolventes residuales del proceso de extracción de hidrocarburos.*

Matraz fondo redondo de 12000 mL  
Matraz fondo redondo de 2000 mL  
Adaptador para matraz 55/50 a 24/40  
Columna *Vigreux* de 900 mm  
Condensador recto de 600 mm  
Tubo conector 105° de tres vías  
Tubo colector 105° para vacío  
Termómetro de -10°C a 120°C  
Tubo adaptador para termómetro

Pinzas de tres dedos  
Soportes universales  
Mangueras de látex  
Mantilla de calentamiento  
Reóstato de 60 HZ  
Grasa de silicón  
Perlas de ebullición de 3 mm  
Cromatógrafo de gases

### 3.2 Tratamiento de efluentes residuales de AA

Como se comentó en la sección 2.4, el tren de tratamiento seleccionado para los efluentes residuales generados en el área de A.A se basa en la neutralización con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta obtener un pH de 8-10 para lograr su remoción y posterior sedimentación, decantación y filtración. El experimento fue de tipo factorial:

Núm. de muestras analizadas = 2 tipos de efluentes x 2 temperaturas x 1 tren de tratamiento x 3 repeticiones

Tipos de efluentes:

1. Efluentes sin mezclar. Líquidos residuales de cada determinación independiente. Solamente contienen un elemento potencialmente tóxico.

2. Efluentes mezclados. Solución preparada con alícuotas de volúmenes iguales de cada determinación , y que contienen todos los elementos en solución (Pb, Cd, Cu y Zn).

Temperatura:

1. Reacción de sorción/precipitación a temperatura ambiente
2. Reacción de sorción/precipitación calentando la solución a ebullición (aprox. 96°C) para evaporar, concentrar la solución y favorecer la precipitación.

### 3.2.1 Descripción del tratamiento de los efluentes sin mezclar a temperatura ambiente

- 1.-Se vertió 1 L del efluente residual que contiene Cd o Cu o Pb o Zn en un vaso de 2000 mL colocando el vaso en una parrilla de agitación y calentamiento.
- 2.-Se midió el pH del efluente residual inicial con papel pH.
- 3.-Se inició la agitación de la parrilla al 20 % de su capacidad.
- 4.-Se adicionó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (aproximadamente de 45 a 50 g) al efluente residual hasta llegar a un pH entre 8 y 10, manteniendo la agitación por 10 minutos.
- 5.-Se mantuvo la solución en reposo de 1 a 2 horas hasta que sedimentó.
- 6.-Se filtró la solución con papel filtro No.40 sobre un embudo de tallo corto, recibiendo el filtrado en un frasco de 1000 mL.

7.-El papel filtro con el sólido se secó a temperatura ambiente y se almacenó en una bolsa de polietileno de baja densidad.

8.- El líquido filtrado se almacenó para su análisis por AA.

3.2.2 Descripción del tratamiento de los efluentes sin mezclar con calentamiento a temperatura de ebullición.

1.- Se vertió 1 L del efluente residual que contiene Cd o Cu o Pb o Zn en un vaso de 2000 mL colocando el vaso en una parrilla de agitación y calentamiento.

2.-Se midió el pH del efluente residual inicial con papel pH.

3.-Se inició la agitación de la parrilla al 40 % de su capacidad.

4.-Se adicionó  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (aproximadamente de 45 a 50 g) gradualmente hasta llegar a un pH entre 8 y 10.

5.-Se activó el calentamiento de la parrilla al 70 % de su capacidad y se mantuvo el calentamiento, disminuyendo la velocidad de la agitación al 20 % para evaporar hasta obtener un remanente de 100 mL.

6.-Se dejó enfriar la solución a temperatura ambiente.

7.-Se mantuvo en reposo la solución de 1 a 2 horas hasta que sedimentó.

8.-Se filtró la solución con papel filtro del Núm.40 sobre un embudo de tallo corto, recibiendo el filtrado en un matraz erlenmeyer de 250 mL.

9.-El papel filtro con el sólido se secó a temperatura ambiente y se almacenó en una bolsa de polietileno de baja densidad.

10.-El líquido filtrado se almacenó para su análisis por AA.

TEXTO CON  
FALLA DE ORIGEN



3.2.3 Descripción del tratamiento de efluentes mezclados a temperatura ambiente.

1.-Se mezclaron los efluentes residuales que contenían Cu, Cd, Pb, Zn hasta llegar a un volumen de 1 L en un vaso de precipitados de 2000 mL, en las mismas proporciones (25:25:25:25) colocando el vaso en una parrilla de agitación y calentamiento.

2.-Se midió el pH del efluente residual inicial con papel pH.

3.-Se inició la agitación de la parrilla al 20 % de su capacidad.

4.-Se adiciono  $\text{Ca(OH)}_2$  (aproximadamente de 45 a 50 g) al efluente residual hasta llegar a un pH de  $9 \pm 1$  y se mantuvo la agitación por 10 minutos.

5.-Se mantuvo la solución en reposo de 1 a 2 horas hasta que sedimentó.

6.-Se filtró utilizando el papel filtro No.40 sobre un embudo de tallo corto, recibiendo el filtrado en un frasco de 1000 mL.

7.-El papel filtro con el sólido se secó a temperatura ambiente y se almacenó en una bolsa de polietileno de baja densidad.

8.- El líquido filtrado se almacenó para su análisis por AA.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.2.4 Descripción del tratamiento de efluentes mezclados con calentamiento a temperatura de ebullición.

- 1.-Se mezclaron los efluentes residuales que contenían Cu, Cd, Pb, Zn hasta llegar a un volumen de 1 L en un vaso de precipitados de 2000 mL, en las mismas proporciones (25:25:25:25) colocando el vaso en una parrilla de agitación y calentamiento.
- 2.-Se midió el pH del efluente residual inicial con papel pH.
- 3.-Se inició la agitación de la parrilla al 40 % de su capacidad.
- 4.-Se adiciono  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (aproximadamente de 45 a 50 g) gradualmente hasta llegar a un pH de  $9 \pm 1$ .
- 5.-Se activó el calentamiento de la parrilla al 70 % de su capacidad y se mantuvo el calentamiento, disminuyendo la velocidad de la agitación al 20 % para evaporar hasta obtener un remanente de 100 mL.
- 6.-Se dejó enfriar la solución a temperatura ambiente.
- 7.-Se mantuvo en reposo la solución de 1 a 2 horas hasta que sedimentó.
- 8.-Se filtró la solución utilizando el papel filtro del No.40 sobre un embudo de tallo corto, recibiendo el filtrado en un matraz erlenmeyer de 250 mL.
- 9.-El papel filtro con el sólido se secó a temperatura ambiente y se almacenó en una bolsa de polietileno de baja densidad.
- 10.-El líquido filtrado se almacenó para su análisis por AA.

### 3.3 Cuantificación de metales.

Cada efluente residual fue dividido de la siguiente manera (Figura 6):

- 2 L para tratamiento sin mezclar, del cual 1 L fue tratado a 25°C y el resto a 96°C.
- 1 L para tratamiento en mezcla, del cual 0.5 L se trató a 25°C y el resto a 96°C.

Para comprobar la eficacia de los tratamientos realizados a los efluentes mezclados y sin mezclar, se manejaron cuatro muestras, cada una de ellas por triplicado, y una muestra de sólido de cada efluente, también por triplicado, para determinar la concentración final de EPT's, por espectrofotometría de absorción atómica, comparándola con las concentraciones iniciales obtenidas en base al promedio de las muestras antes de cada tratamiento.

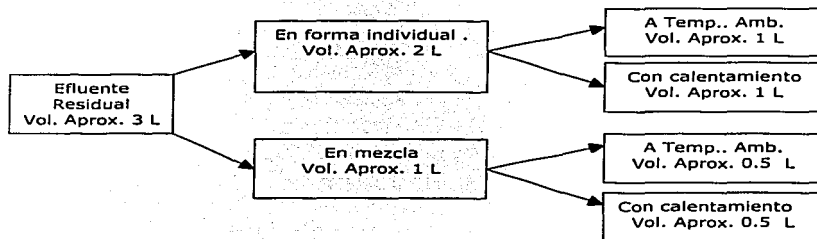


Figura 6. Diagrama de Flujo de los tratamientos.

### 3.4 Recuperación de disolventes.

Para realizar la recuperación de los disolventes mezclados se realizó una destilación fraccionada utilizando una columna fraccionada (*Vigreux*), adaptada y empacada con perlas de cristal de 5 mm de diámetro.

#### 3.4.1 Instalación del equipo:

1. Se colocó la mantilla en un lugar fijo y estable.
2. Se colocó un matraz bola de 12000 mL en la canastilla.
3. Se colocó el adaptador 55/50 a 24/40 en el matraz.
4. Se empacó la columna *Vigreux* con las perlas de ebullición hasta 1 cm por debajo de la junta, Colocándola en el adaptador.
5. Se colocó el conector de tres vías en la parte superior de la columna *Vigreux*.
6. Se colocó el condensador recto en la salida del conector.
7. Se unió el tubo colector al condensador recto.
8. Se colocó el termómetro y se unió al tubo conector de tres vías, de manera que el bulbo del termómetro quedara al nivel de la salida que va hacia el condensador.

#### 3.4.2 Operación del equipo

1. Se llenó el matraz con la mezcla a destilar (Hex-DCM) y después se unió al adaptador donde esta conectada la columna *Vigreux*, la cantidad a llenar fue del 75% del volumen total del matraz.
2. Se reviso que las juntas de cada una de las partes del equipo estuvieran bien selladas para evitar fugas.

3. Se conectó la línea de agua fría al condensador recto e inició el flujo del agua de enfriamiento.
4. Se inició el calentamiento encendiendo el reóstato a 40% de voltaje.
5. Se esperó a que se estabilizara la temperatura de manera que la cantidad del flujo de destilado fuera menor que el reflujo en la columna (el reflujo debe ser tres veces mayor que el flujo de destilado, aproximadamente).
6. Se controló la cantidad de destilado manipulando el voltaje en el reóstato, disminuyéndolo o aumentándolo para que la cantidad de destilado fuera de gota en gota.
7. Se recogió la primera fracción del destilado (cabezas) (aprox. 200 mL) en un matraz, y se almacenó por separado en un envase etiquetado.
8. La siguiente fracción del destilado (corazón), destiló a una temperatura constante, aproximadamente el diclorometano destila entre 32°C y 40°C, y se recolecto en otro matraz limpio, al cambio de temperatura se cambió el matraz para recoger el hexano el cual se almacenó para su posterior análisis por C.G.
9. La última fracción del destilado (colas), esa parte quedo remanente en el matraz de fondo redondo de 12000 mL y fue aproximadamente el 1 % del volumen inicial, esta parte se almacenó en el mismo envase donde se almaceno la primer fracción del destilado .
10. Las colas y cabezas de destilación son almacenadas temporalmente para un tratamiento posterior.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Efluentes residuales

Las concentraciones de Cu y Zn no sobrepasan los valores señalados en la NOM-001-ECOL/1996 que se refiere a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Sin embargo, las concentraciones de Cd y Pb sí sobrepasan estos niveles en factores de 28 para el primer elemento y 9 para el segundo (Tabla 8) y, por lo tanto, deben ser tratados antes de enviarse al drenaje.

Tabla 8. Concentraciones iniciales de los metales en los efluentes residuales.

<b>Metal</b>	<b>Concentración(*)</b> <b>mg/L</b>	<b>Límite máximo permisible</b> <b>NOM 001-ECO/1996</b> <b>mg/L</b>
<b>Cd</b>	1.42 ± 0.16	<b>0.05</b>
<b>Cu</b>	1.27 ± 0.22	<b>4</b>
<b>Pb</b>	1.83 ± 0.58	<b>0.2</b>
<b>Zn</b>	0.44 ± 0.15	<b>10</b>

(\*)Valores promedio de tres muestras (Sec. 3.3)

En las Tablas 9, 10, 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos de los tratamientos de los efluentes sin mezclar.

Tabla 9. Concentración de Cd en el efluente tratado sin mezclar.

Muestra	Conc. inicial (mg/L)	Conc. final (mg/L)	Conc. final (mg/L)	Conc. final (mg/Kg)	Conc. final (mg/Kg)
	solución	25°C	96°C	25°C	96°C
		solución	solución	solución	sólido
11 a	1.50	N.D.	0.01		
11 b	1.50	N.D.	0.01		
11 c	1.50	0.01	0.01		
12 a	1.20	0.02	0.02		
12 b	1.20	0.01	0.02		
12 c	1.20	0.02	0.03		
13 a	1.35	N.D.	0.02		
13 b	1.35	N.D.	0.03		
13 c	1.35	0.02	0.02		
14 a	1.62	0.02	0.02	1.58	1.56
14 b	1.62	0.02	0.05	1.60	1.52
14 c	1.62	0.03	0.05	1.58	1.50

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.005 mg/L)

Tabla 10. Concentración de Cu en el efluente tratado sin mezclar.

Muestra	Conc. inicial (mg/L)	Conc. final (mg/L)	Conc. final (mg/L)	Conc. final (mg/Kg)	Conc. final (mg/Kg)
	solución	25°C	96°C	25°C	96°C
		solución	solución	solución	sólido
21 a	0.95	0.02	0.02		
21 b	0.95	0.02	0.03		
21 c	0.95	N.D.	N.D.		
22 a	1.54	0.05	0.02		
22 b	1.54	0.02	N.D.		
22 c	1.54	0.05	0.03		
23 a	1.32	0.04	0.02		
23 b	1.32	0.02	N.D.		
23 c	1.32	0.02	N.D.		
24 a	1.26	0.02	0.05	1.21	1.19
24 b	1.26	0.02	0.04	1.23	1.20
24 c	1.26	N.D.	0.05	1.23	1.18

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.02 mg/L)

TEJES CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 11. Concentración de Pb en el efluente tratado sin mezclar.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
	solución	solución	solución	sólido	sólido
31 a	1.32	0.12	N.D.	2.49	2.47
31 b	1.32	0.10	N.D.	2.46	2.47
31 c	1.32	0.10	N.D.	2.46	2.49
32 a	1.25	N.D.	N.D.		
32 b	1.25	0.10	N.D.		
32 c	1.25	N.D.	N.D.		
33 a	2.24	0.10	0.10		
33 b	2.24	N.D.	N.D.		
33 c	2.24	N.D.	0.10		
34 a	2.50	N.D.	N.D.		
34 b	2.50	N.D.	N.D.		
34 c	2.50	N.D.	N.D.		

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.1 mg/L)

Tabla 12. Concentración de Zn en el efluente tratado sin mezclar.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
	solución	solución	solución	sólido	sólido
41 a	0.22	0.01	0.05	0.47	0.41
41 b	0.22	0.01	0.03	0.45	0.40
41 c	0.22	0.02	0.04	0.45	0.41
42 a	0.45	0.05	0.02		
42 b	0.45	0.03	0.01		
42 c	0.45	0.03	0.02		
43 a	0.62	0.02	0.05		
43 b	0.62	0.02	0.02		
43 c	0.62	0.01	0.05		
44 a	0.48	0.01	N.D.		
44 b	0.48	0.02	0.01		
44 c	0.48	0.02	N.D.		

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.005 mg/L)

En las Tablas 13, 14, 15 y 16 se presentan los resultados obtenidos de los tratamientos de los efluentes residuales mezclados.

TRABAJOS CON  
FALTA DE ORIGEN



Tabla 13. Concentración de Cd en el efluente mezclado y tratado.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
		25°C	96°C	25°C	96°C
	solución	solución	solución	sólido	sólido
11 a	1.50	0.01	0.02		
11 b	1.50	0.009	0.01		
11 c	1.50	0.01	0.01		
12 a	1.20	0.01	0.01		
12 b	1.20	0.02	0.01		
12 c	1.20	0.02	0.03		
13 a	1.35	N.D.	0.02		
13 b	1.35	N.D.	0.03		
13 c	1.35	0.01	0.02		
14 a	1.62	0.02	0.02	1.58	1.60
14 b	1.62	0.01	0.01	1.58	1.60
14 c	1.62	0.02	0.01	1.60	1.62

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.005 mg/L)

Tabla 14. Concentración de Cu en el efluente mezclado y tratado.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
		25°C	96°C	25°C	96°C
	solución	solución	solución	sólido	sólido
21 a	0.95	0.02	N.D.		
21 b	0.95	0.02	0.03		
21 c	0.95	N.D.	N.D.		
22 a	1.54	0.03	0.03		
22 b	1.54	N.D.	N.D.		
22 c	1.54	N.D.	0.03		
23 a	1.32	0.04	0.02		
23 b	1.32	0.02	N.D.		
23 c	1.32	0.02	0.02		
24 a	1.26	0.02	N.D.	1.22	1.25
24 b	1.26	0.02	0.02	1.24	1.23
24 c	1.26	N.D.	N.D.	1.24	1.25

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.02 mg/L)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 15. Concentración de Pb en el efluente mezclado y tratado.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
	solución	solución	solución	sólido	sólido
31 a	1.32	N.D.	N.D.	2.48	2.39
31 b	1.32	N.D.	N.D.	2.48	2.43
31 c	1.32	N.D.	0.10	2.46	2.39
32 a	1.25	0.10	N.D.		
32 b	1.25	N.D.	0.10		
32 c	1.25	0.10	N.D.		
33 a	2.24	N.D.	N.D.		
33 b	2.24	N.D.	N.D.		
33 c	2.24	N.D.	N.D.		
34 a	2.50	N.D.	0.10		
34 b	2.50	N.D.	N.D.		
34 c	2.50	N.D.	0.10		

N.D.= No detectado, concentración menor al límite de detección (0.1 mg/L)

Tabla 16. Concentración de Zn en efluente mezclado y tratado.

Muestra	Conc. inicial	Conc. final	Conc. final	Conc. final	Conc. final
	mg/L	mg/L	(mg/L)	(mg/kg)	(mg/kg)
	solución	solución	solución	sólido	sólido
41 a	0.22	0.01	0.03	0.47	0.46
41 b	0.22	0.01	0.03	0.46	0.47
41 c	0.22	0.02	0.04	0.46	0.46
42 a	0.45	0.03	0.02		
42 b	0.45	0.02	0.01		
42 c	0.45	0.03	0.02		
43 a	0.62	0.02	0.01		
43 b	0.62	0.02	0.01		
43 c	0.62	0.01	0.01		
44 a	0.48	0.01	N.D.		
44 b	0.48	0.02	0.01		
44 c	0.48	0.02	N.D.		

N.D.= No detectado, por debajo del límite de detección (0.005 mg/L).

En todos los experimentos se logró remover el Pb y Cd junto con el Zn y Cu hasta alcanzar valores menores a los límites permisibles. Además, de acuerdo a los resultados presentados en las Tablas 13, 14, 15 y 16 y a las pruebas de *t* de Student (Haber, 1973) con un nivel de significancia

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

del 0,05 (Tablas 17 a 20), no hay una diferencia significativa en la eficacia de remoción de metales de los efluentes residuales mezclados a temperatura ambiente o evaporando a 96°C.

Tabla 17. Prueba t student para resultados de Cd.

	Cadmio			
	Sin mezclar		Mezclados	
	Trat 1.	Trat 2.	Trat 1.	Trat 2.
$\sigma$	0.0104	0.0138	0.00718	0.00778
S	0.00011	0.00014	5.167e-5	6.061e-5
X	0.0038	0.02096	0.004785	0.01513
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05
g.l.	22	22	22	22
t <sub>cal</sub>	0.03031		0.1114	
t <sub>tablas</sub>	2.074		2.074	

Tabla 18. Prueba t student para resultados de Cu.

	Cobre			
	Sin mezclar		Mezclados	
	Trat 1.	Trat 2.	Trat 1.	Trat 2.
$\sigma$	0.3428	0.3377	0.3484	0.3571
S	0.1175	0.1141	0.1214	0.1275
X	0.0144	0.0095	0.0095	0.0034
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05
g.l.	22	22	22	22
t <sub>cal</sub>	0.09812		0.8794	
t <sub>tablas</sub>	2.074		2.074	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 19. Prueba t student para resultados de Pb.

	Plomo			
	Sin mezclar		Mezclados	
	Trat 1.	Trat 2.	Trat 1.	Trat 2.
$\sigma$	0.0538	0.0389	0.0389	0.0492
$s$	0.0029	0.0015	0.0015	0.0024
$X$	0.00089	0.00013	0.00013	0.0006
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>g.l.</b>	22	22	22	22
$t_{cal}$	0.1779		0.3676	
$t_{tablas}$	2.074		2.074	

Tabla 20. Prueba t student para resultados de Zn.

	Zinc			
	Sin mezclar		Mezclados	
	Trat 1.	Trat 2.	Trat 1.	Trat 2.
$\sigma$	0.0116	0.0192	0.0072	0.0124
$s$	0.0002	0.0004	5.15e-5	0.00015
$X$	0.0253	0.0087	0.0234	0.0060
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>g.l.</b>	22	22	22	22
$t_{cal}$	0.3782		0.5519	
$t_{tablas}$	2.074		2.074	

Sin embargo, en las Figuras 7 a 10 se puede observar que el tratamiento de efluentes mezclados a temperatura ambiente presenta una mejor remoción, pero que no logra ser suficientemente importante como para ser significativa estadísticamente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 7. Concentraciones de cadmio en muestras obtenidas por los tratamientos experimentados.

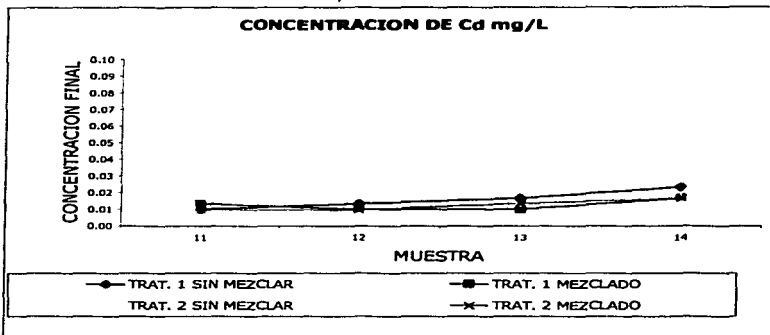
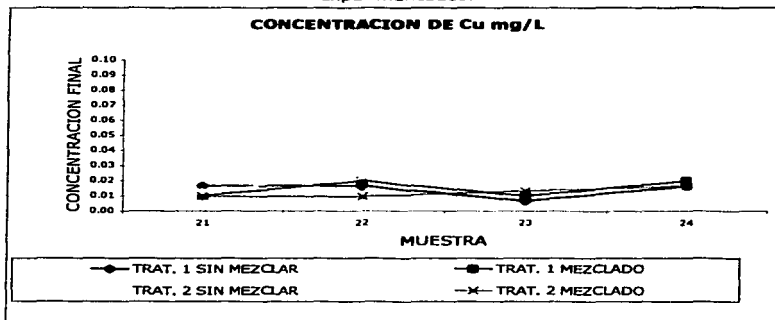


Figura 8. Concentraciones de cobre en muestras obtenidas por los tratamientos experimentados.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 9. Concentraciones de plomo en muestras obtenidas por los tratamientos experimentados.

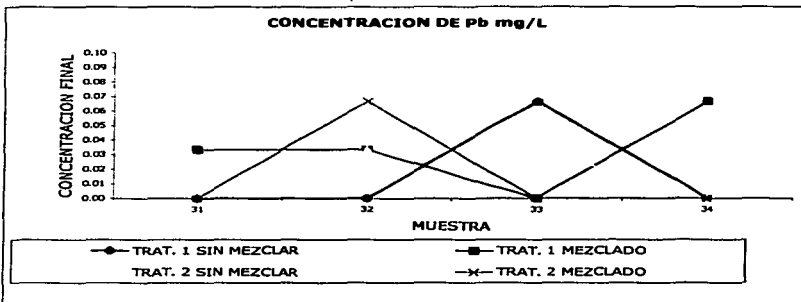
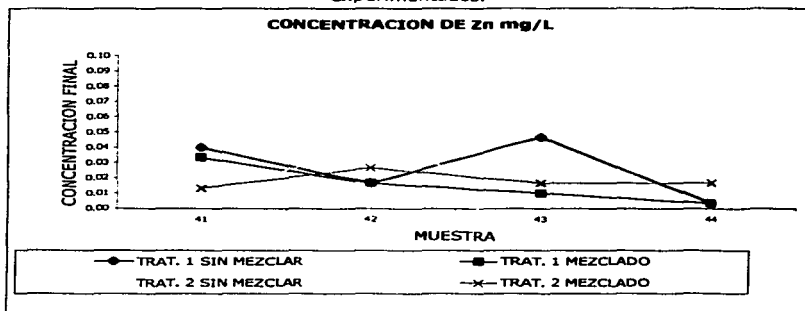


Figura 10. Concentraciones de zinc en muestras obtenidas por los tratamientos experimentados.



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Estos resultados junto con el hecho de que las reacciones se llevaron a cabo muy rápidamente y aunque, en muchos casos, no se alcanzó el producto de solubilidad se logró la remoción, indican que no fue la precipitación de fases independientes de hidróxidos de dichos metales el mecanismo que posiblemente dominó la remoción, sino la sorción de los metales en la calcita. La sorción incluye la diversos tipos de enlace, como interacciones electrostáticas ión-ión (enlaces iónicos), ión-dipolo, dipolo-dipolo y coordinación e incluye la oclusión en los poros de la calcita. En forma genérica estos fenómenos se conocen como adsorción, absorción y coprecipitación.

El uso de cal es rápido y eficiente, y además económico como se puede observar en la Tabla 17, en la cual se muestra un comparativo de los costos de algunos reactivos más utilizados como precipitantes químicos y el volumen aproximado necesario para incrementar el pH del residuo a un intervalo de 8 a 10.

Tabla 17. Costos de la remoción de metales utilizando diferentes reactivos

<b>Reactivo Grado industrial</b>	<b>Costo en pesos M.N por kg de reactivo</b>	<b>Gramos de reactivo por litro de efluente</b>	<b>Costo en pesos M.N. por L. de efluente tratado</b>
Ca(OH) <sub>2</sub> = Cal	\$1.20	48	0.057
NaOH= Sosa	\$99.00	50	4.95
Carbonato de calcio	\$70.00	70	4.9

Sin embargo, para cada caso específico es necesario considerar otros costos como es el gasto de energía y el costo de disposición de los residuos sólidos finales.

Cabe hacer mención que el tratamiento propuesto permite disminuir la corrosividad del residuo, ya que el intervalo final del efluente es de 8 a 10, que cumple con los valores permisibles de pH señalados por la NOM-001-ECOL/1996 (5.5 a 10). Asimismo, es posible de aplicar a efluentes mezclados o sin mezclar y funciona para una amplia gama de concentraciones de los metales.

#### 4.2 Recuperación de disolventes

En la Tabla 18 se muestran los resultados de la destilación fraccionada de los disolventes residuales procedentes del análisis de hidrocarburos totales del petróleo (HCTP) que se generaron durante seis meses. El promedio mensual es de 9 L de una mezcla hexano-diclorometano (0.55:0.45).

Tabla 18. Recuperación de disolventes

MES	VOLUMEN DE MEZCLA INICIAL		VOLUMEN DE DESTILADO FINAL		PUREZA FINAL	
	Hexano (aprox.)	DCM (aprox.)	Hexano (aprox.)	DCM (aprox.)	Hexano	DCM
Octubre	6600 mL	5400 mL	4160 mL	3404 mL	99 %	96 %
Noviembre	6600 mL	5400 mL	4200 mL	3365 mL	98 %	96 %
Enero	6600 mL	5400 mL	4100 mL	3465 mL	99 %	95 %
Febrero	6600 mL	5400 mL	4200 mL	3365 mL	99 %	96 %
Marzo	6600 mL	5400 mL	4150 mL	3415 mL	99 %	96 %
Abril	6600 mL	5400 mL	4200 mL	3365 mL	99 %	96 %

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La consideración más importante para el cálculo de la columna de destilación fue la concentración de la mezcla inicial, tomando en cuenta que todos los meses se generaron los mismos volúmenes y concentraciones. En la Tabla 19 se presenta una síntesis del cálculo y se listan los parámetros de operación obtenidos, mientras que en el Apéndice 1 se muestran los cálculos a detalle.

Tabla 19. Parámetros de cálculo de la columna de destilación.

Cálculo de dimensiones de la columna de destilación	
Diámetro de columna	0.011 m
Altura	16.47 m
Núm. De platos mínimos	7.24
Núm. De platos teóricos	18.6

De acuerdo con los datos obtenidos en el cálculo de la columna de destilación, lo más recomendable es utilizar una columna empacada para minimizar las dimensiones de la columna, y pueda ser utilizado dentro de las instalaciones del laboratorio.

Una vez recuperados los disolventes utilizando la columna de destilación, se evaluó en un cromatógrafo de gases la pureza de cada uno de los disolventes recuperados. En este equipo es posible separar los componentes de una mezcla, mediante una separación de los solutos entre una fase móvil de gas y una fase estacionaria sostenida en un soporte sólido. La secuencia de una separación es la siguiente:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- a) La muestra conteniendo los solutos es inyectada en un horno donde es vaporizada y arrastrada por el gas acarreador hasta la columna.
- b) Los solutos son adsorbidos en la cabeza de la columna por la fase estacionaria y desorbida por una corriente de gas fresco.
- c) Los procesos de sorción-desorción ocurren repetidamente según se mueve la muestra hacia el final de la columna.
- d) Cada soluto viaja a su propia velocidad de acuerdo al tipo y fuerza de enlaces formados (sorción) y e) los solutos son eluidos secuencialmente en orden creciente de acuerdo a los valores de los tiempos de retención y entran al detector donde las señales son registradas. El tiempo de retención de las sustancias es lo que permite identificar a los diferentes tipos de disolventes o sustancias que se analizan, mientras que las alturas de los picos son proporcionales a la concentración de cada componente (Willard et al. 1981 p. 454).

En el caso del hexano el tiempo de retención obtenido en el instrumento de cromatografía de gases y bajo las condiciones antes mencionadas fue de 1.980 a 2.602 minutos. A las mismas condiciones de operación del instrumento, el diclorometano permaneció entre 1.930 a 1.942 minutos.

Comparando los resultados del análisis de los disolventes después de que fueron recuperados contra los de un disolvente puro, se obtuvo que el hexano presenta una pureza del 99 % aproximadamente, lo que permite su reuso en el proceso de extracción de hidrocarburos del laboratorio.


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La pureza del diclorometano fue de aproximadamente del 96 % por lo que no es posible de reciclar este disolvente en el análisis de HCTP. Sin embargo, es posible reusarlo en otros análisis o reciclarlo aplicando una segunda destilación para obtener un valor cercano al 99%.

#### 4.3 Elaboración de los procedimientos del sistema de calidad

Con los resultados obtenidos se redactaron los procedimientos para el manejo de los efluentes procedentes de las áreas de espectrofotometría de absorción atómica-flama (A.A) y determinación de hidrocarburos por cromatografía de gases(C.G); siguiendo los lineamientos del sistema de calidad del LAFQA. Estos procedimientos servirán como prototipo para los próximos que se redacten referentes al manejo del resto de los residuos generados en el LAFQA y ya forman parte del Manual de Calidad de este laboratorio, pero no se presentan en la tesis ya que es un documento de uso interno y no reproducible.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

 Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente	<b>Elaboración de procedimientos</b>	Clave: PII/ASAG/trat.met.
	<b>Tratamiento de efluentes residuales que contienen metales (Cd, Cu, Pb y Zn)</b>	Revisión: 01 Fecha: Página: 1 de 6


Original  
 Copia Controlada Número  
 Copia No Controlada  
 Copia en Revisión


## CONTENIDO

1. Propósito
2. Alcances
3. Conceptos/Abreviaturas
4. Responsabilidades
5. Descripción
  - 5.1 Generalidades
  - 5.2 Precauciones
  - 5.3 Rango de operacion
  - 5.4 Incertidumbre de medicion
  - 5.5 Verificacion de la calibración
  - 5.6 Operación
    - 5.6.1 Material y equipo
    - 5.6.2 Procedimiento de manejo
  - 5.7 Observaciones del procedimiento
  - 5.8 Mantenimiento y limpieza
  - 5.9 Documentacion
6. Otros documentos vigentes
  - 6.1 Documentos fuente
  - 6.2 Documentos asociados
7. Anexos

Elaborado	Revisado y Aprobado
Puesto y Nombre:	Puesto y Nombre:
Fecha:	Fecha:
Firma:	Firma:

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

 Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente	<b>Elaboración de procedimientos</b>	Clave: PII/SAG/dest.r es
	<b>Separación de mezclas Hexano-diclorometano por destilación fraccionada</b>	Revisión: 01 Fecha: Página 1 de 7

Original  
Copia Controlada Número  
Copia No Controlada  
Copia en Revisión

x

## CONTENIDO

1. Propósito
2. Alcances
3. Conceptos/Abreviaturas
4. Responsabilidades
5. Descripción
  - 5.1 Generalidades
  - 5.2 Precauciones
  - 5.3 Rango de operación
  - 5.4 Incertidumbre de medición
  - 5.5 Verificación de la calibración
  - 5.6 Operación
  - 5.7 componentes del equipo
  - 5.8 Procedimiento de manejo
  - 5.9 Instalación del equipo
  - 5.10 Operación del equipo de destilación
  - 5.11 Mantenimiento y limpieza
  - 5.12 Documentación
6. Otros documentos vigentes
  - 6.1 Documentos fuente
  - 6.2 Documentos asociados
7. Anexos

Elaborado	Revisado y Aprobado
Puesto y Nombre:	Puesto y Nombre:
Fecha:	Fecha:
Firma:	Firma:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El tratamiento con hidróxido de calcio a temperatura ambiente permite remover a los iones de metales pesados de los efluentes residuales hasta concentraciones menores a los límites permisibles establecidos en la norma oficial mexicana (NOM-001-ECOL-1996), asimismo reduce la corrosividad de los mismos aumentando el pH hasta un intervalo de 8-10 que también cumple con la normatividad.

Con lo que respecta a la recuperación de los disolventes (hexano y diclorometano) se logró determinar que la destilación fraccionada permite reciclar y/o utilizar los disolventes, obteniendo en el caso del hexano una pureza del 99% y para el diclorometano del 96%.

Se recomienda continuar este estudio para establecer el método de estabilización de los residuos del proceso de remoción de metales de los efluentes. De acuerdo a los resultados obtenidos es posible proponer que se realice el siguiente experimento:

- a) Disolver los residuos con  $H_2SO_4$  para obtener una solución concentrada de sulfato de Ca, Cd, Zn y Cu y un precipitado de  $PbSO_4$ , que puede separarse y reutilizarse en el laboratorio.
- b) Neutralizar y evaporar la solución para obtener un sólido con los elementos restantes que pueden ser almacenados hasta que se tenga una cantidad mayor a 10 kg.
- c) Mezclar el sólido con cemento y enviarlo a confinamiento.

- d) Remover el Cd de la solución con un agente coordinante específico para su reuso en el laboratorio y el resto de la solución neutralizarse y disponerse en el suelo, ya que contiene micro y macro nutrientes (Zn, Cu, Ca).

Para un manejo adecuado de los residuos peligrosos es necesario realizar un análisis del proceso, para establecer un control y poder determinar los residuos generados; así como establecer un programa de minimización que busque eliminar la generación de residuos peligrosos desde sus orígenes, sustituyendo las materias primas, la tecnología o al menos realizando adaptaciones en las operaciones y que se refiera principalmente a minimizar las cantidades desperdiciadas, recuperar valores, reciclar (dentro del mismo proceso) y reusarlos (en otros procesos).

En todos los casos en que se quieran aplicar los métodos descritos en este estudio es necesario caracterizar preliminarmente los residuos y efluentes. Especialmente para realizar la destilación es necesario conocer los componentes de la mezcla, así como sus concentraciones, ya que de esto dependerá las características de la columna de destilación. De no ser así no podría lograrse una buena separación y, en consecuencia, tampoco la recuperación de los disolventes.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Armour, Margaret-Ann. (1996). "Hazardous Laboratory Chemicals Disposal Guide". Second Edition, Lewis Publisher.
- Batstone, Roger. (1989). "The Safe Disposal of Hazardous Wastes Vol.2". International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C.
- Bosque Sendra, Joaquin. (1995). "Residuos Población y Medio Ambiente", Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, Madrid.
- Bernabei, Dante. (1998). "Seguridad, Manual para el laboratorio". Segunda edición, Merck KGaA, Alemania.
- Clark, J.H. 1995. "Chemistry of Waste Minimization". Blakie Academic and Professional, Cambridge, Great Britain.
- Czupryna, G.et.al. (1989). "In Situ Immobilization of Heavy Metal Contaminated Soils". Noyes Data Corporation, Mill Road, Park Ridge, New Jersey.
- Diario Oficial de la Federación
- Espíndola M. Y. y Fernández G. (1994). " Procesos fisicoquímicos para estabilización de residuos peligrosos ". CENAPRED, México.
- Freeman, Harry M. (1989) "Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal". McGraw-Hill Book Company, E.U.A.
- Gutiérrez Ruiz Margarita, (1996). "Una visión alternativa del manejo de residuos peligrosos", 1er Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos.



- Gutiérrez Ruiz Margarita, (1990). "Los residuos sólidos peligrosos: ¿Un riesgo sin solución?". Rev. Ciencias Núm. 20. Oct. 90, pp. 31-36. UNAM, México.
- Gutiérrez Ruiz Margarita, (1990), "Los residuos sólidos peligrosos: ¿Un riesgo sin solución?". Rev. Ciencias Núm. 20. Oct. 90, pp. 31-36. UNAM, México.
- Gutiérrez Ruiz Margarita, (1994), "Una visión integral para el manejo de los residuos peligrosos con base a la estructura química". Apuntes curso-taller: Manejo y Disposición de residuos peligrosos. UNAM-I.G.-PUMA-AMCRESPEC. México.
- Gutiérrez Ruiz, Margarita E., Macías Guzmán, Paloma (1999), "Sistemas Integrales de Valorización de Desechos". Rev. Panorama Ambiental, Vol. 4, No. 1, Diciembre, AIDIS-Puerto Rico. Ed. Millenium Advertising, INC. pp. 21-27.
- Haber, Audrey, (1973). "Estadística General". Fondo Educativo Interamericano S.A.
- Hall, William (1948). "Química Analítica tomo 1". UTEHA.
- Henley, Ernest J (1998). "Operaciones de Separación por Etapas de Equilibrio en Ingeniería Química", Ed. Reverté S.A., Barcelona, España.
- Kesse, R., Müller, R.K (1990), "Métodos de Laboratorio para Química Orgánica", primera edición, Ed. Limusa S.A. de C.V., México.
- Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (2001), "Descripción general y riesgos del uso de EAA SpectraAA 110, Procedimiento de operación"

- LaGrega, Michael (1996), "Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos" Vol. 1 y 2, Ed. McGraw-Hill.
- Lange, Norbert Adolph (1972), "Handbook of Chemistry", Twelfth Edition, McGraw-Hill.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, SEMARNAP, 1996.
- Libritzzi, William J. et.al. (1990) "Hazardous Waste Treatment Processes". Water Pollution Control Federation, Alexandria, Virginia.
- Lunn, George (1994). "Destruction of hazardous chemicals in the laboratory". Ed. John Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos de Norteamérica.
- Luxon, S.G. (1992), " Hazards in the Chemical Laboratory", Fifth Edition, Royal Society of Chemistry.
- Manahan, Stanley E. (1993), "Fundamentals of Environmental Chemistry", Lewis Publishers, Michigan, E.U.A.
- Manahan, Stanley E. (1990), "Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment". Ed. Lewis Publishers, E.U.A.
- Hojas de datos de seguridad, Merck, México.
- National Research Council. (1995), "Prudent Practices in the laboratory". Washington, D.C., E.U.A.
- Perry, Robert. (1996) " Biblioteca del Ingeniero Químico", Quinta Edición, McGraw-Hill.
- Sans Fonfría, Ramón(1999), "Ingeniería Ambiental: Contaminación y tratamientos". Alfa Omega Grupo Editor. S.A. de C.V. Colombia.

- SEMARNAP (1996), "Programa Para la Minimización y Manejo Integral de Residuos Industriales Peligrosos en México.1996-2000". SEMARNAP, México.
- Shugar, Gerson J., Et. Al. (1990), "Chemical Technicians Ready Reference Handbook". Third Edition. Ed. McGraw-Hill, Inc.
- Tedder, D. William (1990), "Emerging Technologies In Hazardous Waste Management", American Chemical Society, Washington, D.C., E.U.A.
- Treybal, Robert E. (1968), "Mass-Transfer Operations", McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 2a. Ed. E.U.A.
- Turk, Amos, et. al. (1973), "Ecología, Contaminación, Medio Ambiente". Nueva Editorial Interamericana S.A. de C.V., México.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (1992), "Detemination of petroleum hydrocarbons in sediments. Reference methods for marine pollultlon studies no. 20".
- Vega de Kuyper, Juan C. (1999), "Manejo de Residuos de la Industria Química y Afín". Segunda Edición, Alfa Omega Grupo Editor S.A. de C.V. México.
- Willard, et. al. (1981), "Instrumental Methods of Analysis", sexta edición, D. Van Nostrand Company.

**APENDICE 1. Cálculo de la columna de destilación**

PROGRAMA FENSKE-UNDERWOOD-GILLIGAND  
TOMANDO COMO BASE CLAVE LIGERO Y CLAVE PESADO  
DETERMINA COMPOSICIONES Y FLUJOS RESPECTIVOS EN DESTILADO Y  
FONDOS

HUANG-YANG CHANG, HYDROCARBON PROCESSING, AGOSTO 1980  
CASAS VAZQUEZ ALFREDO

No. DE COMPONENTES: 2  
FLUJO [Kgmol/hr]: 0.00217  
No. CLAVE LIGERO [LK]: 1  
No. CLAVE PESADO [HK]: 2  
CALOR DE ALIMENTACIÓN [q]: .9  
REFLUJO MÍNIMO [Rmin.]: 1.15  
COMPOSICIÓN DE HK EN DESTILADO [YDHK 0.2 A .0001]: 0.02  
COMPOSICIÓN DE LK EN FONDOS [XBLK 0.2 A .0001]: 0.02  
VALOR DE ALIMENTACIÓN ZF( 1 ) : .4478  
VALOR DE ALIMENTACIÓN ZF( 2 ) : .5522  
VALOR DE VOLATILIDAD RELATIVA ALFA( 1 ) : 2.932  
VALOR DE VOLATILIDAD RELATIVA ALFA( 2 ) : 1  
VALOR INICIO FLUJO [LK] EN DESTILADO [DFLK .6 A .9]: 0.98  
VALOR INICIO FLUJO [HK] EN FONDOS [BFHK .6 A .9]: 0.98

\*\*\*\*\* DATOS DE ENTRADA \*\*\*\*\*

No. DE COMPONENTES: 2  
FLUJO [Kgmol/hr]: 0.00  
No. CLAVE LIGERO: 1  
No. CLAVE PESADO: 2  
CONDICIÓN TÉRMICA DE ALIMENTACIÓN [q]: 0.9000  
OPERACIÓN DE REFLUJO ES: 1.1500 VECES EL Rmin

COMPOSICIONES Y VOLATILIDADES

I	XF(I)	ALFA(I)
1	0.4478	2.9320
2	0.5522	1.0000

COMPOSICIONES ESPECIFICADAS: XD(HK)= 0.0200 XB(LK)= 0.0200

VALORES INICIO: DFLK= 0.9800 BFHK: 0.9800

\*\*\*\*\* DATOS DE SALIDA \*\*\*\*\*

DESPÚES DE 4 ITERACIONES, LOS VALORES SON:

DFLK: 0.9753 BFHK: 0.9839

I	D(I)	XD(I)	B(I)	XB(I)
1	0.94772E-03	0.98003E+00	0.24005E-04	0.19955E-01
2	0.19316E-04	0.19975E-01	0.11790E-02	0.98004E+00

TOTAL 0.96704E-03 0.12030E-02

NÚMERO MÍNIMO DE PLATOS: 7.239

PHI: 1.615433 Rmin: 2.150

A Rop: 1.323 No. DE PLATOS TEÓRICOS: 18.645

Con una eficiencia del 85%

Diámetro de la columna Dc= 0.011 m

Altura de la columna Hc= 16.47 m

**ANEXO A. Prueba CRETIB**

**1.** Un residuo se considera peligroso por su corrosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

**1.1** En estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0, o mayor o igual a 12.5.

**1.2** En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55°C es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.

**2.** Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

**2.1** Bajo condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera), se combina o polimeriza violentamente sin detonación. En condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH; ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H<sub>2</sub>S/kg de residuo. Es capaz de producir radicales libres.

**3.** Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

**3.1** Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenzeno.

**3.2** Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm<sup>2</sup> de presión.

**4.** Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando presenta la siguiente propiedad:

**4.1** Cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-053-ECOL-1993, el lixiviado de la muestra representativa que contenga cualquiera de los constituyentes listados en las tablas 5, 6 y 7, en concentraciones mayores a los límites señalados en dichas tablas.

**5.** Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

**5.1** En solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen.

**5.2** Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60°C.

**5.3** No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm<sup>2</sup>).

**5.4** Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.

**6.** Un residuo con características biológico infecciosas se considera peligroso cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

**6.1** Cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.

**6.2** Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

**7.** La mezcla de un residuo peligroso conforme a esta norma con un residuo no peligroso será considerada residuo peligroso.

**ANEXO B. Etiquetas para los residuos y sustancias recuperadas.**

De acuerdo a las normas oficiales mexicanas NOM-003-SCT/2000, referente a las características de las etiquetas de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos; NOM-007-SCT2/1994, referente al marcado de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos; NOM-011-SCT2/1994, referente a las condiciones para el transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos en cantidades limitadas; se elabora el siguiente procedimiento con la adaptación de etiquetas para identificación de los residuos generados en LAFQA.

Para la aplicación de este procedimiento se debe tener en cuenta que:

- a) Conocer el tipo de residuos que se está generando, componentes, características de esos componentes y establecer el componente principal con el cual se establecerán las características de riesgo a indicar en la etiqueta (el criterio para establecer el componente principal del residuo es que se indique como componente principal al de mayor peligrosidad dentro del residuo).
- b) Al conocer el tipo de residuo que se está generando se puede tener acceso al tipo de desactivación adecuada a ese residuo, de acuerdo a la tabla de residuos dentro del laboratorio.



c) El procedimiento siguiente contiene tres tipos de etiquetas, las que serán utilizadas de acuerdo a la etapa en la que se encuentre el residuo, las etapas que se tiene tipificadas son las siguientes:

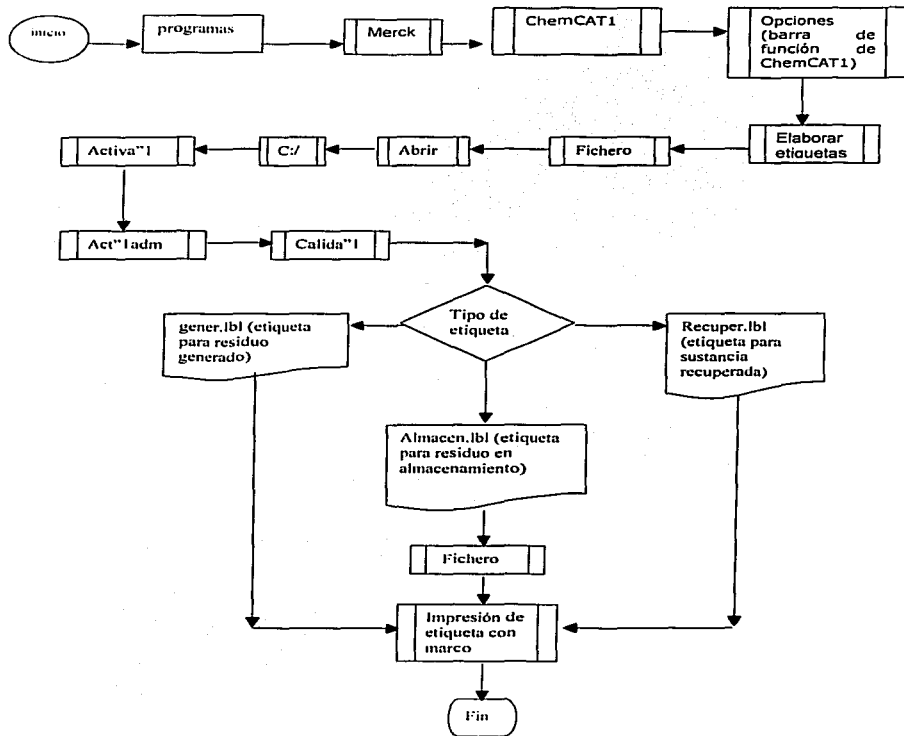
1. *Residuo Generado*: es el residuo que va generando el técnico y se almacena temporalmente en el área de trabajo sin desactivar y a la cual se le coloca la etiqueta indicando el tipo de desactivación a la que será sometido el residuo, las características del residuo, la persona que lo generó, el área de la cual proviene y los riesgos potenciales al manejar ese tipo de residuo.
2. *Residuo en almacenamiento*: es el residuo después de ser desactivado o aislado y que se encuentra listo para un almacenamiento más largo, sin llegar a ser un confinamiento, las características de este almacenamiento están indicadas en la tabla de residuos dentro del laboratorio. Esta etiqueta indica el tipo de residuo que se está almacenando, la fecha de ingreso al almacenamiento, las características de almacenamiento y de riesgo del residuo, el procedimiento por el cual se desactivo y la persona que se encargo de la desactivación.
3. *Sustancia recuperada*: esta sustancia es la que se puede reutilizar dentro de un proceso químico, después de hacer una recuperación o separación de algún otro residuo. La etiqueta nos informa del tipo de sustancia, la pureza, el método por el cual se determino su pureza y por el que se obtuvo su

recuperación, la persona que se encargó de la recuperación y las características de riesgo de esa sustancia.

- d) El técnico que genere residuo será el responsable de elaborar la etiqueta, de acuerdo al tipo de residuo antes mencionado, y almacenarlo de acuerdo a las características indicadas en la tabla de residuos.
- e) Será responsabilidad del técnico establecer las cantidades que se generarán de residuo de acuerdo a su plan de trabajo para indicar al responsable del área general el tipo y cantidad de recipientes que utilizarán para almacenar sus residuos.
- f) El recipiente debe estar limpio y seco para iniciar el almacenamiento de los residuos, la limpieza y recolección del tipo de recipientes es responsabilidad del técnico.
- g) Se debe informar al responsable del área general la cantidad y tipo de recipientes que se recogen de la zona de almacenamiento de residuos y la cantidad y tipo de residuos que se almacenarán.

**Nota:** El software para la elaboración de etiquetas se encuentra disponible en todas las computadoras del área general.

Ruta de acceso al programa para elaborar etiquetas.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Llenado de etiquetas

## I. Etiqueta para residuo generado

1. Especie principal del residuo	Es la especie de mayor peligrosidad que se encuentra en el residuo
2. Otras especies involucradas en el proceso químico	Se refiere a las especies presentes en el residuo después de la de mayor peligrosidad
3. Área de donde proviene el residuo	Área de proceso químico donde se generó el residuo
4. Nombre y fecha	Nombre de la persona que genera el residuo y la fecha en la que se almacena
5. Indicar el tratamiento realizado por el analista	Se indica el tratamiento que le realizó el analista antes de su completa desactivación en caso de no habersele tratado se indica con N.A.
6. No. de riesgo para la salud	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
7. No. de riesgo de inflamabilidad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
8. No. de riesgo de reactividad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo a la reactividad del residuo con otras especies, las indicaciones de este tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
9. Equipo de protección personal	Es el equipo de protección personal mínimo que se debe de utilizar al manejar este tipo de residuos, se encuentra indicado en las hojas de seguridad de residuos
10. Riesgo especial	Esta parte de la etiqueta se refiere a los riesgos que se pueden presentar en el manejo de los residuos y que no son muy comunes
11. Antídoto	Este espacio debe ser llenado con el antídoto para el residuo en caso de ser ingerido por alguna persona
12. Tratamiento a realizar	Es el tratamiento de desactivación que se le va a realizar al residuo

## II. Etiqueta para residuo en almacenamiento

1. Nombre del residuo	Es el nombre del residuo desactivado que se va almacenar
2. Proyecto	Nombre del proyecto del cual se generó el residuo
3. Área de donde proviene	Es el área de análisis químicos donde se generó el residuo
4. Nombre del analista	Llenar con el nombre de la persona que generó y desactivó el residuo
5. No. de riesgo para la salud	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
6. No. de riesgo de inflamabilidad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
7. No. de riesgo de reactividad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo a la reactividad del residuo con otras especies, las indicaciones de este tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
8. Equipo de protección personal	Es el equipo de protección personal mínimo que se debe de utilizar al manejar este tipo de residuos, se encuentra indicado en las hojas de seguridad de residuos
9. Riesgo especial	Esta parte de la etiqueta se refiere a los riesgos que se pueden presentar en el manejo de los residuos y que no son muy comunes
10. Tratamiento realizado	Es el tratamiento por el cual se desactivo el residuo

## III. Etiqueta para sustancia recuperada

1. Nombre	El nombre de la sustancia que se recuperó
2. Método de análisis	Es el nombre del método por el cual se comprobó la pureza de la sustancia recuperada
3. Pureza	Es el grado de pureza de la sustancia que se recuperó y se determino por el método anteriormente señalado
4. No. de riesgo para la salud	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
5. No. de riesgo de inflamabilidad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo al tipo de residuo, las indicaciones para el tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
6. No. de riesgo de reactividad	Este número de riesgo se encuentra establecido de acuerdo a la reactividad del residuo con otras especies, las indicaciones de este tipo de riesgo se encuentran en las hojas de seguridad de residuos
7. Procedimiento de recuperación	Es el nombre del método por el cual se hizo la recuperación de la sustancia
8. Equipo de protección personal	Es el equipo de protección personal mínimo que se debe de utilizar al manejar este tipo de residuos, se encuentra indicado en las hojas de seguridad de residuos
9. Riesgo especial	Esta parte de la etiqueta se refiere a los riesgos que se pueden presentar en el manejo de los residuos y que no son muy comunes
10. Características de almacenamiento	Son las condiciones a las cuales debe ser almacenado el residuo después de ser desactivado, estas condiciones se encuentran en la tabla de residuos
11. Encargado de la recuperación	Es el nombre de la persona que hizo la recuperación.

**ANEXO C. Equilibrio químico****PRODUCTO DE SOLUBILIDAD.**

El equilibrio entre las especies iónicas en las soluciones acuosas, merece atención especial debido a su importancia en la química, analítica y fisiológica. El problema de encontrar una sal poco soluble, implica una de las aplicaciones de los principios del equilibrio químico.

El valor del producto de solubilidad determina, a una temperatura dada, las concentraciones de los iones que pueden existir en la solución en equilibrio con la fase sólida aunque ésta se encuentre en exceso. Si en forma general representamos un compuesto poco soluble por la fórmula  $B_nA_m$  y suponemos que su reacción de disociación produce aniones  $A^{n-}$  y cationes  $B^{m+}$ , el equilibrio de disociación y el producto de solubilidad serán:



$$K_{ps} = [A^{n-}]^n [B^{m+}]^m$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO D. Condiciones de trabajo del instrumento de Absorción Atómica.***Cadmio total en el residuo.*

Se utilizó una solución patrón de nitrato de cadmio (II) con una concentración de 1000 mg/L, para realizar la curva de calibración. El intervalo de concentración fue de 0 a 2 ppm.

Parámetros de trabajo del instrumento:

Elemento determinado: Cadmio

Ancho de ventana: 0 nm

Fotomultiplicador: 41 % ganancia

Identif. Estándar madre: OCO71983

$\lambda = 228.8$  nm

Tipo de flama: aire-acetileno

Flujo de muestra: 7 mL/min

Sistema de atomización: Flama

*Cobre total en el residuo.*

Se utilizó una solución patrón de nitrato de cobre (II) con una concentración de 1000 mg/L, para realizar la curva de calibración. El intervalo de la curva de calibración fue de 0 a 5.5 ppm.

Parámetros de trabajo del instrumento:

Elemento determinado: Cobre



Ancho de ventana: 0.5 nm  
Fotomultiplicador: 149 V  
Identif. Estándar madre: OC 191494  
 $\lambda = 324.4$  nm  
Tipo de flama: aire-acetileno  
Flujo de muestra: 7.0 mL/min  
Sistema de atomización: Flama

*Plomo total en el residuo*

Se utilizó una solución patrón de nitrato de plomo con una concentración de 1000 mg/L, para realizar la curva de calibración, la cual se encontró dentro de un rango de 0 a 2.5 mg/L.

Parámetros de trabajo del instrumento:  
Elemento determinado: plomo  
Ancho de ventana: 1.0 nm  
 $\lambda = 217.0$  nm  
Tipo de flama: aire-acetileno  
Flujo de muestra: 6.4 mL/min  
Sistema de atomización: flama.  
Identificador de estándar madre: OC042278

*Zinc total en el residuo*

Se utilizó una solución patrón de nitrato de zinc con una concentración de 1000 mg/L, para realizar la curva de calibración; la cual se encontró dentro del rango de 0 a 1.10 ppm.

Parámetros de trabajo del instrumento:

Elemento determinado: Zinc

Ancho de ventana: 1.0 nm

Fotomultiplicador: 275.3 V

Identif. estándar madre: 00415218

$\lambda = 213.9$  nm

Tipo de Flama: aire-acetileno

Flujo de muestra: 6.8 mL/min

Sistema de atomización: flama

**ANEXO E. Condiciones de trabajo del Cromatógrafo de Gases.**

A los disolventes recuperados se les analizó la pureza por un análisis de cromatografía de gases de acuerdo a las siguientes condiciones:

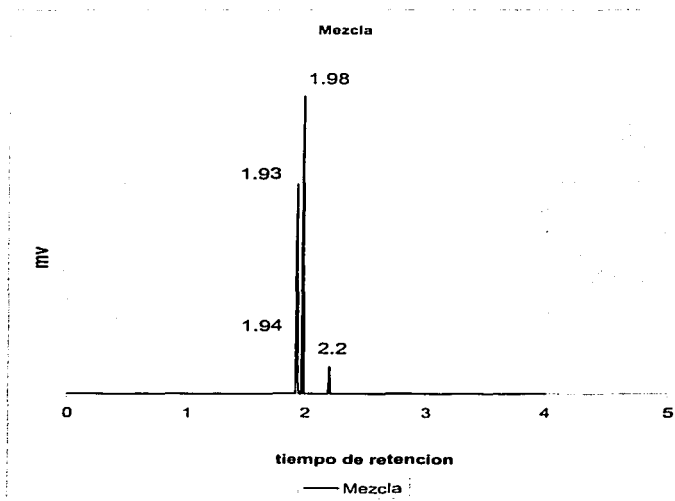
- 1) Temperatura inyector / detector: 250°C
- 2) Apertura 500:1
- 3) Flujo de muestra: 1  $\mu$ L
- 4) Programa de temperatura: inicio 50°C por 3 min  
50°C/min hasta 250 °C  
250°C por 1 min
- 5) Columna: DB5
- 6) Longitud: 30 m
- 7) Diámetro: 25 micras
- 8) Gas acarreador: nitrógeno

TRABAJO CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO F. Cromatogramas.**

Cromatograma de mezcla de disolventes.

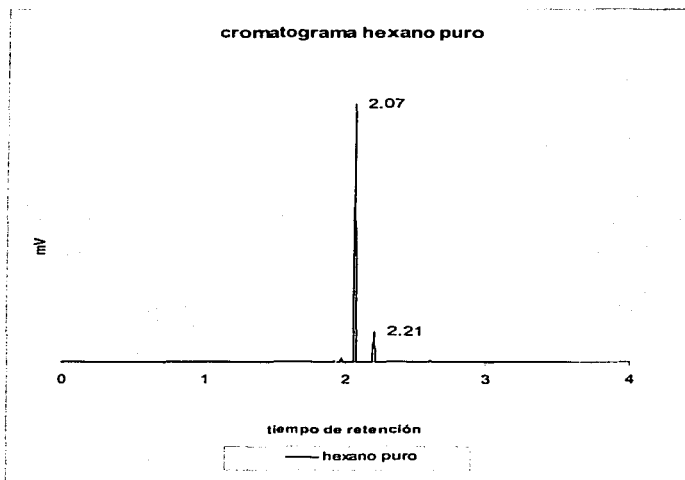
Concentración	Tiempo de retención (min)
38.1555	1.930
2.6676	1.941
54.2907	1.982
4.8862	2.210
Total	100.0000



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de hexano puro.

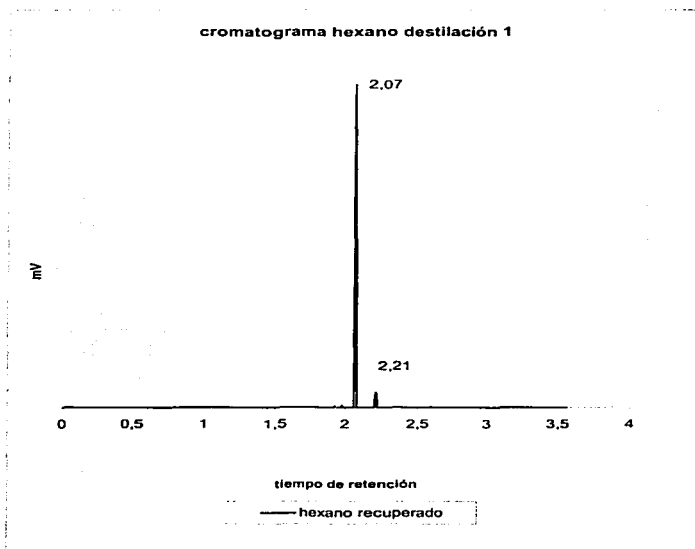
Concentración	Tiempo de retención (min)
0.3067	1.981
1.2397	1.983
88.1385	2.066
10.0905	2.210
0.2246	2.602
Total	100.0000



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de hexano destilado 1.

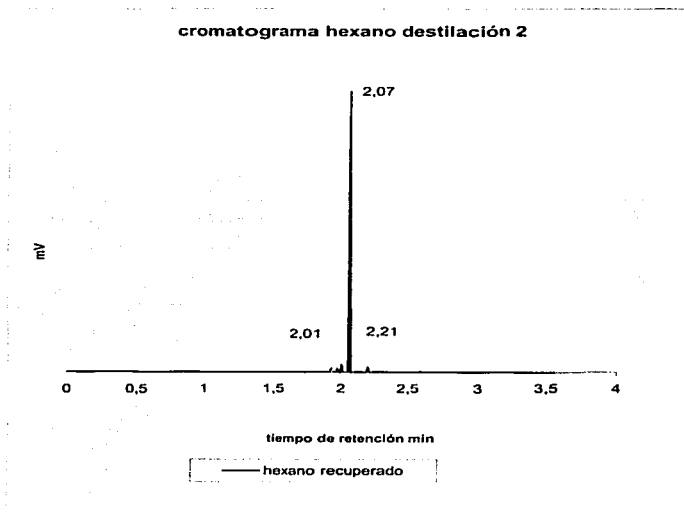
Concentración	Tiempo de retención (min)
0.3102	1.931
0.6063	1.984
94.7152	2.069
4.3683	2.208
Total	100.0000



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de hexano destilado 2.

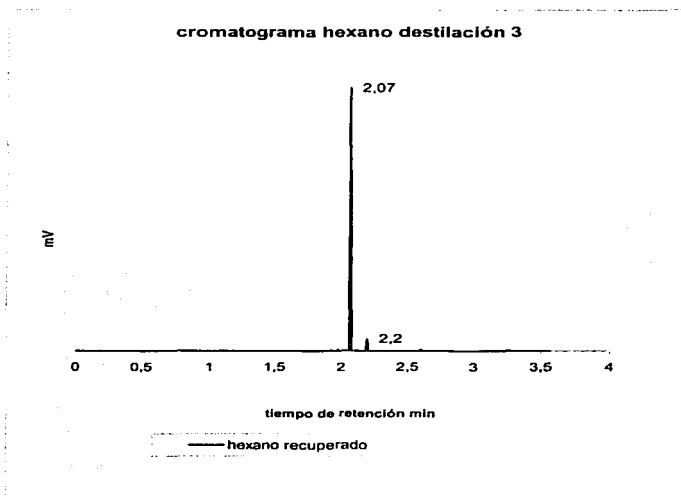
Concentración	Tiempo de retención (min)
1.2383	1.931
1.2353	1.984
2.4481	2.011
93.4463	2.067
1.6319	2.206
Total	100.0000



TESIS CON  
FALLA DE CARGEN

Cromatograma de hexano destilado 3.

Concentración	Tiempo de retención (min)
0.3382	1.929
0.6439	1.981
94.0092	2.068
4.3060	2.205
0.1931	2.386
0.5092	2.600
Total	99.9999



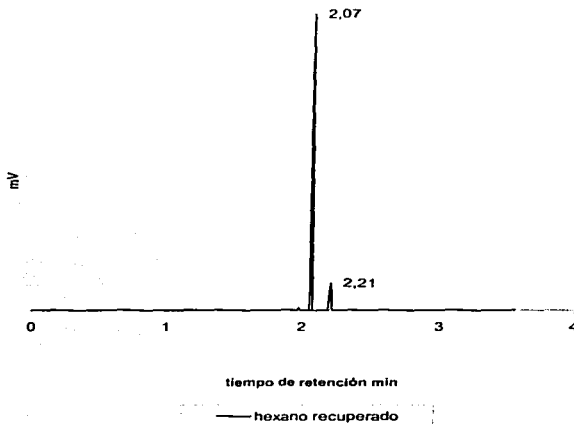
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Cromatograma de hexano destilado 4.

Concentración	Tiempo de retención (min)
0.7258	1.983
91.0298	2.069
8.2444	2.210
Total	100.0000

cromatograma hexano destilación 4

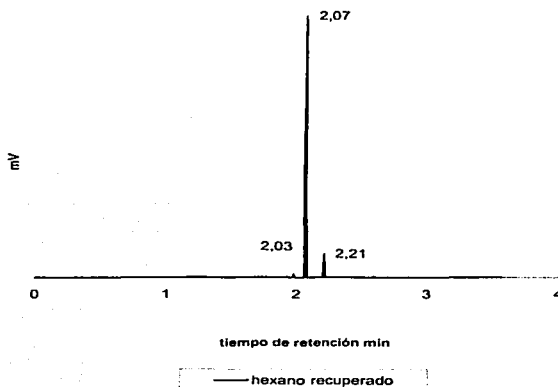


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de hexano destilado 5.

Concentración	Tiempo de retención (min)
0.3300	1.930
1.2000	1.980
90.1535	2.069
8.0050	2.208
0.3115	2.600
Total	100.0000

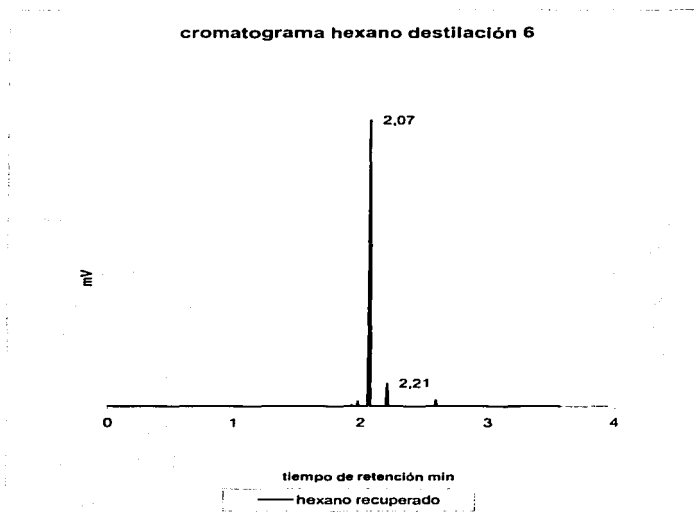
cromatograma hexano destilación 5



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de hexano destilado 6.

Concentración	Tiempo de retención (min)
0.3115	1.930
1.505	1.980
89.1915	2.069
7.021	2.208
1.971	2.600
Total	100.0000

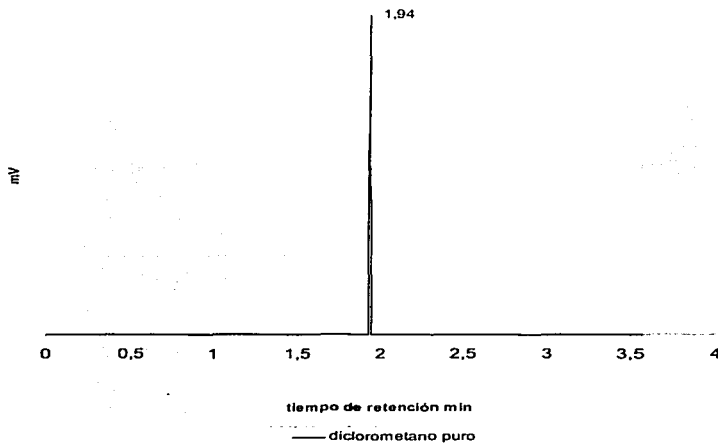


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano puro.

Concentración	Tiempo de retención (min)
1.9849	1.930
98.0151	1.942
Total	100.0000

cromatograma diclorometano puro

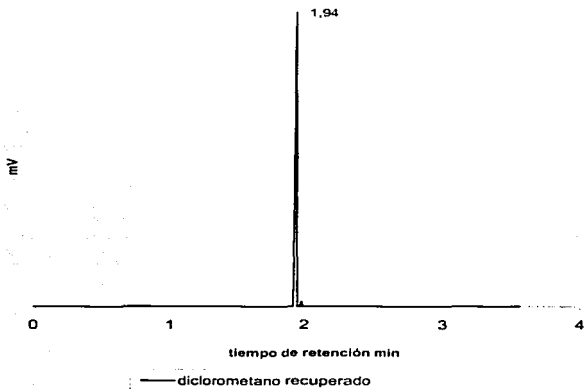


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano destilado 1.

Concentración	Tiempo de retención (min)
25.2035	1.938
73.6300	1.942
1.1665	1.980
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 1

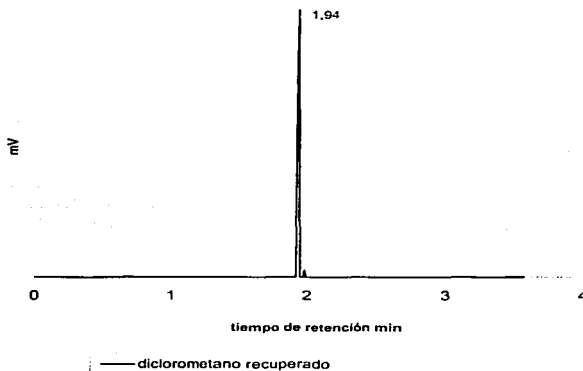


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano destilado 2.

Concentración	Tiempo de retención (min)
38.1555	1.938
60.2913	1.942
1.5532	1.985
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 2

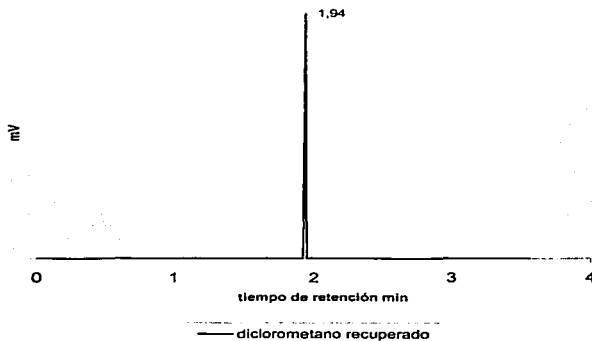


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano destilado 3.

Concentración	Tiempo de retención (min)
21.7452	1.941
78.0001	1.942
0.2547	1.985
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 3

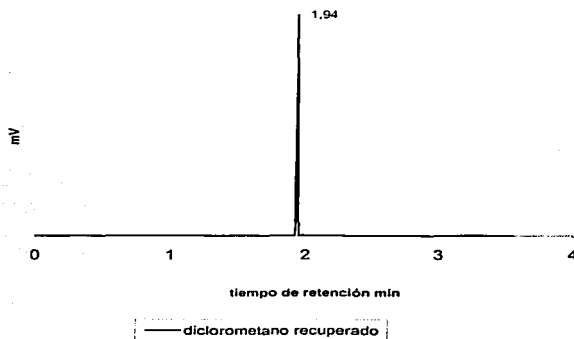


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano destilado 4.

Concentración	Tiempo de retención (min)
10.5512	1.938
89.0001	1.942
0.4487	1.985
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 4



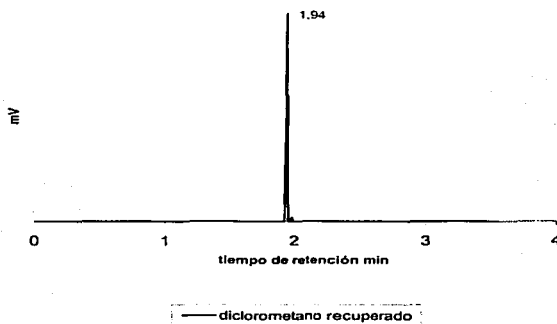
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Cromatograma de diclorometano destilado 5.

Concentración	Tiempo de retención (min)
30.5029	1.941
68.2512	1.942
1.2459	1.980
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 5



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cromatograma de diclorometano destilado 6.

Concentración	Tiempo de retención (min)
30.5029	1.941
68.2512	1.942
1.2459	1.980
Total	100.0000

cromatograma diclorometano destilado 6



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **ANEXO F. Estabilización / Solidificación**

La estabilización / solidificación es la tecnología en la cual un material de desecho es mezclado con otros materiales los cuales tienden a volverse sólidos, estos capturan el residuo dentro de la estructura solidificada.

Aunque los términos solidificación y estabilización son utilizados de manera semejante representan diferentes conceptos para el control de los residuos:

- Solidificación sugiere la formación de un sólido, una masa monolítica con una estructura suficiente para ser transportada o utilizada en piezas de tamaño conveniente y que no requieren de un recipiente secundario.
- La estabilización química sugiere la inmovilización de las sustancias tóxicas las cuales son transformadas a las formas cristalinas estables e insolubles del compuesto.

El objetivo principal de estos procesos es convertir los residuos tóxicos en formas inertes, masas físicamente estables con suficiente fuerza mecánica para permitir mandarlas a un relleno o confinamiento controlado.

Los sistemas de solidificación / estabilización pueden agruparse en las siguientes clases de procesos: (Poon en Espíndola, 1994)

- 1) Solidificación por medio de adición de cemento.

- 2) Solidificación por medio de adición de cal u otros materiales puzolánicos.
- 3) Fijación de residuos en materiales termoplásticos como betún, parafinas o polietileno.
- 4) Micro-encapsulación.
- 5) Macro-encapsulación de residuos en una cubierta inerte.

Los dos primeros métodos son los más utilizados para una gran mayoría de residuos inorgánicos y los más adecuados a la infraestructura del laboratorio.

Las técnicas basadas en la cementación generalmente utilizan cemento Pórtland con aditivos para mejorar las características físicas y reducir el lixiviado proveniente del residuo solidificado resultante (World Bank Technical Paper Number 93, 1989).

Los residuos peligrosos se mezclan en una suspensión con agua y polvo de cemento. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación a partir de compuestos de silicio y agua, produciéndose un gel de silicato de calcio hidratado que va creciendo y forma la matriz de cemento compuesta de fibras de silicato entrelazadas y productos de hidratación.

Algunos compuestos pueden interferir en los procesos de solidificación como las sales solubles de manganeso, estaño, cobre y plomo, pueden incrementar los tiempos de fraguado y reducir de forma considerable las fuerzas físicas.

Las variaciones en el proceso pueden afectar o mejorar las características físicas químicas del residuo. Para líquidos y suspensiones residuales, se adicionan agentes aglutinantes, generalmente cenizas finas para proporcionar una consistencia conveniente para la adición del cemento (idem, 1989).

Los procesos basados en cal en combinación con los materiales puzolánicos producen matrices cementosas que atrapan al residuo física y químicamente.

Las puzolanas se definen como materiales que no producen cementación por sí mismos, contienen constituyentes que en combinación con cal a temperatura normal y en presencia de agua forman compuestos insolubles estables (idem, 1989).

Pueden utilizarse materiales naturales, incluyendo el polvo volcánico y las cenizas y las puzolanas artificiales como la arcilla quemada. La lutaína, mortero quemado y la ceniza fina. Los materiales puzolánicos más empleados en los procesos de fijación química son las cenizas finas y el polvo del horno de cemento (idem, 1989).

Los procesos basados en el cemento son más versátiles que los procesos ceniza-cal, se pueden formular para una resistencia excepcional y además retiene efectivamente contaminantes específicos.

Ciertos componentes residuales pueden interferir con la fijación y estabilidad de los procesos que se basan en cemento. Estos materiales abarcan los boratos, sulfato de calcio, fenol, aceites y grasas. Los ácidos pueden reaccionar con el concreto y destruir la matriz después de su fijación, lo cual induce la liberación de contaminantes al ambiente, por lo que es necesario que a los residuos ácidos primero se le agregue cal o ceniza para espesarlo e incrementar su pH arriba de 7. (Espíndola, 1994)

El costo de solidificación y estabilización se considera bajo en comparación con otras técnicas de tratamiento. Esto se debe a que la materia prima para este tipo de procesos es muy económica (por ejemplo, ceniza muy fina, cementos y cal), en la mayoría de estos procesos los requerimientos son muy sencillos.

Los objetivos iniciales de este tipo de tratamientos se enfocaron a la necesidad de producir un residuo más manejable, en vez de tener un producto que cumpla los requerimientos de reglamentación más estrictos. (Wiles Espíndola, 1994)

Debido a que las restricciones de rellenos sanitario son más estrictas y se rechazan los residuos para su disposición en la tierra, esta tecnología puede ser una alternativa muy importante en orden de tratar al residuo y convertirlo en aceptable para este tipo de disposición. Una baja permeabilidad, menor cantidad de lixiviado y características similares, hacen a un residuo peligroso aceptable para su disposición en la tierra después de su estabilización (Espíndola, 1994).

## Vitrificación

La vitrificación es una técnica de estabilización la cual se refiere a la fundición y fusión de materias a temperaturas normalmente en exceso de los 1600°C seguida por el rápido enfriamiento a una forma amorfa y no cristalina.

Se considera a la vitrificación como un procedimiento de solidificación y estabilización ya que convierte al residuo a una estructura más estable con un potencial reducido para la migración de contaminantes al medio ambiente.

Para poder asegurar que los residuos que se vitrifican o solidifican son seguros es necesario aplicarles una prueba en la cual se compruebe su resistencia y eficiencia en capturar los residuos dentro de la estructura formada. Las pruebas que se realizan son de acuerdo a la ASTM, extracción de los metales solubles en una relación 1:20 agua: sólido, manteniendo en agitación durante 18 hrs a 240 rpm; y la otra prueba de acuerdo a la EPA, la cual consiste en extraer los metales solubles de la misma manera que la anterior pero el líquido extractante es una mezcla de ácido sulfúrico y nítrico con pH 5.