

151
2eq.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**

**TECNOLOGIAS DE PUNTA PARA LA REDUCCION,
MINIMIZACION Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS
PELIGROSOS**

**TRABAJO MONOGRAFICO DE
ACTUALIZACION
PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
PRESENTADO POR:
CARLOS ROSAS FLORES**

260921



TESIS CON FALLA DE ORIGEN MEXICO, D. F.

1998.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Jurado asignado:

Presidente: Prof. Margarita E. Gutiérrez Ruiz.

Vocal: Prof. Eduardo Marambio Dennett

Secretario Prof. Ramón E. Domínguez Betancourt

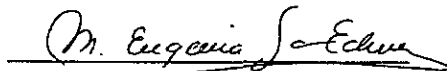
1er. Suplente: Prof. Rodolfo Torres Barrera

2do. Suplente: Prof. Landy I. Ramírez Burgos

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Geografía, Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente
Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor del tema:



M. en C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz

Asesor técnico:



M. en C. Irene Sommer Cervantes

Sustentante:



Carlos Rosas Flores

Dedicatoria

A Dios

Por darme la tenacidad para alcanzar mis metas

A mis padres

Demetrio y Ma. Martha, por darme la vida, su cariño y confianza

A mi esposa Jacqueline

Por su amor, apoyo, paciencia y comprensión para realizar este trabajo

A mis hermanos

Martín, Héctor, Juan J., Gloria, Lucrecia, P. Xochilt, y Daniel

Agradecimientos

*A la M. en C. Margarita Gutiérrez Ruiz por darme la oportunidad de aprender,
y realizar este trabajo*

A la M. en C. Irene Sommer Cervantes por sus valiosos comentarios

Al Prof. Dr. Bertram Nagel por su amistad y apoyo

*A mis amigos y compañeros del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del
Ambiente del Instituto de Geografía : Alma, Claudia, Estela, Gloria, Ma.
Eugenia, Paloma, Paty, Pilar, Silke, Arcadio, Gustavo, Heriberto, Joachim,
Jorge, José, Oscar, Ricardo y Toño.*

Índice

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Clasificación	7
1.3 Principales fuentes de residuos peligrosos	13
1.4 Inventario de generación de residuos peligrosos en el mundo	14
2. LEGISLACIÓN SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS	20
2.1 Generalidades	20
2.2 Tratado de Libre Comercio (TLC)	20
2.3 Estados Unidos de Norteamérica	23
2.3.1 Estructura de la reglamentación estadounidense.....	23
2.3.2 Criterios y definiciones sobre generación de residuos.....	24
2.3.3 Identificación, almacenamiento, reducción y disposición.....	25
2.3.4 Transportación, exportación e importación.....	27
2.3.5 Tratados Internacionales.....	27
2.4 Canadá	28
2.4.1 Estructura de la reglamentación canadiense.....	28
2.4.2 Criterios y definiciones sobre la generación de residuos.....	29
2.4.3 Identificación, almacenamiento, recuperación y disposición.....	29
2.4.4 Transportación, exportación e importación.....	30
2.4.5 Tratados Internacionales.....	30
2.5 México	31
2.5.1 Estructura de la reglamentación mexicana.....	31
2.5.2 Criterios y definiciones sobre generación de residuos.....	32
2.5.3 Identificación, almacenamiento, recuperación y disposición.....	33
2.5.4 Transporte, exportación e importación.....	36
2.5.5 Tratados Internacionales.....	37
3. REDUCCIÓN Y MINIMIZACIÓN	39
3.1 Generalidades	39
3.2 Definición de minimización y reducción	39
3.3 Políticas en el manejo de residuos peligrosos	42
3.3.1 Prevención.....	42
3.3.2 Reducción en la fuente.....	44
3.3.3 Recuperación y reciclado.....	45
3.3.4 Segregación y concentrado.....	46
3.3.5 Intercambio de residuos.....	47
3.4 Programa de minimización de residuos peligrosos	49
3.4.1 Definición.....	49
3.4.2 Estructura general.....	50
3.4.3 Barreras a un programa de minimización.....	53

4. TECNOLOGÍAS TRADICIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS	54
4.1 Tratamientos físicos y químicos ("físicoquímicos").....	54
4.1.1 Separaciones líquido-sólido.....	54
4.1.2 Extracción	55
4.1.3 Precipitación química	55
4.1.4 Neutralización	56
4.1.5 Óxido-reducción	56
4.1.6 Solidificación/estabilización y encapsulamiento	57
4.2 Biotratamientos de residuos peligrosos	59
4.2.1 Tratamientos aeróbios.....	60
4.2.1 Tratamientos anaeróbios	61
4.2.2 Limitaciones de los biotratamientos	62
4.3 Incineración	64
4.3.1 Antecedentes	64
4.3.2 Aspectos teóricos	65
4.3.3 Efluentes.....	67
4.3.4 Tipos de incineradores	68
4.3.5 Ventajas y desventajas de la incineración.....	75
4.4 Disposición final.....	76
4.4.1 Aplicación en el suelo (landfarming)	78
4.4.2 Confinamientos controlados.....	80
4.4.3 Inyección en pozos profundos	86
4.4.4 Minas abandonadas y domos salinos.....	87
5. NUEVAS TECNOLOGÍAS TÉRMICAS	89
5.1 Generalidades.....	89
5.2 Pirólisis	89
5.2.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso	89
5.2.2 Consideraciones.....	94
5.3 Proceso de oxidación con aire húmedo (OAH).....	94
5.3.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso.....	94
5.3.2 Consideraciones.....	96
5.4 Oxidación con agua a condiciones supercríticas (OACS)	98
5.4.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso	98
5.4.2 Consideraciones.....	101
5.5 Tecnología "Reducción en fase gas".....	101
5.5.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso.....	101
5.5.2 Consideraciones.....	105
5.6 Proceso de baño con vidrio fundido (Molten Glass Process)	105
5.6.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso.....	106
5.6.2 Consideraciones.....	109
5.7 Pirólisis con metal fundido (Molten Metal Process).....	109
5.7.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso.....	109
5.7.2 Consideraciones.....	111
5.8 Proceso de arco de plasma.....	112
5.8.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso.....	112
5.8.2 Consideraciones.....	113

6. LIMITANTES DE LAS POLÍTICAS E INSTRUMENTOS PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS.....	116
6.1 Políticas e instrumentos	116
6.2 Tecnológicas	121
6.3 Propuesta de solución	123
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125

Lista de Cuadros y figuras

Cuadros

Cuadro 1.1	Generación de residuos peligrosos en el mundo	14
Cuadro 1.2	Distribución regional de la generación de residuos peligrosos	15
Cuadro 1.3	Sectores de la industria nacional	15
Cuadro 1.4	Residuos peligrosos que se generan con mayor frecuencia en México	17
Cuadro 1.5	Propuesta de manejo de los residuos peligrosos en México	19
Cuadro 2.1	Principales funciones de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos	32
Cuadro 3.1	Implicaciones de la producción limpia	42
Cuadro 3.2	Acciones para la reducción de residuos en la fuente	44
Cuadro 3.3	Grupo de residuos que comúnmente se intercambian	48
Cuadro 3.4	Ejemplo de una oferta de intercambio de residuos	49
Cuadro 3.5	Ventajas y desventajas del intercambio de residuos	49
Cuadro 3.6	Etapas de un programa de minimización de residuos peligrosos	52
Cuadro 3.7	Actividades generales de las etapas de un programa de minimización de residuos peligrosos	52
Cuadro 4.1	Situación actual de la incineración en el mundo	65
Cuadro 4.2	Contaminantes en las emisiones de la incineración	67
Cuadro 4.3	Uso de residuos industriales en hornos cementeros	74
Cuadro 4.4	Ventajas y desventajas del uso de residuos peligrosos como combustibles alternos	75
Cuadro 4.5	Exposición de poblaciones a metales por la disposición inadecuada de residuos industriales	76
Cuadro 4.6	Ejemplos de exposición de poblaciones a confinamientos no controlados de residuos industriales	77

Cuadro 6.1	Normas relacionadas con el manejo y disposición de residuos peligrosos	120
Cuadro 6.2	Comparación de los costos de tecnologías y procesos para el manejo de residuos peligrosos	122
Figura		
Figura 1.1	Flujo de materiales en un proceso lineal (generación de desechos)	4
Figura 1.2.	Concepto de peligrosidad para el ambiente	5
Figura 1.3	Representación espacial de los tres parámetros relacionados con la peligrosidad de los residuos	7
Figura 1.4.	Principales parques industriales generadores de residuos peligros en México	18
Figura 1.5	Generación de residuos peligrosos en México en el presente siglo	19
Figura 3.1	Técnicas de minimización propuestas por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA)	40
Figura 3.2	Concepto de reducción y minimización	41
Figura 3.3 a	Lineamientos y políticas de control en materia de residuos peligrosos propuestos por la Semarnap	43
Figura 3.3 b	Estrategia en el manejo de los residuos peligrosos propuesta por la PNUMA	43
Figura 3.4	Diagrama básico del programa de minimización de residuos peligroso	51
Figura 4.1	Diagrama de un incinerador de Inyección líquida	69
Figura 4.2	Diagrama de un incinerador de lecho fluidizado	71
Figura 4.3	Diagrama de un incinerador de horno rotatorio	72
Figura 4.4	Diagrama de un horno de hogar múltiple	73
Figura 5.1	Diagrama de flujo del proceso de pirólisis	93
Figura 5.2	Diagrama de flujo del proceso de oxidación con aire húmedo	97

Figura 5.3	Diagrama de flujo del proceso de oxidación a condiciones supercríticas	100
Figura 5.4	Diagrama de flujo del proceso de reducción en fase gas	104
Figura 5.5	Diagrama de proceso de vitrificación <i>In Situ</i> (Molten Glass Process)	108
Figura 5.6	Diagrama del proceso Molten Metal	110
Figura 5.7	Diagrama del proceso de plasma	114

INTRODUCCIÓN

Uno de los mas importantes problemas al que la sociedad actual se enfrenta, es el manejo (generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición) de los residuos denominados como peligrosos, debido a que estos son grandes precursores de la contaminación, que de acuerdo con Gutiérrez (1996), es la alteración de los ciclos naturales (cambios en las cantidades de materia o energía), que reduce la capacidad de nuestro planeta para sostener la vida.

Tradicionalmente, el problema se ha resuelto enviando los residuos peligrosos a sistemas de confinamiento o han sido incinerados, dependiendo de las circunstancias propias de cada país; geografía, legislación y cultura; así como de los volúmenes generados y su composición final.

En México, el problema toma otras dimensiones debido a que la industrialización ha sido relativamente reciente y la organización política, sistemas de administración, nivel tecnológico, recursos económicos, no han sido los adecuados para resolver con la velocidad necesaria el manejo de los residuos peligrosos. La Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (Semarnap, anteriormente la Sedeso) cumplía con los aspectos ambientales), inicio ya hace algunos años un control en el manejo de estas sustancias, pero han sido limitados; por ejemplo en 1990 se generaron 5 millones de toneladas de residuos peligrosos y en 1996 se generaron 8 millones de ellos (no se considera la generación de los residuos mineros denominados como jales, la cual se estima entre 300 a 500 mil toneladas diarias). Por otra parte la infraestructura para su manejo son muy precarios, ya que del total se estima que solo el 15 % son tratados o confinados correctamente (Semarnap, 1996), debido a los altos costos asociados y que la industria actual no cuenta con la capacidad técnica, económica y administrativa, teniendo como consecuencia una disposición inadecuada de los residuos en tiraderos municipales, barrancas, derechos de vías en carretera, lotes baldíos, drenajes municipales y cuerpos de agua.

Con la puesta en marcha del Tratado de Libre Comercio (enero de 1993) y el ingreso a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), en mayo de 1994, México se comprometió a cumplir los acuerdos en materia ambiental, en particular en lo relativo a la disposición de los residuos peligrosos (en el capítulo 2, se presentaron una breve descripción de los acuerdos de mayor importancia que suscribió nuestro país con otros naciones y organizaciones internacionales) y en vísperas de un acuerdo comercial en la Unión Europea, México se enfrenta a una problemática compleja de resolver. Por ejemplo el mercado mundial exige cada vez mas el uso de las normas internacionales ISO 9000 e ISO 14000, como sistemas de certificación de productos que reúnan la calidad solicitada y que en su elaboración se haya contemplado un cuidado al ambiente.

En los países que tienen mayor experiencia, en el manejo de residuos peligrosos, las normas y leyes aplicables en la generación y manejo de este tipo de sustancias son cada vez mas

estrictos. Sin embargo el marco legal mexicano hasta ahora es limitado respecto a estos países, por lo que los esfuerzos encaminados en materia legal tiene un retraso. Ante esto las autoridades han tenido de plantear la necesidad de revisión de las normas existentes y de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y de su reglamento, para tratar de cubrir las carencias del marco legal mexicano en materia de residuos peligrosos.

Ante esta situación la industria ha tomado cartas en el asunto, debido a presiones de carácter comercial, social o gubernamental, por lo que ha comenzado a concientizarse en el destino de sus residuos. Sin embargo no todas las industrias cuentan con la capacidad, económica y técnica para solventar sus problemas, por lo que recurren a las soluciones que emplearon los países industrializados, sin tomar en cuenta si resuelve el problema de una manera ambientalmente correcta. Por ejemplo la industria recurre a la minimización y reducción como primera instancia de control en la generación (los conceptos y metodologías sobre la minimización serán descritos en el capítulo 3), sin embargo al emplearse en la pequeña y mediana industria de nuestro país es limitada, debido a un atraso tecnológico de sus procesos. Por lo que recurren a la segunda opción, como es el tratamiento por métodos físicos o químicos (algunos de los tratamientos más usuales serán descritos en el capítulo 4) y finalmente emplean al proceso de incineración o los depositan en confinamientos controlados, generando un pasivo ambiental. Este empleado en los últimos años, se refiere a los daños al ambiente, generados en años anteriores o en la actualidad, que se ven reflejados hoy o en un futuro cercano (Semarnap, 1996)

Ante esta situación se ha comenzado a crear un mercado, para el manejo de los residuos peligrosos, en cual empresas extranjeras asociadas con compañías del país, están invirtiendo en este potencial mercado. Sin embargo los tratamientos y tecnologías ofrecidos, no son los más adecuados, para ser empleados en México, debido a que promueven tecnologías que países con mayor experiencia y avance tecnológico están dejando de utilizar (caso concreto de la incineración), aunado a una situación geográfica y cultural muy diferente de nuestro país.

Sin embargo, para enfrentar esta problemática, es necesario recurrir a tecnologías de punta (entre otras opciones), que se consideran como *limpias*, las cuales se están empleando en países con una mayor experiencia y que permiten un manejo ambientalmente adecuado de estas sustancias. Las tecnologías descritas en el presente trabajo, tienen las virtudes de valorar los residuos (reconocer, estimar o apreciar el valor o mérito de una persona o cosa - Diccionario de la Lengua Española-, 1992), tener costos de relativamente bajos y han sido probados exitosamente en los países en donde han sido desarrolladas. Adicionalmente se han elegido dichas tecnologías, porque existe la posibilidad de puedan instalarse en México, con lo que permitiría tener un mejor manejo de los residuos peligrosos.

Por lo que expuesto anteriormente los objetivos principales de este trabajo son :

- Exponer la información actual sobre residuos peligrosos en México
- Presentar las técnicas y métodos de punta para la reducción y minimización

- Describir algunas de las tecnologías limpias de punta que valorizan a los residuos peligrosos.

Por último, se analizara la política ambiental que nuestro país ha dirigido en materia de residuos, en lo relativo a la promoción y empleo de tecnologías de punta para el tratamiento de estas sustancias.

1. ANTECEDENTES

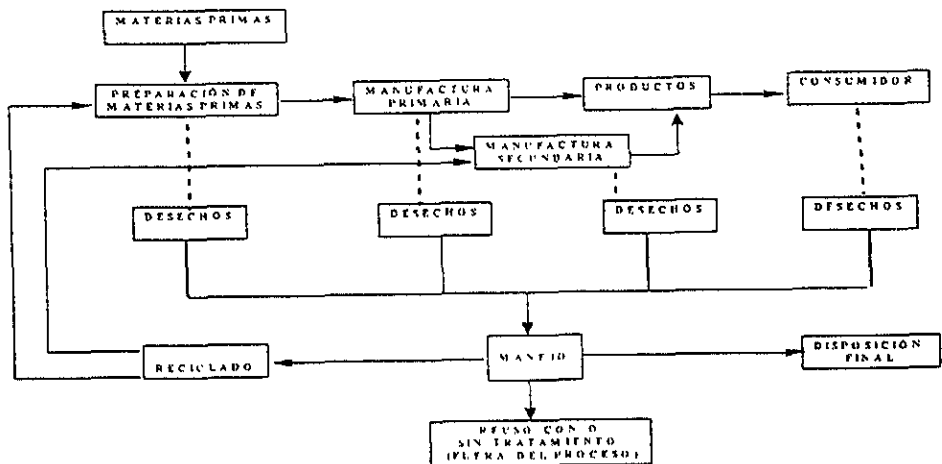
1.1 Generalidades

Si bien la industrialización ha traído grandes beneficios, simultáneamente ha ocasionado una problemática ambiental muy compleja de resolver. Toda actividad realizada por el ser humano requiere del concurso de materias primas, energía, capital y trabajo para producir los bienes de consumo que la sociedad demanda, pero como los procesos se llevan a cabo en forma lineal (Figura 1.1), a diferencia de los naturales que son siempre cíclicos, se generan, adicionalmente, subproductos y desechos (gases, líquidos o sólidos) que pueden alterar equilibrios vitales para la naturaleza.

Los residuos 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 más residuos cuya composición y volumen dependen de las condiciones específicas de cada operación. En ciertas 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, él o los productos, después de ser usados por el consumidor, pierden su valor y también se convierten en basura o desechos.

Todos estos residuos pueden reciclarse en el mismo proceso, con o sin tratamiento previo, o pueden ser reutilizados en otros procesos para recuperar su valor de uso. No obstante, cuando sus características físicas o químicas no son las deseables, o simplemente no existen condiciones adecuadas (técnicas, administrativas, sociales o económicas), no es posible recuperar los residuos, por lo que se envían a algún sistema de disposición.

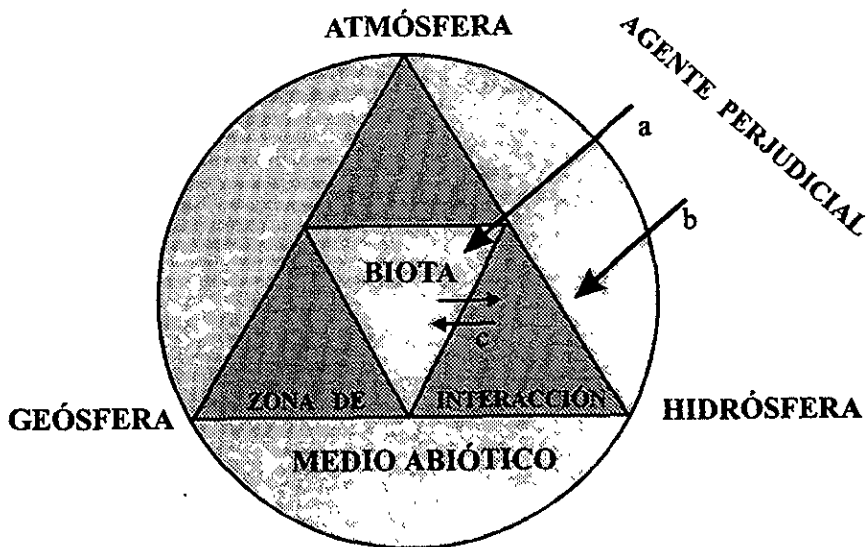
Figura 1.1 Flujo de materiales en un proceso lineal (generación de desechos)



Los desechos de origen natural, dependiendo de la cantidad y el sitio en que se disponen pueden reintegrarse a los ciclos naturales. En cambio una gran cantidad de desechos industriales no son biodegradables y reaccionan con el medio o se acumulan, causando daños que pueden ser irreversibles.

Se considera que los desechos contaminan el ambiente cuando alteran el equilibrio natural de la biota o del medio abiótico, superando la capacidad de amortiguamiento de los mismos y, por lo tanto, disminuyen la capacidad del medio para sustentar la vida. (Figura. 1.2).

FIGURA 1.2. Concepto de peligrosidad para el ambiente



a. afectaciones a la biota

b. afectaciones al medio abiótico

c. afectación indirecta a través de la alteración de los equilibrios naturales

Fuente: Gutiérrez R. M. 1996 "Una visión alternativa del manejo de residuos peligrosos", 1er Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos

Los desechos industriales, se denominan también residuos, mientras que la palabra “basura” generalmente se utiliza para designar a los desechos municipales. Sin embargo, todos esos términos son similares ya que el diccionario de la lengua define a la palabra desecho como “lo que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de una cosa”, “cosa que, por usada o por cualquier otra razón no sirve a la persona para quien se hizo”; y residuo significa “parte o proporción que queda de un todo”, “lo que resulta de la descomposición o destrucción de una cosa”, “material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación”. En un sentido estricto, residuo se refiere más a lo que sobra o resta, que se espera tenga un menor volumen o masa que el material original, mientras que el desecho se puede aplicar al propio producto si este pierde su valor (Diccionario de la Lengua Española, 1992).

La definiciones técnicas del término son muy variadas, en la literatura se encuentran diversas definiciones en función del ámbito en que son utilizadas, por ejemplo:

Sector gubernamental. “Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso en el cual se generó” (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, LGEEPA, 1988).

Sector comercial. “Todo material cuyo propietario no considera utilizable y se almacena o se intenta eliminar por cualquier medio” (Sánchez, 1994).

Sector productivo de la transformación. “Cualquier material o energía que entra a un proceso y no se incorpora en el producto final deseado. Esta definición incluye a muchas sustancias que normalmente no se consideran como desechos, como los gases de combustión y las purgas de sistemas de enfriamiento” (Berglund y Lawson, 1991).

En las sesiones de trabajo para la revisión de la NOM-052-ECOL-1993, realizado por un grupo de especialistas del Instituto Nacional de Ecología (INE), consideraron que las características más relevante de los desechos son las siguientes (Gutiérrez, 1995)

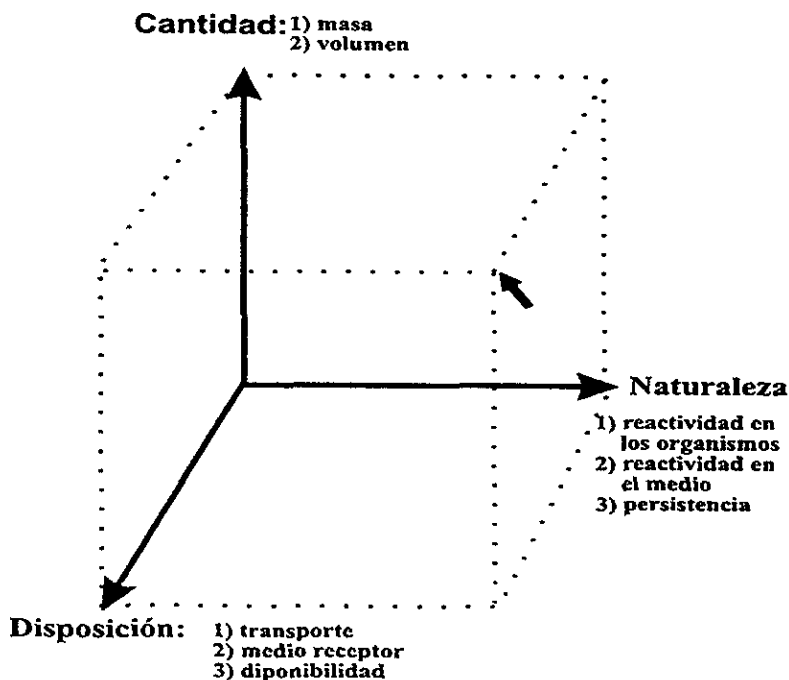
- No tiene ningún valor para quien lo genera porque ha perdido las características que lo hacían útil, incluyendo los productos ya usados
- Puede afectar los ciclos naturales de acuerdo a su naturaleza, cantidad y disposición (Figura 1.3)
- Puede adquirir nuevamente valor cuando las condiciones originales se restituyen, o bien, reintegrarse al ciclo que lo generó o algún otro como materia prima
- Requiere un manejo adecuado.

Se propuso que debería utilizarse el término desecho en lugar de residuo y definirse como: "materiales u objetos que el generador o poseedor descarta, por limitaciones técnicas, económicas o de cualquier otra índole; considerando que puede adquirir nuevamente valor cuando las condiciones originales cambian".

Figura 1.3 Representación espacial de los tres parámetros relacionados con la peligrosidad de los residuos

Peligrosidad intrínseca = naturaleza del contaminante

Peligrosidad extrínseca = cantidad y/o disposición



Fuente: Gutiérrez, 1996.

1.2 Clasificación

Los desechos se han clasificado tradicionalmente en tres grandes grupos, con base en su procedencia, o sea de acuerdo al tipo de generador:

- Desechos sólidos municipales,
- Desechos especiales, y
- Desechos industriales.

A continuación se describen las principales características de cada grupo clasificado por tipo de generador:

Desechos Sólidos Municipales (DSM)

Se consideran como desechos sólidos municipales a los “que provienen de las actividades que se desarrollan en las casas, los sitios de servicios privados y públicos, los establecimientos comerciales y los generados por la industria, salvo los que provienen de procesos que puedan tener propiedades consideradas peligrosas” (LGEEPA, 1988).

La categoría de desechos municipales incluye los siguientes materiales. desechos alimentarios, desechos combustibles y no combustibles (papel, plástico, vidrio, metal, trapos, y desechos de jardines), cenizas, materiales de construcción y materiales específicos abandonados (como la chatarra).

Las principales fuentes de estos desechos son:

- Domiciliario (unifamiliar y plurifamiliar)
- Comercios (tiendas de autoservicio, tiendas departamentales, locales comerciales y de almacenamiento y abasto)
- Servicios (restaurantes y bares, hoteles y moteles, centros educativos, centros de espectáculos y recreación, oficinas públicas y privadas)
- Especiales (unidades médicas, laboratorios, transporte terrestre y aéreo, centros de readaptación e instituciones militares)
- Áreas públicas (espacios abiertos y vía pública)
- Otros (construcciones y materiales en desuso).

Desechos Especiales (DE)

Los desechos especiales son todos aquellos “residuos peligrosos que se pueden transformar en residuos no peligrosos al ser sometidos a un tratamiento físico o químico” (Reyes, 1994). Se pueden clasificar en:

- Fármacos no aptos para el consumo humano (productos terminados, materias primas, etc)
- Alimentos no aptos para el consumo humano (de origen animal y vegetal, envasados, bebidas alcohólicas, etc.)
- Cosméticos y similares no aptos para el uso humano (productos de perfumería, de aseo personal, etc.)

- Desechos de laboratorio en general (agar y medios de cultivo, punzocortantes, etc.)
- Lodos en general (lodos hidratados digeridos de plantas de tratamiento anaeróbicas, lodos de desasolve, etc.)
- Desechos especiales generados en casas-habitación (lubricantes, insecticidas, baterías portátiles, anticongelantes, selladores, ácidos y sales, etc.)
- Desechos biomédicos generados en clínicas, hospitales y bioterios (patogénicos, punzocortantes, fármacos, químicos, etc.)
- Desechos diversos (tabaco y sus derivados, etiquetas holográficas, estopas y fibras impregnadas de aceite, ceras y parafinas, productos para el aseo, etc.)

Actualmente, el manejo que se aplica a los desechos considerandos como especiales es, generalmente, idéntico al que se aplica a los desechos municipales. Debido a los avances de la ciencia y de la tecnología, cada día disminuyen los residuos peligrosos y aumenta el grupo de residuos especiales.

Desechos Industriales (DI)

Los desechos industriales son aquellos que se generan en los diferentes procesos de la actividad industrial (Sánchez, 1994). Estos desechos, a su vez, se han clasificado en no peligrosos y en peligrosos. En México, a éstos últimos se les denomina como “residuos peligrosos” en la legislación actual, por lo que es el término utilizado en este trabajo.

Residuos peligrosos (RP)

Los residuos peligrosos son definidos y clasificados en una gran variedad de formas por las diversas dependencias ambientales de casi todos los países y algunas organizaciones. A continuación se analizan las definiciones utilizadas en América del Norte y algunos países europeos que tienen relación estrecha con nuestro país y organizaciones internacionales con las cuales se han tomado compromisos económicos o de carácter técnico.

México

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, en el artículo 3, fracción XXXII, define residuo peligroso como “todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables o biológico-infecciosas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente” (gaceta ecológica, 1996).

En México, un residuo es clasificado como peligrosos con base en los lineamientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece: el tipo de residuo por fuente no específica, o el giro industrial o proceso que los genera mediante un listado, las características que hacen peligroso a un residuo al ambiente y los valores considerados límites para cada una de las características nombradas.

A continuación se listan los criterios para cada una de las características establecidas:

- Corrosivo:**
- a) Cuando la solución acuosa presenta un pH menor o igual a 2, o bien mayor a 12
 - b) A una temperatura de 55 °C corroe al acero al carbón SAE 1020 a una velocidad de 6.35 mm por año
- Reactivo:**
- a) Si bajo condiciones normales de presión y temperatura se polimeriza violentamente sin detonación; o bien, reacciona con agua para formar mezclas potencialmente explosivas o genera gases, vapores o humos que provoquen efectos adversos en el medio ambiente
 - b) Contiene sustancias que, a ciertas condiciones de pH, generen los mismos elementos del inciso anterior
 - c) Produce radicales libres
- Explosivo:**
- a) Es más sensible a golpes y fricción que el nitrobenzono (constante de explosividad mayor a la del nitrobenzono), y es capaz de producir una reacción detonante o explosiva a condiciones normales de presión y temperatura
- Tóxico:**
- a) Cuando un residuo, en uno de sus constituyentes, rebasa la concentración permitida en la NOM-052-ECOL-1993, donde se presenta un listado de las sustancias consideradas como peligrosas
 - b) Se encuentran en esta clasificación los cianuros, el arsénico y sus sales, el plomo y sus derivados, los polifenoles, el fenol, la anilina, los bifenilos policlorados (BPC) y los derivados halogenados en general
- Inflamable:**
- a) Si en solución acuosa tiene más de 24 % de alcohol, en volumen.
 - b) Cuando un líquido tiene un punto de inflamación menor a 60 °C
 - c) Cuando no es líquido pero puede causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos
 - d) Cuando se trate de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes
- Biológico:** Residuos que contienen microorganismos o sus toxinas que provoquen efectos nocivos a los seres vivos.

Para realizar las pruebas experimentales a que debe sujetarse el residuo, refiere a la NOM-053-ECOL-1993, donde se especifica el método de extracción para determinar los

constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Esta prueba se conoce con la sigla CRETl, por las iniciales de las características establecidas en la NOM-052-ECOL-1993.

Estados Unidos de Norteamérica (E.U.A.)

La Agencia para la Protección del Ambiente de este país (Environmental Protection Agency, EPA), considera que un desecho es peligroso si presenta cualquiera de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad (presencia de componentes tóxicos en una prueba de lixiviado). Además, la EPA cuenta con una lista de otros residuos peligrosos los cuales no necesariamente presentan las características mencionadas. La definición legal de residuo peligroso es compleja, el término más generalizado se refiere a "cualquier desecho que la EPA considere que pueda dañar la salud humana y el ambiente, si se maneja en forma inapropiada" (Code Federal Regulations, - C.F.R., 1992).

La Resource Conservation and Recovery Acts (RCRA) define un residuo peligroso como "un residuo sólido, o combinación de desechos sólidos, que puede ocasionar, o contribuir significativamente, a incrementar la mortalidad o las enfermedades serias, reversibles o irreversibles, o poseer un peligro substancial presente, o potencial, para la salud humana o el medio ambiente cuando es tratado, almacenado, transportado o dispuesto, o bien, manejado impropiamente" (Lopez, 1994).

Canadá

La legislación de este país define a los residuos peligrosos como aquellos que, por su naturaleza o cantidad, son potencialmente dañinos para la salud humana y/o el ambiente y que requieren de técnicas especiales de disposición (CEPA, 1988).

El Reglamento sobre el Transporte de Productos Peligrosos y su Modificación de Canadá indica que residuo peligroso es "el producto, materia u organismo que resulta peligroso, que ya no es utilizable para el reciclaje o que está destinado a ser tratado o eliminado, que sea o no almacenable en espera del tratamiento o de la eliminación".

España

Para la legislación española, resultan residuos peligrosos 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 (que incluyen listas por tipos genéricos de residuos, por componentes y por peligrosidad) y en cantidades o concentraciones tales que representen un riesgo para la salud humana, los recursos naturales y/o el medio ambiente (Romero, 1993).

Alemania

La Legislación Alemana define residuo peligroso como “aquellos desechos generados por fuentes industriales, comerciales o públicas que, en razón de su naturaleza, condición o cantidad, constituyen un peligro particular para la salud y/o para la calidad del aire o del agua y que son particularmente inflamables o explosivos, o que contienen o pueden contribuir al desarrollo de organismos patológicos” (Kreiner, 1993).

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

La OCDE define residuo peligroso como aquel que aparece en su lista básica (*core list*) y, también, como todo aquel desecho que se considere y esté legalmente definido como tal en los países tanto exportadores como importadores de estos desechos (Cortinas, 1993).

La OCDE ha establecido criterios para la clasificación y el manejo de desechos. Esta organización los subdivide en tres listas, de acuerdo a su peligrosidad potencial (OCDE, 1995); como:

- a. Grupo de desechos verde (G)
- b. Grupo de desechos ámbar (A)
- c. Grupo de desechos rojo (R).

De estos grupos, se consideran peligrosos los que pertenecen a los grupos ámbar y rojo, y son aquellos para los cuales se propone la regulación de sus movimientos transfronterizos.

La lista básica de residuos peligrosos contiene todos aquellos desechos que los países miembros de la OCDE se comprometen a controlar en todo movimiento transfronterizo. Aquel desecho que no aparezca en esta lista, pero que se considere peligroso en cualquier país exportador o importador perteneciente a la OCDE, estará sujeto a la regulación nacional del país correspondiente.

Convenio de Basilea

La clasificación de residuos peligrosos se basa en listas en las cuales se asigna un código a cada desecho. Tales listas están divididas en tres grupos (Cortinas, 1993).

- a. Desechos controlados
- b. Desechos constituidos por componentes específicos
- c. Desechos que requieren una consideración especial

De todas estas clasificaciones la que expresa mejor el concepto de peligrosidad presentado en la anterior sección, en donde el riesgo de los residuos estaba determinado por la naturaleza, cantidad y disposición de los mismos, es la de la OCDE. El riesgo no es inherente a una sustancia, pues como expresó el médico conocido como Paracelso hace cuatro siglos “toda las sustancias son venenosas, sólo es cuestión de dosis” o lo chinos muchos más años antes “todo es veneno, nada es veneno” La clasificación con base en el tipo de generador o fundamentada en pruebas analíticas puntuales no se considera adecuada

para la aplicación de tecnologías limpias que permiten una solución permanente para el manejo de los desechos.

Los efectos, comportamiento de los desechos y, por lo tanto, la selección de las tecnologías pertinentes para su tratamiento dependen más de la composición química y contenidos calóricos que del tipo de generador. Para ejemplificar esta proposición puede realizarse una analogía entre el manejo de los desechos y los alimentos. Para establecer una dieta balanceada no basta conocer el origen de los alimentos sino que se requiere determinar los compuestos químicos que contienen y que son básicos para la vida: proteínas, azúcares, grasas y vitaminas. Para determinar los efectos y el manejo adecuado de los residuos no basta saber quien los generó sino debe establecerse si son metales, sales inorgánicas, compuestos covalentes de red y compuestos moleculares, considerando adicionalmente su reactividad, solubilidad y biodegradabilidad (Gutiérrez, 1994).

No obstante, la mayoría de las legislaciones siguen considerando la clasificación tradicional y va a requerir de más tiempo para que se acepten estas nuevas ideas que ponen en tela de juicio las soluciones hasta ahora aplicadas, y requieren de especialistas químicos con una formación multidisciplinaria que incluya a las ciencias de la tierra e ingeniería .

1.3 Principales fuentes de residuos peligrosos

Las principales fuentes generadoras de residuos peligrosos en el mundo han sido clasificadas de acuerdo con su procedencia en:

Industrial

- De la industria química: fondos de destilados, lodos de plantas de tratamientos, pinturas y adhesivos fuera de especificación, emulsiones mal formuladas, metales pesados etc.
- De la industria farmacéutica: antibióticos caducos, alcaloides usados, esteroides crudo, disolventes de extracciones, medicamentos fuera de especificación, etc.
- De la industria del petróleo y petroquímica: catalizadores metálicos, compuestos sulfurados como los mercaptanos, condensados de craqueo catalítico, aldehídos y cetonas, polímeros contaminados etc.
- De la industria manufacturera: disolventes de limpieza, ácidos gastados, adhesivos agotados, desechos de curtiduría y de la industria de la celulosa y papel, etc.
- Derrames accidentales que contaminan el ambiente: suelos contaminados por aceites, bifenilos policlorados, plaguicidas, insecticidas, etc.

Comercial

- Productos fuera de especificación o desechados de uso comercial: pinturas, disolventes, plaguicidas caducos, baterías de automóviles etc.

- Productos utilizados y desechos de laboratorios e instituciones: químicos caducos, disolventes usados, estándares usados, muestras analizadas, productos agotados para revelado fotográfico, etc.
- De talleres: estopas gastadas, grasas y aceites automotrices, disolventes usados, anticongelantes, etc.

Domésticos

- De aseo personal: latas de aerosoles, champús, quitaesmaltes para uñas, productos para teñido y ondulado de cabello, medicamentos usados etc.
- Productos de limpieza: polvos abrasivos, amoníaco, insecticidas usados, herbicidas caducos, cloro, ácidos para limpieza, etc.
- Otros: acumuladores agotados, pilas viejas, aceite automotriz, latas de aceites y pinturas vacías, etc.

Agrícola

- Fertilizantes caducos, herbicidas, plaguicidas, envases de los anteriores, etc.

1.4 Inventario de generación de residuos peligrosos en el mundo

En la Convención de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación, se calculó que en el mundo se generan anualmente alrededor de 400 millones de toneladas de residuos peligrosos. Una gran parte de ellos proviene de los países industrializados (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Generación de residuos peligrosos en el mundo

País o región	Toneladas por año (millones)	Porcentaje (%)
Europa	200.0	50.00
Japón	8.0	2.00
Estados Unidos	140.6	35.15
Canadá	8.0	2.00
México	7.7	1.90
Resto del mundo	35.7	8.95
Total	400.00	100.00

Fuente: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 1995

En México, el proceso de industrialización se ha llevado a cabo de manera acelerada en los últimos cincuenta años, con una concentración industrial preponderante en unas cuantas ciudades (entre las que destacan la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla) y en algunos polos de desarrollo como Veracruz y la frontera norte), por lo que la distribución de los residuos peligrosos generados en México puede dividirse en regiones, las cuales corresponden, prácticamente, a las zonas industrializadas (**Cuadro 1.2**).

Cuadro 1.2 Distribución regional de la generación de residuos peligrosos

Región	Generación (ton/año)	Porcentaje
Faja fronteriza	62,010	0.13
Norte	2,006,000	25.08
Centro	5,067,000	63.34
Golfo	602,000	7.52
Sureste	262,980	3.28
Total	8,000,000	100.00

Fuente: Programa para la Minimización y el Manejo Integral de los Residuos Industriales peligrosos en México. 1996-2000 Semarnap-INE, 1996.

México se caracteriza por la conformación de un porcentaje bajo de grandes empresas con tecnologías avanzadas de producción y un mediano número de micro, pequeñas y medianas empresas, muchas de ellas con procesos obsoletos de producción. La planta industrial del país comprende, básicamente, cuatro tipos de industria: manufacturera, extractiva (minería y petróleo), de la construcción y eléctrica (Sedesol, 1993).

El **cuadro 1.3** describe la distribución de la industria en México en 1994, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI)

Cuadro 1.3 Sectores de la industria nacional

Sectores	Unidades Industriales
Minería y extracción de petróleo	2,869
<i>Subsector</i>	
Carbón	35
Petróleo y gas natural	11
Extracción de minerales metálicos	188
Explotación de minerales no metálicos	2,635

Cuadro 1.3 (continuación)

Sectores	Unidades Industriales
Industria manufacturera	218,860
<i>subsector</i>	
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	91,932
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	44,126
Industria y productos de madera (incluye muebles)	31,606
Papel y productos de papel, imprentas y editoriales	15,049
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón del hule y del plástico	7,091
Productos minerales no metálicos (excluye instrumentos quirúrgicos y de precisión)	24,361
Otras industrias manufactureras	4,695
Industria eléctrica	37
<i>Subsector</i>	
Electricidad	37
Industria de la construcción	5,308
<i>subsector</i>	
Construcción	5,308

Fuente: XIV Censo Industrial, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1994

En lo que respecta a la industria química, de las 5,472 empresas que la conforman, la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) reúne a 340 con 465 plantas y cubre las áreas de producción de productos petroquímicos; fibras sintéticas y artificiales, hules sintéticos y negro de humo, pigmentos y colorantes, adhesivos, resinas sintéticas y especialidades químicas. Además, promueve la adopción, por parte de sus socios, del programa de Responsabilidad Integral, que comprende el manejo y la eliminación ambientalmente idóneos de las sustancias tóxicas y materiales peligrosos. A su vez, dicha Asociación ha establecido un sistema de información sobre accidentes químicos en el transporte (ANIQ, 1995).

Con la información obtenida, se ha establecido que el 60 % de la industria química está distribuida principalmente en el Estado de México, Veracruz y el Distrito Federal (Figura 1.4). De estas empresas, las de mayor tamaño son las que generan la mayor cantidad de residuos y son las que, en términos generales, manifiestan y registran sus residuos.

En el Cuadro 1.4 se presentan los residuos peligrosos que se generan con mayor frecuencia en nuestro país, y en la Figura 1.5 se muestra el acelerado aumento en los valores de generación en este siglo.

Cuadro 1.4 Residuos peligrosos que se generan con mayor frecuencia en México

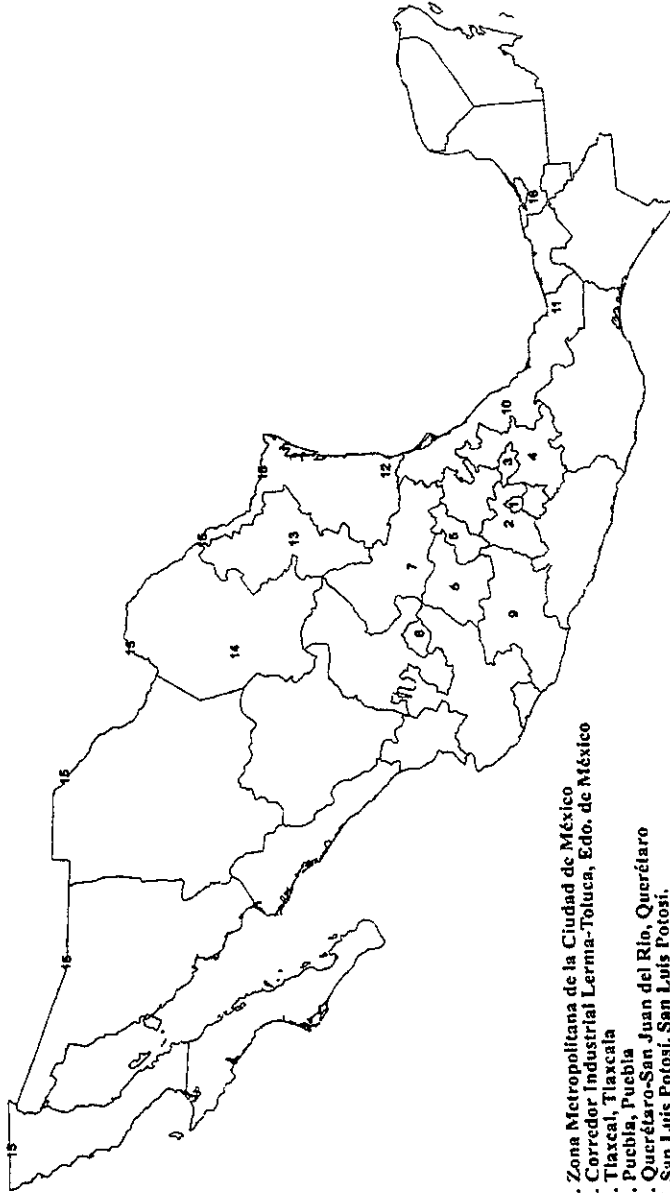
Residuos	toneladas/año (miles)	Porcentaje
Disolventes	2,772.00	36.20
Aceites y grasas	992.53	12.89
Soldadura Pb-Sn	433.51	5.63
Resinas	342.65	4.45
Ácidos y Bases	209.44	2.72
Derivados del petróleo	189.42	2.46
Metales pesados	154.77	2.01
Adhesivos	130.13	1.69
Freón	88.55	1.15
Lodos	88.55	1.15
Silicón	41.58	0.54
Tintas	26.95	0.35
Plásticos	20.02	0.26
Otros	1,600.83	20.79
Total	8,000	100.00

Fuente: Dirección de General de Materiales, Residuos y Actividades Resgosas, INE., 1995

De acuerdo a las cifras oficiales, el rubro mayor corresponde a los disolventes y otros. Según esta clasificación, falta información sobre las características del 21 % de los residuos peligrosos que se generan en México y también resulta notorio que clasifica a los plásticos como residuos peligrosos. Actualmente, se encuentran en revisión las normas, en las cuales los lubricantes, aceites y disolventes gastados pasarán a ser considerados como *residuos especiales*, ya que existen numerosas técnicas de tratamiento y se quiere promover su reuso.

Ante esta problemática, el Instituto Nacional de Ecología ha identificado y cuantificado, las necesidades de manejo y tratamientos de los residuos peligrosos, que posteriormente se verán en este trabajo (cuadro 1.5).

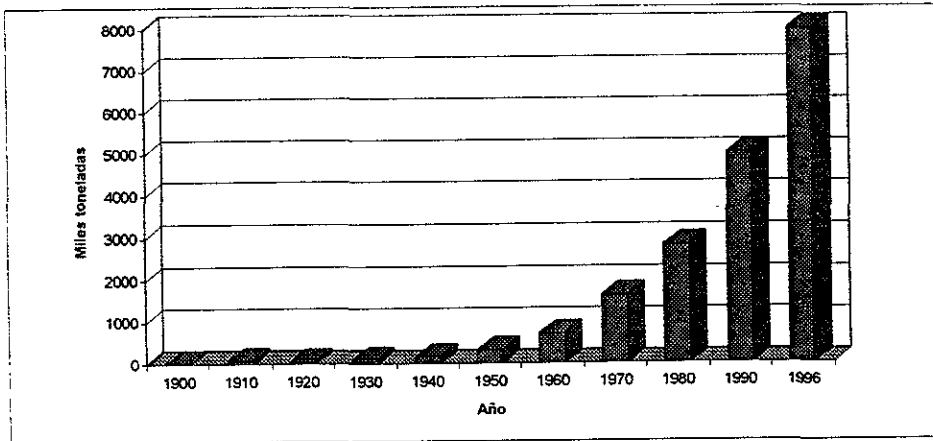
Figura 1.4 Principales parques industriales generadores de residuos peligrosos



- 1. Zona Metropolitana de la Ciudad de México
- 2. Corredor Industrial Lerma-Toluca, Edo. de México
- 3. Tlaxcala, Tlaxcala
- 4. Puebla, Puebla
- 5. Querétaro-San Juan del Río, Querétaro
- 6. San Luis Potosí, San Luis Potosí
- 7. Aguascalientes, Aguascalientes
- 8. Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco
- 9. Orizaba-Córdoba-Veracruz, Veracruz
- 10. Coahuacalcos-Minatitlán-Pajaritos, Veracruz
- 11. Tampico-Ciudad Madero-Altamira, Tamaulipas
- 12. Zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León
- 13. Conurbación de la Laguna, Coahuila
- 14. Zona Fronteriza
- 15. Sonda de Campeche
- 16.

Fuente : Semarnap, 1995

Figura 1.5 Generación de residuos peligrosos en México en el presente siglo



Fuente: Revista IMIQ junio 1994, INE 1996

Cuadro 1.5 Propuesta de manejo de los residuos peligrosos en México

Opción	toneladas/año (miles)
Reciclaje	2 278.800
Oxidación térmica	857.340
Procesos fisicoquímicos	770.950
Solidificación/Estabilización	816.610
Reciclaje energético	343.300

Fuente: Sánchez, 1996

2. LEGISLACIÓN SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS

2.1 Generalidades

La elaboración y empleo de productos químicos constituyen tópicos de interés para la sociedad actual, por lo que la industria química juega un papel vital en la economía de los países que cuentan con un desarrollo tecnológico importante. Los diversos compuestos químicos, que de una u otra forma forman parte de sustancias que se utilizan para fabricar medicamentos, vestido, edificios, equipos electrónicos, vehículos, alimentos, etc., se encuentran disponibles en casi cualquier actividad que se realiza en el hogar, el trabajo, centro de recreo, escuela etc., por lo que la mayor parte de la población está expuesta a sus beneficios pero también a sus efectos dañinos.

Cuando estos compuestos se manejan adecuadamente representan un riesgo mínimo para el hombre y el ambiente, sin embargo bajo las condiciones que imperan en la mayor parte de los países, y especialmente en los no industriales, su manejo no es el deseable, por lo que el riesgo asociado a su uso es mucho mayor.

Por lo tanto, en la últimas décadas se ha buscado el control de la producción de las sustancias que representan un alto riesgo a la salud humana, estableciendo normas para lograr su prohibición, o al menos el control ambiental durante todo el ciclo de vida, esto es el proceso de producción, su acopio, transporte y disposición final.

Los aspectos más importantes de las reglamentaciones de los países que suscribieron el Tratado de Libre Comercio de América del Norte: México, Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, en relación con los residuos peligrosos, se plantea a continuación.

2.2 Tratado de Libre Comercio (TLC)

El Tratado de Libre Comercio (TLC) "es un acuerdo comercial que define los derechos, obligaciones y disciplinas entre México, Estados Unidos y Canadá en lo relativo a inversiones, comercio de mercancías, servicios y propiedad intelectual. Las negociaciones para la firma del Tratado se iniciaron en Toronto, Canadá, en junio de 1991 y concluyeron en Washington D.C., Estados Unidos, en agosto de 1992. El Tratado entró en vigor el primero de enero de 1994.

El objetivo central que animó la firma del TLC es la aceleración del desarrollo económico de México, mediante un incremento en las inversiones productivas tanto de origen nacional como internacional. Es necesario considerar este desarrollo a fin de tomar las medidas necesarias para su prevención, mitigación y reducción de contaminación a niveles aceptables para la sociedad, a fin de asegurar un crecimiento continuo sin el agotamiento o la destrucción irreversible de los recursos naturales del país.

Es importante resaltar que los gobiernos de los tres países se han comprometido a que las acciones del TLC sean emprendidas de manera congruente con la protección y conservación

del ambiente, la promoción del desarrollo sustentable y el reforzamiento de la aplicación de leyes, reglamentos y normas en materia ambiental. Desde el inicio de las negociaciones comerciales del TLC, existió preocupación por la expectativa de que se generara un impacto ambiental negativo, por lo cual se incluyeron mecanismos de protección al ambiente que se encuentran expresados en los diversos artículos. En el Artículo 104 se indica que en caso de existir alguna incompatibilidad entre las obligaciones comerciales del Tratado con algunos acuerdos ambientales, estos últimos prevalecerán sobre las primeras. Entre los acuerdos a los que se hace referencia destacan el Protocolo de Montreal, la Convención de Basilea y el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna.

En lo referente a las medidas relativas a la normalización, el Artículo 913 establece las funciones, la integración, la mecánica y el calendario de trabajo del Comité de Medidas Relativas a la Normalización. Dicho Comité tiene la atribución de establecer los subcomités o grupos de trabajo que considere apropiados para hacerse cargo de cualquier asunto relativo a la normalización e, incluso, de los criterios para la evaluación de los daños potenciales al ambiente.

Respecto a la inversión, se establece que cualquiera de los tres países puede adoptar medidas para asegurar que las inversiones en su territorio tomen en cuenta las inquietudes nacionales en materia ambiental. El tratado prohíbe, además, relajar o derogar las medidas de protección al ambiente como un instrumento para atraer o retener inversiones (Artículo 1114).

Si bien estas disposiciones institucionalizan los criterios ambientales que regulan las transacciones de mercancías, la presentación de servicios financieros, la realización de proyectos de inversión y patentes tecnológicas, el Tratado se ve enriquecido y ampliado con la mecánica expuesta en el Acuerdo de Cooperación Ambiental, donde se especifican los procedimientos de protección ambiental, en los casos en que haya controversias de este tipo" (Sedesol-INE. 1994-c. 319-20 pp.).

Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN)

"Los gobiernos de los Estados Unidos Mexicanos, Canadá y los Estados Unidos de América firmaron los Acuerdos Paralelos al TLC en materia de Cooperación Ambiental y Laboral, simultáneamente en las ciudades de México, Ottawa y Washington D.C., el día 14 de septiembre de 1993 y entraron en vigor el primero de enero de 1994, inmediatamente después de la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio.

El Acuerdo de Cooperación Ambiental del Norte (ACAAN) es para reconocer la necesidad de incrementar y fortalecer la coordinación y cooperación ambiental entre México, Estados Unidos y Canadá, con base en la premisa de que para promover ese desarrollo sustentable, es preciso incrementar los intercambios comerciales, proteger y mejorar el ambiente, mejorar

y perfeccionar la aplicación de las regulaciones jurídicas y la política ambiental, así como promover la participación de los sectores sociales de los tres países.

Las bases en las que se sustenta el Acuerdo de Cooperación Ambiental del Norte son las siguientes:

- el convencimiento de la importancia de la conservación, protección y mejoramiento del ambiente en los territorios de los tres países, y el papel esencial de la cooperación en las tres áreas para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de las generaciones presentes y futuras
- la reafirmación del derecho soberano de los Estados para aprovechar sus recursos, según sus propias políticas ambientales y de desarrollo, y su responsabilidad de asegurar que sus actividades, dentro de su jurisdicción o control, no causen daños al ambiente de otros Estados o áreas fuera de los límites de la jurisdicción nacional
- el reconocimiento de la interrelación de sus ambientes
- la confirmación de la importancia de las metas y los objetivos ambientales incorporados en el TLC, incluido el de mejores niveles de protección ambiental
- la importancia de la participación de la sociedad en la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente
- la existencia de diferencias en las respectivas riquezas naturales, condiciones climáticas y geográficas de los tres países, así como en sus capacidades económicas, tecnológicas y de infraestructura
- la reafirmación de la Declaración de Estocolmo sobre el Medio Humano de 1972 y la Declaración de Ríos sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992
- la tradición de cooperación ambiental de los tres países y el convencimiento de los beneficios que habrán de derivarse del establecimiento de un marco, y en especial de una Comisión, que facilite la cooperación efectiva para conservar, proteger y mejorar el ambiente en sus respectivos territorios.

El Acuerdo señala claramente las obligaciones generales a las que se compromete cada una de las Partes y confirma el derecho de cada uno de los tres países de establecer sus propias políticas, prioridades y niveles de protección ambiental (Artículo 3). En ese sentido, se prohíbe explícitamente que las autoridades de un país apliquen su respectiva legislación ambiental en territorio de otro de los países (Artículo 37).

Al mismo tiempo, se confirma el compromiso de los tres países de que sus leyes proporcionen altos niveles de protección ambiental (Artículo 3). Comprometiéndose, además, a aplicar de manera efectiva su legislación a través de medidas gubernamentales adecuadas, tales como: capacitación de inspectores, promoción de auditorías ambientales, otorgamiento de licencias y permisos de autorización, entre otras medidas; y mediante la

disponibilidad, conforme al derecho de cada país, de procedimientos judiciales, cuasijudiciales o administrativos para aplicar sus respectivas leyes y reglamentos ambientales (Artículo 5). Asimismo, los tres países se comprometen a continuar garantizando que estos procedimientos administrativos y judiciales sean justos, abiertos y equitativos (Artículo 7), de tal forma que se asegure el acceso adecuado de los particulares a dichos procedimientos (artículo 6)" (Sedesol-INE. 1994-c. 320-322 pp.)

2.3 Estados Unidos de Norteamérica

2.3.1 Estructura de la reglamentación estadounidense

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 (RCRA, Resource Conservation and Recovery Acts) que indica las normas detalladas para el manejo de residuos y, particularmente, reglamentos vitales sobre residuos peligrosos (Richard, 1995).

En 1976, se promulgó el Acta de Control de sustancias Tóxicas (the Toxic Substances Control Act, TSCA), gracias a la participación conjunta del congreso, la industria química, la EPA y el público en general. su 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. (Richard, *ibidem*)

Con esa reglamentación, se autorizó a la EPA para recolectar y evaluar la información relacionada a estos productos y en caso de que la agencia determine que presente un riesgo incontrolable para la salud humana o el ambiente, tiene la facultad de restringir su distribución y uso, con controles que varían desde un etiqueta de advertencia hasta prohibir su fabricación y empleo.

A pesar de la RCRA y TSCA , el congreso aumentó significativamente el alcance del RCRA a través de modificaciones que se convirtieron en ley en noviembre de 1984. El principal motivo de las Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (the Solid Hazardous Waste Amendments, HSWA) de 1984, es la protección del agua subterránea. El RCRA y el HSWA se enfocaron a las prácticas de manejo de residuos peligrosos actuales y futuras, pero no tomaron en cuenta los serios problemas de contaminación histórica, que originaron los numerosos lugares de disposición de residuos peligrosos que actualmente están inactivados.

Por este motivo, el congreso promulgó el Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (the Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA) en 1980. Esta reglamentación da disposiciones de responsabilidades, compensación y limpieza para los lugares inactivos de disposición de residuos peligrosos. También proporciona respuesta a situaciones de emergencia en que se vea involucrada la liberación de sustancias peligrosas al ambiente. CERCLA proporcionó autoridad y fondos a la EPA para llevar a cabo estas actividades.

El CERCLA se conoce también con el nombre de Acta del Superfondo (the Superfund Act.), debido a las disposiciones de un fondo de fideicomiso en respuesta a los problemas de contaminación originados por Sustancias Peligrosas (the Hazardous Substance Response Trust Fund), la industria proporciona 7/8 del dinero a través de impuestos al petróleo crudo y a 42 productos químicos básicos; el gobierno aporta 1/8 del monto total (Lopez, 1994).

En 1986 se decretó el Acta de Reformas y Reautorización del Superfondo (the Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA) como una extensión del programa del CERCLA para limpiar las liberaciones peligrosas no controladas o los lugares abandonados de disposición de residuos peligrosos.

El SARA, impone patrones de restauración más estrictos que incrementan el costo de la limpieza del lugar. Esto permite al gobierno tomar acción inmediata y exigir posteriormente la indemnización correspondiente. Este fondo también se emplea cuando las partes responsables no cuentan con suficiente dinero.

El fondo con los que cuenta el SARA proviene de impuestos al petróleo y productos químicos, de las partes responsables de la limpieza del lugar y de penalidades del Superfondo. El SARA también impone a la EPA un programa para la investigación del lugar estudios de factibilidad y acciones de restauración (Richard, 1995).

2.3.2 Criterios y definiciones sobre generación de residuos

De acuerdo con la RCRA, para que un sustancia se considere un "residuo peligroso" es un residuo sólido. Entonces deberá aparecer en una lista específica de residuos peligrosos (Code Federal Regulations -C.F.R.- Título. 42, artículo 6921; C.F.R. artículos 261.31 a 261.33), o poseer una de las cuatro características siguientes: inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad (C.F.R. Título 40, arts. 261.20 a 261.24). Cualquier mezcla que contenga un desecho peligroso es también un residuo peligroso (C.F.R. Título 40, art. 261(a)(2)(iv)).

Cualquier generador de más de 100 kilogramos de residuos peligrosos por mes debe tener un número de identificación de la EPA para residuos peligrosos. Los generadores son responsables de determinar si sus residuos son peligrosos o no; deben cumplir con un almacenamiento temporal y requisitos de etiquetado en sus plantas, y deben transportar o eliminar todos los residuos dentro en un plazo de 90 días (C.F.R. Título 40, pto. 262). Los residuos peligrosos que son transportados deben ir acompañados de un anuncio de "residuos peligrosos" además del número de identificación del generador firmado por éste. El anuncio debe identificar al transportador inicial y el destino último del desecho que se elimina. Una copia del anuncio debe ser llevado por el transportador al sitio final, debe ser firmada por el operador del sitio de depósito y devuelta al generador (C.F.R., Título 40, pto. 262, subpunto b).

Los generadores deben presentar reportes bienales expresando la cantidad, tipo y método final de eliminación y ubicación de los residuos. Deben mantener copias de los anuncios,

reportes y reportes y resultados de cualquier prueba por lo menos durante tres años (C.F.R., Título 40, artículo 262.40-261.41). Los generadores de bajos volúmenes (menos de 100 kg./mes) que cumplan ciertos requisitos, están exentos del cumplimiento de los requisitos que impone la RCRA para el transporte de residuos peligrosos.

2.3.3 Identificación, almacenamiento, reducción y disposición

Identificación

Ciertas normas generales se aplican a todas las plantas (C.F.R. Título 42, artículo 6924). Estas incluyen exigencias sobre la obtención del número de identificación de residuos peligrosos, y su análisis, el aseguramiento de la planta contra entradas no autorizadas, inspecciones sistemáticas para verificar que no haya fugas o defectos, la separación de residuos inflamables, radiactivos o incompatibles y la preparación para emergencias, incluyendo la adopción de un plan de contingencias y procedimientos de emergencia (C.F.R. Título 40, pto. 264). Todos los operadores de plantas deben mantener un registro de operación detallando de su planta y deben presentar un reporte bienal a la EPA, describiendo la cantidad y tipo de residuos que se manejan. Otros reportes exigidos incluyen a aquellos sobre residuos no declarados, sobre cualquier escape, incendio o explosión e informes sobre cierres de la planta (C.F.R. Título 40, pto. 264, subpunto E).

Las disposiciones de la RCRA ofrecen una serie detallada de normas para detectar fugas a través del monitoreo de las aguas del subsuelo en las plantas y para la limpieza de cualquier contaminación (C.F.R. Título 42, pto. art. 6924(p), (v); C.F.R. Título 40, pto. 264). Las normas de protección de las aguas del subsuelo exigen que un manto acuífero se mantenga en los niveles básicos de limpieza según las normas sobre agua potable nacional contempladas en la Ley de Agua Potable Segura (C.F.R. Título 42, art. 300f a 300j-26).

En la RCRA también se exige a los dueños de las plantas presentar por escrito un plan de cierre para cada unidad de manejo de residuos peligrosos. El plan de cierre debe minimizar la fuga de constituyentes peligrosos después del cierre. Adicionalmente, se aplican requisitos específicos sobre el cierre de cada planta. La clausura puede tener ser de dos formas; ya sea que las plantas traten de "cerrar limpio", lo que implica que todos los residuos o constituyentes peligrosos sean retirados o bien, la planta debe instrumentar un "cuidado poscierre". El cuidado poscierre incluye, típicamente, el monitoreo de las aguas del subsuelo y la acción correctiva, así como el mantenimiento de casquetes, revestimientos, cubiertas y sistemas de recolección de los lixiviados existentes y de los sistemas de seguridad de la planta (C.F.R. Título 40, art. 264.228).

Los estados retienen la autoridad para imponer exigencias más estrictas sobre las plantas de manejo de residuos peligrosos (C.F.R. Título 42, art. 6929). Muchos estados asumen parte de la autoridad para aplicar la RCRA (C.F.R. Título 40, pto. 271). En todos los estados deben cumplirse tanto las exigencias federales como las del estado.

De acuerdo con las reformas a la RCRA de 1984, la EPA puede exigir a las plantas que producen residuos peligrosos la limpieza de cualquiera unidad de manejo de residuos sólidos

ubicados en la planta (C.F.R. Título 42, art. 6924(u); C.F.R. Título 40, pto. 264, subpunto F). La EPA también tiene amplios poderes para realizar inspecciones y recolección de información para administrar, y aplicar la RCRA en emplazamientos donde se manejan residuos peligrosos (C.F.R. Título 42, art. 6927). La EPA tiene la obligación de inspeccionar plantas privadas de residuos peligrosos cada dos años y las plantas de propiedad federal cada año (C.F.R. Título 42, art. 6927).

Almacenamiento

Los generadores de residuos peligrosos deben incluir en su informe bienal un descripción de los esfuerzos realizados para reducir el volumen o la toxicidad de sus residuos así como cualquiera reducción real alcanzada. (C.F.R Título 40, art. 262(6),(6)).

Reducción

La EPA anuncio una política nacional en favor de la reducción de residuos sobre el manejo de los mismos, ya que creó un programa de reducción de residuos para reunir y difundir información, brindar asistencia financiera a los estados y conducir otros programas de asistencia técnica, capacitación e investigación. Dicha política también prevé reportes sobre reducción y reciclado de suministros químicos (C.F.R., 42, art. 13106).

Disposición

Una de las más importantes intenciones de la RCRA, fueron hechas en las enmiendas a dicha ley en 1984 y 1990, respecto a la promoción para la disposición de residuos peligrosos en confinamientos controlados. La sección 201 de la RCRA describe detalladamente todo lo relacionado a la disposición final completa :

- sitios para la disposición para residuos líquidos peligrosos y no peligrosos en confinamientos controlados
- sitios como domos salinos, minas y cavernas subterráneas y formaciones salinas para disposición final de los residuos peligrosos
- disposición de líquidos sueltos en confinamientos
- monitoreo y control de las emisiones al aire para plantas que almacenan, tratan y eliminan residuos peligrosos
- evaluaciones ambientales en la disposición de residuos peligrosos en pozos profundos
- requerimientos técnicos y tecnológicos mínimos concernientes a la disposición en confinamientos controlados.

2.3.4 Transportación, exportación e importación

Transportación

Los transportadores no deben aceptar residuos peligrosos que no vayan acompañados de una declaración sobre los mismos. El transportador debe firmar la declaración al generador antes de abandonar la propiedad y debe obtener la firma del dueño u operador de la planta de eliminación o en ciertos casos del próximo transportador. Además debe obtener la declaración en el término de los tres días siguientes. Por lo cual, deberá entregar el residuo a la planta o planta alterna designada por el generador en la declaración (C.F.R. título 40, pto 263). En caso de descargas o derrames durante el transporte, el transportador debe notificar al Centro Nacional de Medidas; brindar una notificación escrita a la Oficina de Control de Materiales Peligrosos del Departamento de Transporte, y/o notificar a la guardia costera.

Exportación e importación

Las exportaciones de residuos está prohibida en tanto el exportador no notifique a la EPA por lo menos con 60 días de antelación; el país receptor ha consentido en aceptar el residuo peligroso; una copia del reconocimiento de admisión de la EPA acompaña a la carga; y el embarque se realiza en conformidad de los términos de aceptación del país receptor. Los exportadores deben también cumplir con todas las normas relacionadas con el transporte de residuos peligrosos.

Los importadores de residuos peligrosos reciben el mismo tratamiento que los generadores en términos de la RCRA.

2.3.5 Tratados Internacionales

Los Estados Unidos han firmado, pero aún no han ratificado, la Convención de Basilea (que entró en vigor el 5 de mayo de 1992) sobre Control de Movimientos Transfronterizos de Residuos Peligrosos y su Disposición (22 de marzo de 1989, Doc. N.U. PNUMA/WG.190/4, año 1989).

Los Estados Unidos y Canadá firmaron el Convenio Concerniente a los Movimientos Transfronterizos de residuos Peligrosos (28 de octubre de 1986, E.U.A.-Canadá, T.I.A.S. No 11099), que entró en vigor el 8 de noviembre de 1986. Existe también el Memorandum de acuerdo entre la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos y el Ministerio del Medio Ambiente de Canadá Alaska-Idaho-Washington-Columbia Británica sobre la coordinación regional para la gestión de los residuos peligrosos (Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 1996-a).

2.4 Canadá

2.4.1 Estructura de la reglamentación canadiense

“El principal ordenamiento ecológico de Canadá es el Acta de Protección al Medio Ambiente Canadiense (CEPA, Canadian Environmental Protection Act) el cual incluye estipulaciones para el control de todos los aspectos del ciclo de vida de las sustancias tóxicas, incluyendo su importación, transporte, distribución y disposición final. La CEPA contempla lo siguiente:

- sanciones y multas
- disposiciones sobre la recopilación de información y evaluación
- disposiciones sobre la importación y exportación de sustancias tóxicas
- disposiciones sobre la reducción de residuos, la limpieza de zonas costeras, la protección de la capa de ozono y la reducción de la lluvia ácida y el smog urbano
- disposición sobre la elaboración de reglamentos.

La CEPA se encuentra dividida en siete partes. Lo referente a residuos se encuentra en la Parte II, en donde se establecen las disposiciones para el control de sustancias tóxicas. Así mismo, se establecen una serie de listas de sustancias domésticas, tóxicas, prohibidas y peligrosas, además de considerar la descarga y la importación y exportación de sustancias tóxicas y materiales de desecho, así como la regulación de la producción y el uso de combustibles en Canadá.

En Canadá, todas las provincias y territorios han promulgado su propia legislación ambiental en la que establecen los derechos y las responsabilidades ambientales generales; sin embargo, el nivel de protección no es igual en todo Canadá. En términos generales, cada provincia y territorio cuenta con disposiciones que regulan las descargas de contaminantes al ambiente mediante licencias y permisos expedidos, así como la aplicación de sanciones. Las materias reguladas incluyen la evaluación de impacto ambiental, el manejo de residuos, las normas de agua potable y la conservación de tierras.

En materia de residuos, destacan las leyes ambientales de la provincia de la Columbia Británica (Ontario). La Ley de Administración de Residuos prohíbe la introducción de residuos al ambiente, en tal forma o cantidad que se genere contaminación. De acuerdo con esta ley, se requiere de un permiso expedido por el administrador regional de residuos para depositar o descargar residuos en el ambiente, así como la aprobación especial para la recolección y disposición de los mismos. Las sanciones por contravenciones a esta ley son elevadas, llegando hasta un máximo de 11 millones de dólares canadienses. El gobierno de Columbia Británica contempla la sustitución de dicha ley por la Ley Integral de Protección al Ambiente.

En Canadá las provincias cuentan con autoridad constitucional para tratar la mayoría de las actividades relacionadas con los residuos sólidos. La autoridad federal contempla principalmente a los terrenos e instalaciones federales, así como las comunidades indígenas.

2.4.2 Criterios y definiciones sobre la generación de residuos

El término “residuo peligroso” se define a menudo en las legislaciones provinciales de acuerdo con una lista de tipos de residuos que aparece en forma de anexos. Estas listas son amplias y precisas en cuanto al tipo de sustancias que se identifican como residuos peligrosos, estando sujetas a requisitos legales más severos que incluyen el registro ante las autoridades respectivas del generador del desecho y el llenado de un manifiesto de envío de residuos. Los residuos biomédicos están regulados por una legislación específica sólo en algunas provincias.

2.4.3 Identificación, almacenamiento, recuperación y disposición

Identificación

Los generadores deberán de identificar los residuos, describiendo el tipo de residuo en el número de identificación las características fisicoquímicas, cantidad, instrucciones para el manejo del residuo en caso de accidentes y otros a que se realizan en cada provincia.

Almacenamiento

De acuerdo con la CEPA, el gobierno federal regula el uso, almacenamiento y disposición de bifenilos policlorados (Bpc) y otras sustancias tóxicas y, además, controla la importación y exportación de residuos peligrosos y maneja éstos en terrenos federales y de comunidades indígenas.

Reducción

Las iniciativas sobre reducción de residuos peligrosos se realizan a nivel provincial pero, generalmente, no se contemplan en el esquema regulador tradicional sobre la administración de residuos. Existen aún unas cuantas normas para el funcionamiento de instalaciones de reciclaje que las sujetan a los mismos requisitos que las instalaciones convencionales de disposición.

Un método aprobado para reciclar residuos peligrosos es el intercambio de residuos entre las empresas que los generan y aquéllas que los puedan utilizar en sus operaciones. Los reglamentos sobre la exportación e importación de residuos peligrosos, de 1992, establece condiciones para la exportación e importación de residuos con fines de reciclaje. El reciclaje de residuos peligroso se describe a través de 15 métodos diferentes en el Anexo I de dicho reglamento.

Disposición

El Consejo de Ministros del Ambiente de Canadá elaboró, en abril de 1991, los Lineamientos Nacionales para el Depósito en Confinamientos de Residuos Peligrosos. Estos

lineamientos consideran los siguientes aspectos: selección del sitio, diseño y construcción, cierre y medidas de precaución posteriores al cierre y la operación y monitoreo del depósito en confinamientos de residuos peligrosos.

Las autoridades provinciales, territoriales y municipales cuentan, generalmente, con disposiciones que regulan los confinamientos, incineradores, instalaciones empleadas para el procesamiento de residuos y otros sitios para la eliminación de residuos (sitios de mezcla de desechos, vertederos, estaciones de transferencia y sitios de llantas usadas).

2.4.4 Transportación, exportación e importación

Transportación

La Ley de Transporte de Productos Peligrosos y sus reglamentos rigen el movimiento transfronterizo de todos los productos peligrosos que cruzan las fronteras provinciales o internacionales, incluyendo los residuos peligrosos transportados por carretera, ferrocarril, barco o aeronave.

El Consejo de Ministros del Ambiente de Canadá (CCME) ha realizado recomendaciones específicas para el manejo de residuos biomédicos en sus "Lineamientos para la administración de biomédicos en Canadá". Estos lineamientos establecen procedimientos para el apartado, el empaque, la desinfección, el transporte y la incineración definitiva de residuos biomédicos.

Exportación e importación

La Ley de Protección al Ambiente de Canadá establece requisitos para la exportación e importación de residuos peligrosos. Bajo el encabezado "Exportación e importación de sustancias tóxicas y materiales de desecho", la CEPA establece dos listas de identificación que prohíben o monitorean sustancias peligrosas y tóxicas: la "Lista de sustancias tóxicas que requieren notificación de exportación" y la "Lista de residuos peligrosos que requieren notificación de exportación o importación".

2.4.5 Tratados Internacionales

La Convención de Basilea sobre "el control de los movimientos fronterizos de residuos peligrosos y su eliminación" se negoció bajo el auspicio del Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y abarca los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, algunos residuos domésticos, residuos de índole infecciosa y de incineradores municipales. Dicha convención se firmó en 1989 y Canadá la ratificó en agosto de 1992.

Canadá tiene un tratado bilateral con Estados Unidos para reglamentar las exportaciones de residuos: el "Acuerdo sobre los desplazamientos de residuos peligrosos" firmado en 1986. Dicho tratado permite los envíos transfronterizos de residuos, sujetos a la notificación de

exportación y al consentimiento del país que los acepta. Cada parte signataria debe cumplir las leyes internas de la otra parte". (Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 1996-b).

2.5 México

2.5.1 Estructura de la reglamentación mexicana

"En México el primer Reglamento sobre Contaminación Industrial data de 1940 y trata sobre la contaminación que producía la industria. Pero no fue hasta 1970, cuando el Estado Mexicano asume la responsabilidad de proteger y mejorar el medio ambiente, La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el Artículo 73, fracción XVI, inciso 4º, cita que las medidas adoptadas para prevenir y combatir la contaminación ambiental serán obligatorias en el país .

En 1971, México asumía un cierto papel de vanguardia en el ámbito de la ecología fungiendo como país sede de la Reunión Preparatoria de la Conferencia Internacional sobre Medio Ambiente y que, en ese marco, se emitió la primera Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental .

En el período de 1976-1982, se decretó la segunda Ley Nacional del Medio Ambiente llamada Ley Federal de Protección Ambiental que entró en vigor el 22 de diciembre de 1982 y sienta las bases para la creación de una dependencia autónoma en la materia, otorgando así a la política ecológica rango de ministro y gabinete.

El 17 de abril de 1984 se reformó la ley vigente que dio lugar a la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), entendida como el organismo encargado de la política ambiental del país con atribuciones generales en materia de planificación y coordinación en las cuestiones ecológicas relevantes" (SEDUE, 1983 5-18 pp.)

El marco jurídico que define las regulaciones en materia de residuos peligrosos está señalado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que entró en vigor el primero de marzo de 1988 y que vino a sustituir a la Ley Federal de Protección al Ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación en enero de 1982. Por último el 4 de noviembre 1996, el Congreso de la Unión aprobó las reformas a la LGEEPA, de las cuales destaca la descentralización de federal de funciones, mayor competencia ambiental para estados y municipios; acceso a público a información, redefinición de impacto ambiental, e incorporación de los principios de desarrollo sustentable, (Gaceta Ecológica, núm 40, 1996)

El Reglamento de la LGEEPA plantea procedimientos de registro e información obligatorios para todos los sujetos responsables de la generación de residuos, así como los lineamientos de manejo y de disposición final, importación y exportación de los mismos. Este reglamento

es de observancia en todo el territorio nacional y su aplicación compete a la federación a través de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap).

Los objetivos principales de la ley en relación con los residuos se muestran en el Cuadro 2.1.
Cuadro 2.1 Principales funciones de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos

Nivel de Competencia	Funciones
Federal	<ul style="list-style-type: none"> I. Determinar y publicar en el DOF los listados de los residuos peligrosos; así como sus autorizaciones, en los términos de la ley. II. Expedir las NOM y los procedimientos para el manejo de los residuos peligrosos, con la participación de las Secretaría de Comercio y Fomento Industrial; de Salud, de Energía, Minas e industria Paraestatal y de Agricultura y Recursos Hidráulicos. III. Controlar el manejo de residuos peligrosos que se generen en las operaciones y procesos de extracción, consumo, beneficio, y transformación. IV. Autorizar la instalación y operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, recolección, incineración y disposición final de los residuos peligrosos. V. Evaluar el impacto ambiental de los proyectos de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos. VI. Autorizar la importación y exportación de residuos peligrosos, sin perjuicio de otras autorizaciones que correspondan otorgar a las autoridades competentes. VII. Fomentar y coadyuvar al establecimiento de plantas de tratamiento y de sus líneas de comercialización, así como de empresas que establezcan plantas de reciclaje de residuos peligrosos. VIII. Establecer y mantener actualizado un sistema de información sobre generación de los residuos peligrosos. IX. Fomentar que las asociaciones y colegios profesionales, cámaras industriales y de comercio y otros organismos afines, promuevan actividades que orienten a sus miembros, en materia de prevención y control de la contaminación ambiental originada por el manejo de residuos peligrosos. X. Promover la participación social en el control de los residuos peligrosos. XI. Fomentar en el sector productivo, y promover ante las autoridades competentes, el uso de tecnologías que reduzcan la generación de residuos peligrosos. XII. Fomentar en el sector productivo y promover ante las autoridades competentes el desarrollo de actividades y procedimiento que coadyuven a un manejo seguro de los residuos peligrosos.
Estatal y Municipal	<ul style="list-style-type: none"> I. Otorgar licencias de uso de suelo. II. Evaluar licencias ambientales de las estaciones de transferencia.

Fuente: Gaceta Ecológica, núm. 40, 1996.

2.5.2 Criterios y definiciones sobre generación de residuos

Los generadores de residuos peligrosos son las personas físicas o morales que, como resultado de sus actividades, generen residuos peligrosos. Los generadores deben obtener un permiso de la Semarnap para manejar sus residuos peligrosos. Además, son los responsables de determinar si sus residuos son peligrosos o no, así como cumplir con las Normas

Oficiales Mexicanas (NOMs) sobre su clasificación y pruebas para dicha característica determinar.

El Reglamento de Residuos Peligrosos impone también responsabilidades sobre los generadores e informar a cerca de fallas en el sistema de control de manifiesto a la Semarnap. El generador es el responsable final de garantizar que el transporte y la disposición final de sus residuos peligrosos cumplan con dicho reglamento y las NOMs aplicables, y de que todas las personas que participen en el manejo de los mismos se registren debidamente ante la Semarnap.

2.5.3 Identificación, almacenamiento, recuperación y disposición

Identificación

La normatividad mexicana, no ha establecido un procedimiento de identificación de residuos peligrosos. Ya que sólo ha basado en la NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos por su toxicidad al ambiente.

Almacenamiento

El derecho ambiental mexicano establece una diferencia entre dos tipos de actividades sobre residuos peligrosos: generación y manejo. Esta distinción implica responsabilidades diferentes, principalmente en cuanto al sistema de permisos y manifiestos establecido en el Reglamento de Residuos Peligrosos.

Bajo el Reglamento de Residuos Peligrosos, el manejo de los mismos incluye todas las operaciones relacionadas con el almacenamiento, recolección, transporte, confinamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos. Se requiere un permiso especial de la Semarnap manejar residuos peligrosos con base en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) de la Semarnap.

Se define el término tratamiento como la acción de transformar los residuos, por medio de lo cual se cambian sus características. El tratamiento de residuos peligrosos pertenece a la categoría de "manejo de residuos peligrosos", y toda actividad de tratamiento debe estar autorizada por la Semarnap.

Las leyes y reglamentos mexicanos no definen los métodos generales de tratamiento. En los casos en que es necesario, deben tratarse previamente los residuos con anterior a su disposición final. Sin embargo, los requisitos de tratamiento previo se establecen por lo regular en los permisos de manejo individuales. Además, la NOM-052-ECOL-1993 establece los niveles máximos permisibles de concentraciones de químicos residuales que pueden eliminarse, imponiendo la responsabilidad al eliminador final de residuos para que garantice que todos los residuos eliminados cumplan con tales normas. Véase NOM-057-ECOL-1993. La lista de niveles máximos permisibles de residuos tóxicos se establece en el Anexo 5 de la NOM-052-ECOL-1993.

El almacenamiento de residuos peligrosos se define como la acción de retener temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección, o se dispone de ellos. Se define disposición final de manera independiente al almacenamiento. En virtud de que éste último pertenece a la categoría de manejo de residuos peligrosos, deben obtenerse los permisos respectivos de manejo antes de operar una instalación de almacenamiento temporal.

El almacenamiento temporal de residuos peligrosos tanto en áreas cerradas como abiertas, debe cumplir con las condiciones mínimas de los reglamentos y normas técnicas.

Reducción

La política nacional de residuos peligrosos otorga una importancia prioritaria a la reducción de residuos en su generación y peligrosidad en la fuente, en particular, mediante de la adopción de procesos productivos más limpios. La segunda prioridad es su reuso, reciclado y recuperación y, la última, su tratamiento y disposición final (Semarnap-INE, 1995).

La política, en materia de finanzas, enfatiza la importancia del valor de los residuos susceptibles de reciclado o recuperación, como la oportunidad de crear la mercadotecnia y generar los empleos necesarios para el país.

En el aspecto social, busca contar con la sociedad como aliada, para lograr el manejo ambientalmente seguro para los residuos, creando las instalaciones necesarias para ello y evitando el rechazo de las comunidades con base en su participación informada en la planeación de la ubicación de las mismas (Semarnap-INE, *op. cit.*).

Disposición

La disposición de residuos peligroso es la acción de depositar en forma permanente en sitios adecuados y condiciones apropiadas a fin de evitar daños al ambiente. Como la disposición pertenece a la categoría de manejo, debe obtenerse el permiso respectivo antes de operar una unidad de disposición final. Las personas físicas o morales dedicados a la disposición final de residuos peligrosos son responsables del tratamiento previo a los mismos que sea necesario.

La disposición final puede ser de tres tipos: (1) confinamiento controlado; (2) confinamiento en formaciones geológicas estables; y (3) receptores de agroquímicos. El confinamiento controlado, o tiradero no natural, se define como la obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos que garantice su aislamiento definitivo. El confinamiento en formaciones geológicas estables es la obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos en estructuras naturales impermeables que garanticen su aislamiento definitivo.

En el Diario Oficial de la Federación (DOF) se han establecido y publicado siete tipo de manifiestos y reportes de generación y manejo de residuos peligrosos que tienen que ser llenados por los generadores y empresas que ofrecen servicios, para ser enviados al INE, ya sea directamente o a través de las delegaciones de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

Hasta ahora han sido publicadas siete Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sobre residuos peligrosos y se encuentran en desarrollo quince proyectos de normas (Semarnap-INE, 1995). Las Normas son¹:

- **NOM-052-ECOL-1993**, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- **NOM-053-ECOL-1993**, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un desecho peligroso por su toxicidad al ambiente.
- **NOM-054-ECOL-1993**, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-52-ECOL-1993.
- **NOM-055-ECOL-1993**, que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados a confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radioactivos
- **NOM-056-ECOL-1993**, que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
- **NOM-057-ECOL-1993**, que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
- **NOM-058-ECOL-1993**, que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

El gobierno mexicano, ha tratado de cubrir las carencias que aún existen en materia de residuos peligrosos y ha elaborado una serie de normas que se listan a continuación.

Las Normas oficiales en materia de residuos peligrosos y especiales que se encuentran en desarrollo, son:

- ◊ Proyecto de norma Oficial Mexicana NOM-090-ECOL-94, que establece los requisitos para el diseño, construcción y operación de presas de jales.
- ◊ Requisitos para la impermeabilización de celdas de confinamiento controlado
- ◊ Técnicas de muestreo y manejo de muestras para el análisis de residuos peligrosos.
- ◊ Manejo de aceites lubricantes usados.
- ◊ Tratamiento térmico de residuos peligrosos.
- ◊ Caracterización de residuos estabilizados para su confinamiento
- ◊ Manejo de residuos de la extracción de petróleo y gas.

¹Publicadas en el DOF del 22 de octubre de 1993 Modificación a su nomenclatura en el DOF del 29 de noviembre de 1994.

- ◊ Revisión de NOM-052-ECOL-1993.
- ◊ Requisitos técnicos para la formulación de combustibles alternos en base a residuos.
- ◊ Revisión de la NOM-055-ECOL-1993
- ◊ Manejo de envases y recipientes de agroquímicos.
- ◊ Manejo de residuos peligrosos en la industria de plaguicidas.
- ◊ Requisitos para el manejo de llantas usadas.

2.5.4 Transporte, exportación e importación

En concordancia con la LGEEPA, y con la leyes de vías generales de comunicación y de salud, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (STC) emitió el día 7 de abril de 1993 en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. Además, publicó las normas oficiales mexicanas que regulan aspectos técnicos del transporte de los residuos peligrosos.

El transporte terrestre de materiales peligrosos y residuos, está regulado por la Ley de Comunicación y el Reglamento del Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (*en lo sucesivo Reglamento de Transporte de Residuos; citado como RTTMRP*). El Reglamento del Transporte de Residuos regula el transporte, tanto de los materiales peligrosos como de los residuos peligrosos bajo una misma ley.

El transporte de materiales y residuos peligrosos por embarcaciones se rige por la Ley de Navegación. Si bien no existen requisitos específicos para el transporte de cargas peligrosas, se aplican todos los permisos respectivos requeridos por la Ley de Ecología y demás reglamentos ambientales. Por lo tanto se aplican las disposiciones de la Ley de Navegación. La Ley de Navegación se aplica a las siguientes vías acuáticas: mares territoriales, ríos, arroyos, lagos, lagunas, estuarios navegables y canales. La SCT tiene jurisdicción sobre la administración y aplicación de la Ley de Navegación. El transporte de residuos peligrosos por vía aérea está explícitamente prohibida

La normatividad en los sistemas de transporte, en materia de sustancias, materiales y residuos peligrosos, abarca los siguientes puntos: un listado de estas sustancias, las características del etiquetado, los sistemas de identificación, la información en caso de emergencia, el marcado del envase y el embalaje, la compatibilidad de los sistemas de almacenamiento y transporte y las especificaciones para la construcción y reconstrucción de envases (*Semarnap-INE, op. cit.*).

Como se observa, las Normas Oficiales Mexicanas han comenzado a cubrir todas las áreas legales sobre residuos peligrosos. Pero se requiere su revisión continua, para cumplan con las necesidades del país y los convenios internacionales.

Exportación e Importación

Entre México y Estados Unidos se da un activo movimiento transfronterizo de residuos peligrosos. Por un lado, la industria maquiladora exporta residuos peligrosos al vecino país del norte, en los términos del artículo 153 de la LGEEPA; por otro lado, varias empresas mexicanas dedicadas al reciclaje, o recuperación de materiales secundarios, importan legalmente residuos que son utilizados como materia prima en diferentes procesos industriales. Además, se debe tener en cuenta que un volumen de movimientos clandestinos hacia México tiene por objeto disponer ilegalmente los residuos peligrosos generados en los Estados Unidos (Sedesol-INE, 1994-a).

Conforme a las disposiciones contenidas tanto en acuerdos bilaterales como multilaterales de los cuales forma parte de nuestro país, la exportación de residuos peligrosos para reciclaje, recuperación y/o disposición final, queda sujeta, en primer lugar, al consentimiento otorgado por el país de destino (López, 1995).

2.5.5 Tratados Internacionales.

Acuerdo sobre Cooperación para la Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en la Zona Fronteriza

"Acuerdo sobre Cooperación para la Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en la Zona Fronteriza (Acuerdo de La Paz México - Estados Unidos, firmado en La Paz, Baja California Sur el 14 de agosto de 1983) entró en vigor el 16 de febrero de 1984, publicándose el 22 de marzo de 1984 en el Diario Oficial. Este Acuerdo define a la zona fronteriza como una zona a ambos lados de la frontera política de 100 kilómetros de ancho.

El Acuerdo establece un marco general para la prevención, reducción y eliminación de las fuentes contaminantes de aire, agua y tierra. Se crearon además grupos de trabajo para el cumplimiento de disposiciones y prevención de la contaminación, respuesta de emergencia y planeación del agua, desechos peligrosos y del aire. En 1990, en respuesta a un acuerdo presidencial entre los Estados Unidos de Norteamérica y México, el Departamento de Protección al Medio Ambiente (EPA) y la predecesora de la Sedesol (actualmente Semarnap), la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) desarrollaron un plan ambiental integral para la zona fronteriza. Se dio a conocer el plan en febrero de 1992 como: Plan Integral Ambiental para la Frontera.

En octubre de 1993, los dos países publicaron un Informe de Avances en las Actividades de Estados Unidos y México, establecidas en el Plan Integral Ambiental para la Frontera de la Zona Fronteriza entre México y Estados Unidos de Norteamérica.

De marzo de 1992 a marzo de 1994, la Sedesol efectuó; cerca de 3,500 inspecciones en estados fronterizos por violaciones al medio ambiente. Dos mil de ellas ocurrieron en instalaciones de maquiladoras. Estas inspecciones condujeron al cierre parcial o total de 232 instalaciones fronterizas (208 de éstas eran maquiladoras)

Los anexos al Acuerdo de La Paz son: Anexo I: Acuerdo de Cooperación para la Solución del Problema de Saneamiento en San Diego, California y Tijuana, Baja California Norte. Firmado en San Diego, California el 18 de julio de 1985. El acuerdo entró; en vigor el mismo día. No se publicó en el Diario Oficial. TIAS II269.

En 1992, el Gobierno de México dio inicio a un programa de obras públicas en la zona fronteriza de tres años de duración y \$460 millones de dólares. Los proyectos incluyen el desazolve de los sistemas de alcantarillados, limpieza de lugares de desecho peligroso, construcción de tiraderos sanitarios y el mejoramiento del manejo del transporte público y tráfico. El esfuerzo conjunto con los Estados Unidos resultó en la eliminación adecuada de 6,000 barriles de desechos peligrosos, que se habían abandonado ilegalmente en una planta mexicana en Mexicali. La Sedesol ha colaborado con la EPA para la capacitación en la inspección de materiales peligrosos, control de la calidad del aire y cumplimiento con las normas. Se realizó un trabajo de campo para el estudio bilateral de los contaminantes tóxicos del Río Bravo. Asimismo, se elaboró un Plan de Acción Fronterizo para el periodo 1995-2000.

Convenio de Basilea

"México ratificó el Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación el 22 de febrero de 1991. Entró en vigor el 5 de mayo de 1992 y se publicó; en el Diario Oficial el 9 de agosto de 1991" (Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 1996-c).

3. REDUCCIÓN Y MINIMIZACIÓN

3.1 Generalidades

Dentro de las estrategias para el manejo y control de residuos, la *minimización* ha emergido como una "herramienta" necesaria para un manejo integral de los residuos peligrosos. No obstante, no hay una definición precisa de este concepto, lo que ha causado una confusión en su uso y aplicación. El primer problema se debe a que minimización no existe en español ya que es la traducción literal de la palabra inglesa *minimization* que se traduce como "reducción al mínimo" (Simon and Schuster's, 1973). En cambio sí existe el verbo español *minimizar* que de acuerdo a la Real Academia de la Lengua Española significa reducir de volumen una cosa, y la palabra "reducir" a su vez es definida como disminuir o aminorar. La segunda confusión proviene de que estos dos términos se utilizan en los textos con diferente sentido a pesar de que son sinónimos. Sin embargo y a pesar de estos problemas, el concepto es fácilmente comprensible, pues su aplicación tiene una gran dosis de sentido común.

3.2 Definición de minimización y reducción

A continuación se presentan los conceptos vertidos en el informe sobre minimización de residuos que presentó la EPA al Congreso de Estados Unidos de Norteamérica en 1984 y una propuesta para el manejo de los principales términos relacionados con la reducción de residuos basada en Lafqa (1996).

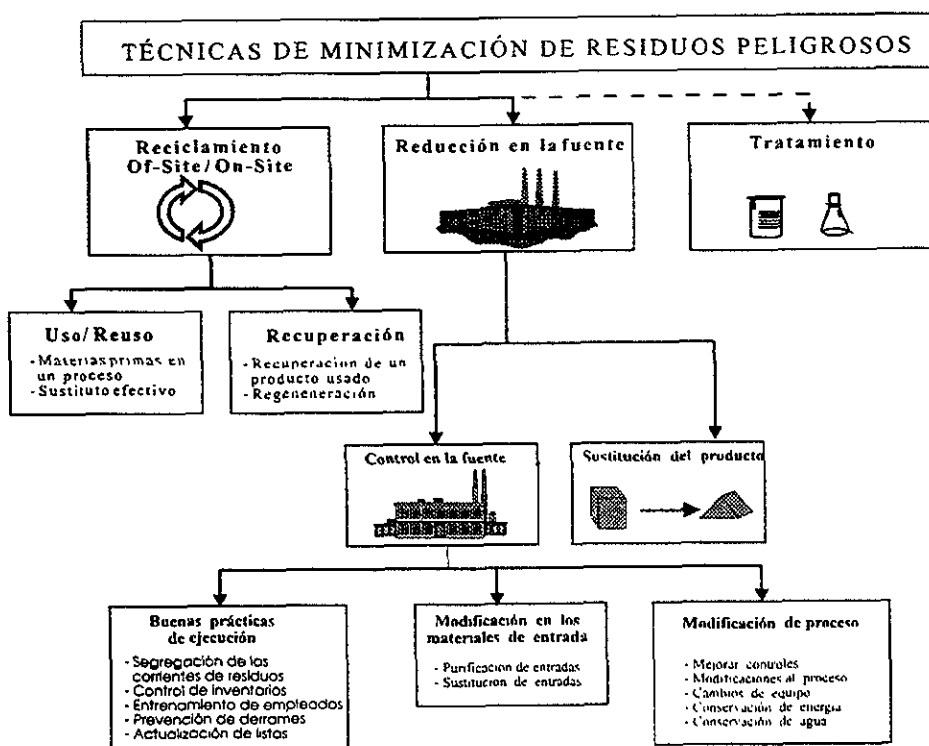
EPA en Cheremisnoff y Graffia, (1996) plantea la minimización, enfocándola sobre dos tipos de actividades: la reducción en la fuente y el reciclamiento, definiendo términos relacionados con este concepto como sigue (Figura 3.1).

- **Reducción en la fuente.** Disminución de la generación de desechos en la fuente, generalmente en el proceso. Puede lograrse a través de tratamientos o también modificación del proceso, sustitución de materias primas o mejoramiento de la pureza de los mismos, buenas prácticas de operación, incremento de la eficiencia del equipo, y reciclamiento dentro del proceso.
- **Reciclamiento.** Uso o reuso de un desecho como sustituto efectivo de un producto comercial, o como materia prima de un proceso industrial. También se refiere a la recuperación de algunos constituyentes útiles del desecho, directamente o mediante un proceso. El reciclamiento puede llevarse a cabo dentro o fuera del sitio de generación
- **Minimización desechos.** La reducción de los residuos peligrosos, -en cantidades o un volumen tales que incidan sobre la solución del problema-, durante su generación,

tratamiento, almacenamiento o en el área de disposición. También se refiere a la eliminación de la toxicidad de los residuos peligrosos.

- **Reducción de desechos.** Prácticas en planta que reducen, evitan o eliminan la generación de residuos peligrosos de manera de reducir el riesgo para la salud y ambiente. No incluye el reciclamiento o cualquier tipo de tratamiento fuera de planta; o la concentración o dilución de los componentes peligrosos.

Figura 3.1 Técnicas de minimización propuestas por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA)

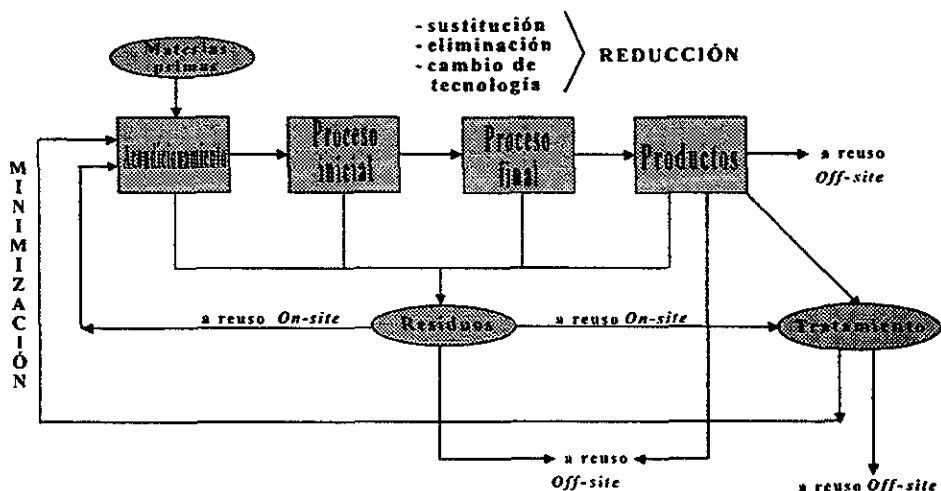


Fuente: Cheresimstnoff, 1996

Lafqa (1996) considera que el término reducción se aplica a cualquier actividad que evita la formación de residuos peligrosos mediante la sustitución de materias primas o insumos, que los generan y/o cambios de tecnología (Figura 3.2). Mientras que el término minimización se refiere exclusivamente a medidas que se aplican al proceso generador o a los productos

desechados, que disminuyen el volumen o cantidad de los residuos peligrosos. Las medidas dentro del proceso son el reciclamiento de los residuos dentro del mismo sistema generador “on-site” y el control de proceso: buenas prácticas de operación, mantenimiento, control de equipo, etc. La minimización de los productos desechados se refiere al reciclado en el mismo proceso que lo generó “on-site” o su reuso con o sin tratamiento previo en otro proceso “off-site”.

Figura 3.2 Concepto de reducción y minimización



Fuente: Lafqa, 1996

Anteriormente, se consideraba a la minimización como una estrategia avanzada y compleja que sólo se podía emplear en programas de desarrollo ambiental en países industrializados. Hoy en día, la experiencia ha demostrado lo contrario, pues el éxito de la minimización para el control y manejo de los residuos peligrosos bajo condiciones económicas difíciles, la ha convertido en la herramienta más poderosa para resolver este problema en países en vías de desarrollo (Eyer, 1994).

Asimismo, hay que considerar que en las últimas décadas, la industria en su búsqueda de nuevas estrategias fomentado un mayor nivel de investigación científica y tecnológica para encontrar la manera de mejorar los procesos, y desarrollar nuevas tecnologías lo que ha ayudado a la implementación de los programas de reducción y minimización (Huising, 1989). La oferta de nuevas tecnologías ha facilitado, desde un punto de vista económico, los cambios necesarios para operar de forma más segura y generar menos residuos.

3.3 Políticas en el manejo de residuos peligrosos

En México, la Secretaría de Recursos Naturales y Pesca (Semarnap), plantea en el "Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México 1996-2000" (PROMI), las orientaciones y principios para el manejo de estas sustancias (Figura 3.3 a). Sin embargo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), establece un orden diferente en las prioridades en el manejo de residuos peligrosos, respecto a las planteadas por la Semarnap (Figura 3.3 b). Estas diferencias se analizarán a continuación

3.3.1 Prevención

De acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el mejor método para la prevención en la generación de residuos, es por el uso de las tecnologías denominadas limpias (*clean production*), las que definen como "la aplicación continua de una estrategia ambiental integral preventiva en los procesos y productos, para reducir los riesgos al hombre y ambiente" (Cuadro 3.1).

La Semarnap (1996), coincide con la definición propuesta por el PNUMA respecto a la producción limpia, pero determina a esta actividad, como una medida integrada en la minimización de residuos peligrosos. Sin embargo tanto el PNUMA como la Semarnap concensan que esta medida, tienen problemas para aplicarse en la industria que tiene tiempo operando, por lo que la recomiendan ampliamente en los procesos nuevos.

Cuadro 3.1 Implicaciones de la producción limpia

Para procesos	Para productos
<ul style="list-style-type: none">• Reducción de la cantidad y toxicidad de las emisiones de residuos en la fuente.• Conservación de materias primas, agua y energía• Eliminación del uso de materias primas tóxicas	<ul style="list-style-type: none">• Reducción de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de los productos

Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 1993

Adicionalmente el PNUMA promueve y fomenta a nivel mundial el "Programa de Producción Limpia", principalmente en los países en vías de desarrollo. En este programa estimula la colaboración de los sectores involucrados, es decir gobierno, industria e individuos y especifica el papel que debe desempeñar cada uno

Figura 3.3 a

Lineamientos y políticas de control en materia de residuos peligrosos propuestos por Semarnap

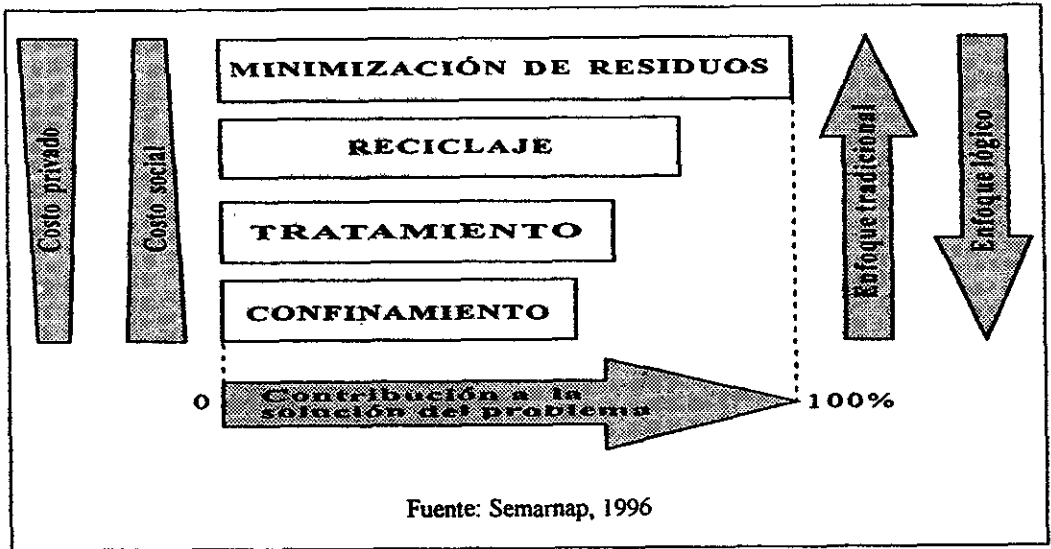
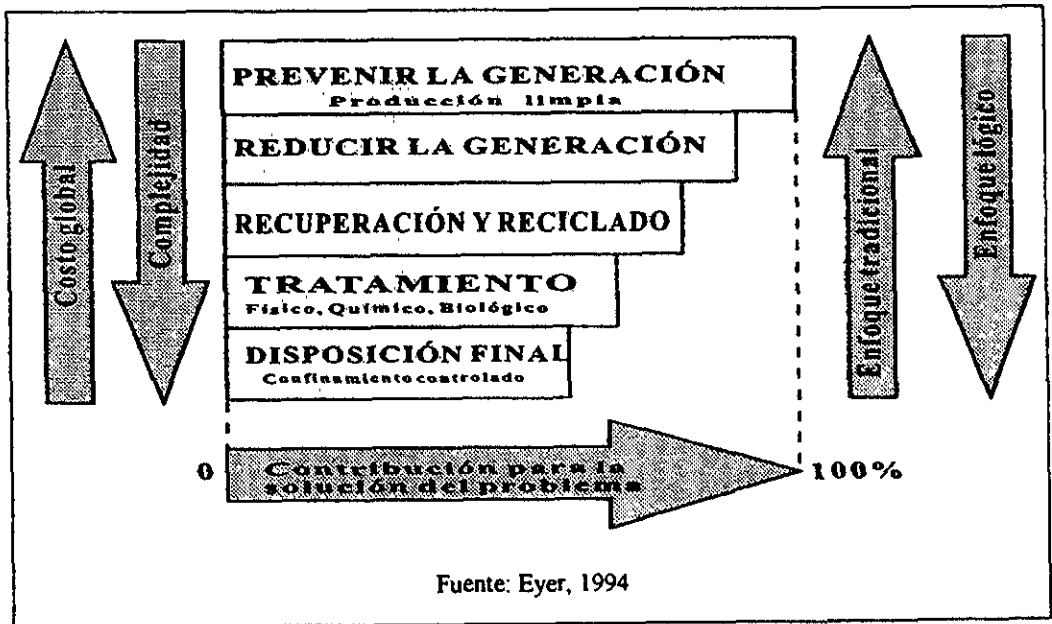


Figura 3.3 b

Estrategia en el manejo de residuos peligrosos a nivel mundial



A continuación se describen las diversas actividades que deben cumplir cada sector para establecer una tecnología limpia(PNUMA, 1993).

Industria

- Acercamiento a una ética integral de protección al ambiente
- Creación de un comité administrador
- Promover e involucrar a los trabajadores
- Realizar prácticas internacionales de trabajo
- Uso de herramientas especiales (auditorías para procesos y productos)

Gobierno

- Formular regulaciones comprensivas e integrales y hacerlas cumplir
- Incentivos económicos
- Proveer de asistencia técnica
- Promoción por medio de información y educación

Individuos

- Aplicar los principios de producción limpia en su vida profesional y privada

3.3.2 Reducción en la fuente

Debido a que muchos procesos fueron diseñados en tiempos en el cual el control ambiental era nulo, la reducción en la fuente se ha promovido vigorosamente, como una medida de control en los procesos establecidos y en los actuales.

El PNUMA y la Semarnap, coincide con la definición sobre la reducción en la fuente propuesta por la EPA, presentada en la sección 3.2 de este capítulo, sin embargo el orden jerárquico difieren, debido a que en el PROMI (1996), establece que la reducción en el la fuente, es otra actividad comprendida dentro del concepto de minimización. Las principales acciones que son utilizadas en la reducción, se muestran en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2 Acciones para la reducción de residuos en la fuente

Prácticas adecuadas de operación	Modificación en materiales de entrada	Modificaciones en los procesos
<ul style="list-style-type: none"> • Segregación de residuos • Control de inventarios • Entrenamiento de empleados en la prevención de fugas y derrames 	<ul style="list-style-type: none"> • Materias primas mayor pureza • Purificación de entrada • Sustitución de entradas 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios de equipo • Mejora de controles • Modificaciones de tecnología

Fuente: Agencia de Protección al Ambiente (EPA), 1992

3.3.3 Recuperación y reciclado

La recuperación de materiales por medio del reciclaje ha cobrado importancia para la minimización de residuos, ya que contempla una serie de medidas y de acciones que, en su mayoría, son inmediatas y de bajo costo.

La recuperación consiste en el reprocesamiento de un material para recobrar un producto útil y/o reintegrarlo a un proceso productivo. El reciclaje tiene como meta el que un material usado sea reutilizado como ingrediente, o intermediario, en un proceso industrial para la fabricación de un producto o como un sustituto efectivo para un producto comercial (Rodríguez, 1991).

En los países en vías de desarrollo, el reciclaje ha sido una actividad con gran aceptación, ya que implica un *modus vivendi* para un pequeño sector de la población. La recuperación de estos residuos se ha concentrado principalmente en el reciclaje de papel, cartón, vidrio, metales como: hierro, cobre, plomo, aluminio y otros.

Un programa de reciclamiento de residuos consiste en una serie de medidas y actividades, a corto y largo plazo, que se basan en la recuperación y reutilización de los residuos que se generan en una planta industrial (Rodríguez, *Ibidem*). Su principal característica es que se implantan con facilidad, sus costos son bajos y sus resultados son rápidos. Con base en el tipo de actividad realizada, se pueden dividir en:

- 1.- Recuperación y reciclado en el sitio (*In situ*)
- 2.- Recuperación y reciclado fuera del sitio (*Off situ*)
- 3.- Intercambio de residuos

La primera opción implica una reutilización del residuo, con o sin tratamiento, en el mismo proceso o en otro, pero en el lugar donde se generó. En la segunda opción, se lleva a cabo el reuso del residuo fuera del lugar donde se generó, es decir, puede ser insumo primario, con o sin tratamiento, de otro proceso industrial. Por último, el intercambio de residuos, aunque es una modalidad nueva, ha funcionado con gran éxito en países como E.U.A., Inglaterra, Alemania, Bélgica y Suiza. Consiste en la transferencia de materiales a compañías especializadas para que los reciclen en otro proceso industrial. Su éxito se basa en analizar, diseñar y dictaminar los métodos de procesamiento óptimo para convertir los residuos en un insumo atractivo para su venta (EPA, 1994-b).

Actualmente, en México estas actividades de intercambio se realizan a nivel industrial a través de sistemas informales y en ocasiones formales, como los organizados por asociaciones y cámaras, y los cuales incluyen la información necesaria como las cantidades de los residuos, sus características, precio, etc.

Cabe resaltar que los países en vías de desarrollo han comenzado a desarrollar programas para el control de residuos que otorgan gran importancia al reciclamiento para la reducción de los residuos que, en conjunto, aporta los siguientes beneficios (Ward, 1993) :

- Disminución de la generación de residuos
- Disminución de los riesgos por manejo, embalaje, almacenamiento y transporte de residuos
- Recuperación de materiales, los cuales pueden reusarse en el mismo proceso o en otro, por lo que se disminuyen los costos de producción
- Recuperación de energía de algunos residuos
- Disminución de los costos por disposición final de los mismos
- Promoción de la conservación de los recursos naturales.

El éxito de estos puntos depende de la separación de los residuos; es decir, el máximo aprovechamiento de los residuos se logra cuando estos no se mezclan con otros residuos del proceso o de otros procesos. La disminución de costos esta directamente relacionada con la recuperación de los residuos dentro de la planta (recuperación *In-situ*), o fuera de ella, a través de compañías especializadas (recuperación *Of-situ*).

Cuando se implementa un programa de reciclaje de residuos, no se deben copiar los programas de los países desarrollados; pues existen diferencias culturales que cuando no se toman en cuenta, evitan cualquier posibilidad de éxito. En países cuya industrialización es reciente, el control de proceso de muchas plantas no es suficiente para asegurar la generación de residuos de composición homogénea; lo que dificulta su reutilización. Por ejemplo, es común que se lleven a cabo cambios en el proceso basadas en criterios personales, como variaciones de temperatura, volúmenes de agua, reactivos, etc.

3.3.4 Segregación y concentrado

La segregación consiste en separar las fracciones de residuos o materiales peligrosos de los no peligrosos (Freeman, 1989). Esta técnica se aplica con gran éxito en una gran variedad de ramas industriales y se considera una buena práctica administrativa, pero es recomendable realizar estudios que generen la información necesaria para su buena instrumentación. En general, su implantación se considera sencilla y económicamente atractiva.

El concentrado consiste en una operación física cuyo objeto es reducir el volumen de los residuos por diferentes vías, como la evaporación, secado, destilación, extracción, etc. Se logra aumentar su densidad y/o se concentra la sustancia problema. Esta técnica facilita y eficiente su manejo, tratamiento y disposición.

El concentrado es una operación posterior a la segregación pero anterior a la etapa de recuperación y reuso de materiales

3.3.5 Intercambio de residuos

El intercambio de residuos nace a mediados de la segunda guerra mundial, y es promovido abiertamente en Europa desde 1973. Actualmente es una actividad muy reconocida en países como Austria, Finlandia, Holanda, Bélgica, Suiza, Alemania, Inglaterra e Italia (EPA, 1994-b).

La Comunidad Europea considera el intercambio de residuos como una herramienta muy valiosa para la conservación, y reducción del volumen de residuos que requieren disposición final.

En América el intercambio de residuos se establece en Estados Unidos y Canadá en la década de los setenta. En 1985, el Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) la definió y dispuso los métodos de intercambio de residuos para el reuso y reciclamiento de materiales secundarios. En los Estados Unidos y Canadá existen 53 compañías reconocidas que operan con intercambio de residuos industriales (incluyendo residuos peligrosos).

El intercambio de residuos consiste en transferirlos a compañías interesadas en reusar y/o reciclar estos materiales. Este intercambio es considerado como una herramienta para minimizar la disposición de residuos y fomentar el reuso y reciclamiento de materiales valiosos.

Las principales características de estas operaciones son (EPA, *op. cit.*):

- La identificación de compañías generadoras de residuos y las que los reciclan
- El intercambio de materiales se realiza sin cargo alguno, en la mayoría de los casos
- La operación está regulada por asociaciones industriales nacionales
- La disponibilidad de los residuos es difundida públicamente y se informa de las características fisicoquímicas, y cantidades
- Se mantiene la confidencia de las compañías que realizan las ofertas
- Se realiza investigación, y evaluación constante del papel de los intercambios
- Se crean grupos de investigación para diseñar y evaluar los métodos y equipos para el reprocesamiento de dichos residuos
- Se promueve la conservación de recursos naturales.

Algunos grupos de residuos que se intercambian comúnmente se presentan en el **Cuadro 3.3.**

Cuadro 3.3 Grupo de residuos que comúnmente se intercambian

Ácidos y bases	Productos plásticos	Metales	Productos petrolíferos y aceites	Chatarra y escorias de siderurgia
<ul style="list-style-type: none"> Disolventes orgánicos como: percloroetileno cloruro de metilo, tricloroetano, aceite térmico, acetona residual, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> PVC rígido polietileno restos de poliestireno Polipropileno etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Gránulos de cobre electrolítico procedente del troceado y mecanizado Escorias, cenizas y lodos de cobre, zinc, aluminio, estaño, plomo, níquel y de todo tipo de metales no ferrosos, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Pastas de refinería Petróleo con alcohol laúrico Todo tipo de aceites usados: de locomoción y/o usos industriales 	<ul style="list-style-type: none"> Chatarra de acero Chatarras tanto férricas como no férricas, etc.

Fuente: Revista técnica: Residuos, España. 1993

El intercambio de residuos es un servicio gratuito de las cámaras de comercio, industria y otras asociaciones, la cual se dirige por medio de un bolsa de subproductos a empresarios, lo que permite y facilita el intercambio de los residuos generados en una empresa y que se encuentra abierto a las industrias que lo deseen. El mecanismo administrativo que se realiza es el siguiente (Residuos, *op. cit*):

- La solicitud de anuncio que el empresario envía a la cámara se publica manteniendo el anonimato del anunciante mediante un sistema de codificación
- Las empresas interesadas en anunciar ofertas o demandas de materiales deben llenar una ficha, en la que se especifica una serie de características del tipo de desecho o producto. Esta ficha se deberá enviar a la cámara de comercio de su demarcación
- La cámara asigna un código a cada solicitud, con objeto de garantizar la confidencialidad del anunciante y publica en el boletín los datos recibidos
- Cuando un empresario se interesa por un anuncio publicado en el boletín, debe tomar su referencia y ponerse en contacto con la correspondiente bolsa titular
- La bolsa recoge los datos del empresario y los transmite al empresario anunciado, el cual contactará con el anterior.

El Cuadro 3.4 muestra un ejemplo de una oferta de un desecho que se promueve por medio de una bolsa en el área de subproductos químicos.

Cuadro 3.4 Ejemplo de una oferta de intercambio de residuos

Referencia	Tipo de material	Cantidad y frecuencia
D-M-01-Z-243	Metil etil cetona residual	20 ton métricas/mensual

Fuente: Revista técnica: Residuos, 1993

El Cuadro 3.5 muestra una lista de las ventajas y desventajas del intercambio de residuos.

Cuadro 3.5 Ventajas y desventajas del intercambio de residuos

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Promueve y facilita el reuso y el reciclamiento de materiales y residuos industriales • Promueve la conservación de los recursos naturales y las materias primas • Promueve la investigación y la asistencia técnica para el desarrollo de métodos y equipos para el reuso y reciclamiento • Promueve nuevos mercados para su comercialización • Reduce los riesgos en el hombre y el ambiente • Reduce los costos del tratamiento y la disposición final de los residuos peligrosos 	<ul style="list-style-type: none"> • La legislación en materia de intercambio de residuos peligrosos se encuentra limitada • Sólo un pequeño porcentaje de materiales se recuperan • No existen programas ni mercadotecnia para algunos materiales que son recuperados • Se requiere un grupo técnico con experiencia para diseñar los métodos y técnicas de recuperación de materiales

3.4 Programa de minimización de residuos peligrosos

3.4.1 Definición

Como se ha visto en este capítulo, minimizar y prevenir es una vía más efectiva que diseñar procesos y plantas de tratamiento para residuos peligrosos. Actualmente se ha comenzado a llevar a cabo en todo el mundo, la aplicación de métodos establecidos y determinados para minimización de residuos peligrosos, conocidos como programas de minimización (Figura 3.4).

Los programas de minimización de residuos peligrosos, consisten en una serie de operaciones ordenadas y preestablecidas, cuyo objetivo general es disminuir, controlar, tratar y disponer los residuos peligrosos que se generen en un proceso industrial (Freeman, 1989).

El desarrollo e implementación de un programa de este tipo es el elemento inicial en un programa de administración del control de la contaminación. Su efectividad se basa en la precisión y actualidad de la información de las corrientes de residuos, así como de los costos y beneficios de las técnicas de prevención, reducción y control de las corrientes de residuos generadas.

Actualmente, se cuenta con metodologías de minimización preestablecidas auxiliadas con los elementos principales de las normas de calidad ISO 9 000 y 14 000 y con los programas de calidad total (Eyer, 1994).

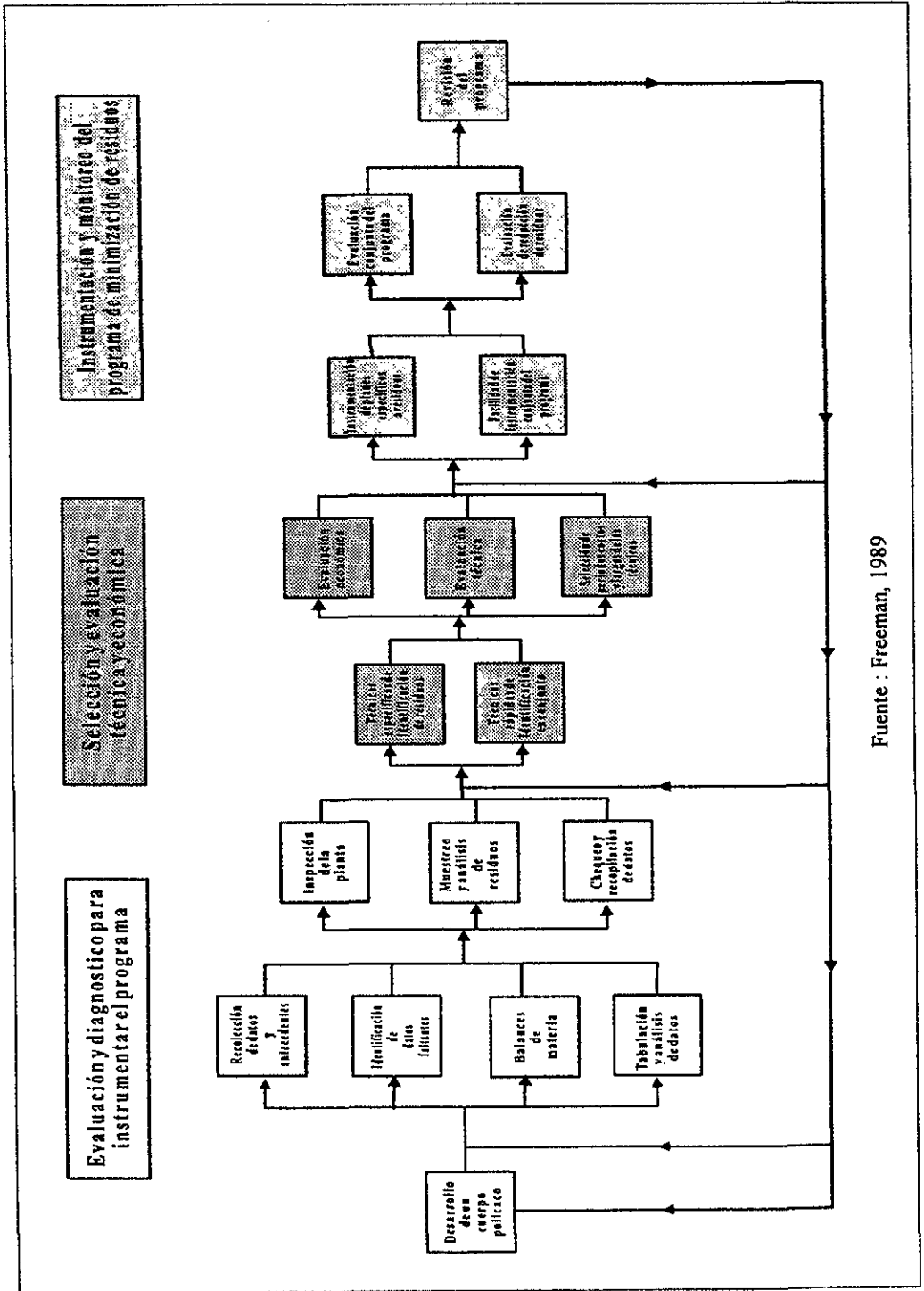
3.4.2 Estructura general

Un programa de evaluación de la minimización, propuesto por la EPA, consiste en un procedimiento sistemático con el objetivo de identificar formas para reducir o eliminar residuos. Este programa contempla cuatro etapas:

- Planeación y organización.
- Evaluación.
- Análisis de factibilidad.
- Implementación y monitoreo

Las etapas y actividades que se realizan en un programa de minimización, se muestran en los Cuadros 3.6 y 3.7.

Figura 3.4 Diagrama básico de un programa de minimización de residuos peligrosos



Fuente : Freeman, 1989

Cuadro 3.6 Etapas de un programa de minimización de residuos peligrosos

Planeación y organización	Evaluación	Análisis de factibilidad.	Implementación y monitoreo
Debido a que el programa afecta a muchos grupos funcionales dentro de la empresa, se requiere involucrarlos en la reducción de residuos.	En esta etapa se desarrolla un conjunto de opciones de minimización y se identifican las opciones más atractivas que requieran mayor análisis.	Al generarse una lista en la fase anterior se tiene la información para determinar si las opciones finales son factibles desde el punto de vista económico; además, se incluye la evaluación técnica.	En esta fase del programa se incluye el establecimiento del proyecto formal. El monitoreo determina la efectividad del proyecto; sin embargo, es más importante la reducción real del desecho.

Fuente: Centro de Calidad del Ambiente, ITESM, 1994.

Cuadro 3.7 Actividades generales de las etapas de un programa de minimización de Residuos peligrosos

Planeación y organización	Evaluación	Análisis de factibilidad.	Implementación y monitoreo
<ul style="list-style-type: none"> • Compromiso de la administración • Establecer objetivos y metas • Estructurar el o los equipos de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reunir información del proceso y de la planta • Priorizar y seleccionar blancos de evaluación • Seleccionar personal para los equipos de evaluación • Revisar datos e inspeccionar el lugar • Generar opciones • Depurar y seleccionar opciones para mayor estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar si el proyecto es o no rentable • Determinar los costos por la eliminación de la disposición y la reducción de residuos • Determinar los costos y ahorros de operación • Reportar los resultados de la evaluación y estudios técnicos y económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar los problemas del programa y resolverlos • Reforzar las medidas tomadas para la reducción y minimización • Lograr que el programa de minimización sea parte integral de la operación de la compañía.

Fuente: Centro de Calidad del Ambiente, *op. cit.*

3.4.3 Barreras a un programa de minimización

Las barreras a las que se enfrenta un programa de este tipo son las siguientes (OCDE, 1995):

- Sólo una pequeña parte de las industrias propone e implementa los programas
- Las grandes compañías nacionales e internacionales son las que los implementan
- El gobierno no provee apoyos e incentivos
- La mayor parte de la industria nacional cuenta con tecnología obsoleta por lo que, económicamente, los programas no son viables
- La mayor parte de los problemas que se encuentran para implementar dichos programas, radican en los sistemas administrativos poco funcionales y en la actitud del personal perteneciente a las compañías por falta de incentivos.

En general, el instrumentar un programa de minimización de residuos peligrosos produce los siguientes beneficios (Freeman, 1989):

- Disminución o eliminación de los costos por disposición o tratamiento de los residuos generados
- Reducción de los costos de manejo, transporte y almacenamiento
- Disminución de los riesgos al ambiente y al hombre por el manejo de residuos
- Promoción de innovación tecnológica
- Formación de una estructura administrativa para su manejo
- Generación de recursos humanos para el estudio y solución de la problemática de dichos residuos
- Promoción y cumplimiento de las normas y reglamentos

4. TECNOLOGÍAS TRADICIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS

Similarmente al manejo de desechos municipales, hasta hace pocos años los métodos para el tratamiento de desechos clasificados como “residuos peligrosos”, se han basado en la búsqueda de alternativas para la disposición final de los mismos. Estos métodos conocidos como de “destrucción” o “eliminación” utilizan básicamente la incineración o el confinamiento controlado, aunque también existen otras vías como los tratamientos fisicoquímicos o biológicos.

4.1 Tratamientos físicos y químicos (“fisicoquímicos”)

Los tratamientos físicos son procesos que, a través de un cambio en la concentración y/o estado físico, transforman a los constituyentes peligrosos a especies que representan un menor riesgo para el ambiente o salud y pueden ser sujetas a un procesamiento posterior o enviarse a disposición final (Griffin, 1988). La función del tratamiento físico, es la de facilitar su separación (Becerril, 1993).

Los tratamientos químicos consisten en procesos en los que, a través de reacciones químicas en las cuales se emplean reactivos para remover o transformar la composición de los residuos peligrosos, se logra transformarlos en compuestos menos solubles o tóxicos. En la mayoría de los casos los residuos pueden convertirse en sustancias estables (poco reactivas en el medio natural), pero en otros casos la eficiencia de la reacción no es suficiente para lograr los niveles máximos de concentración de las sustancias tóxicas que indican los criterios ambientales establecidos en la normatividad correspondiente, por lo cual se requiere sujetarlos a un tratamiento posterior (Griffin, *op. cit.*).

Este tipo de procesos fomentan la recuperación y el reuso de sustancias y materiales, obteniéndose subproductos útiles o efluentes residuales ambientalmente aceptables (Becerril, *op. cit.*).

4.1.1 Separaciones líquido-sólido

Este tipo de operaciones se basan en lograr contar con dispositivos como son los estanques de sedimentación por gravedad, los clarificadores, las unidades de flotación de espumas o gas y los filtros, que permiten separar eficientemente las dos fases.

Frecuentemente estos procesos se utilizan para facilitar la incineración y/o alternativas de disposición

Las operaciones de *trituration* y *molienda* tienen varias aplicaciones específicas. Estos procedimientos se utilizan en algunos procesos que generan residuos, con el fin de reducir su volumen; por ejemplo la fabricación de guantes, tambores vacíos recubiertos con películas de residuos químicos y/o otros contenedores. El otro uso principal de estos métodos, se encuentra en aquellos casos en los que debe reducir el tamaño de partícula del

material sólido, para lograr una adecuada reactividad física o química en las subsecuentes etapas de tratamiento (Tchobanoglous, 1993).

Por otra parte, la mayoría de los *procesos de transferencia de masa* tienen alguna aplicación en este campo. La destilación y evaporación se pueden emplear para separar la corriente de alimentación en dos o más fases, en la que una contenga la mayor parte del contaminante de interés. La desorción se utiliza para corrientes contaminadas con trazas de disolventes volátiles de aguas subterránea contaminada. Aún cuando los sistemas de absorción no se emplean directamente para el tratamiento de residuos peligrosos, se utilizan como un auxiliar de otros sistemas de procesamiento, como es el caso del control de las emisiones de vapor industrial.

Los sistemas de extracción sólido-líquido o con un fluido supercrítico se han promocionado para el procesamiento de residuos peligrosos. se investigó la remoción de bifenilos policlorados o dioxinas del suelo por medio de este proceso, pero las dificultades del procesamiento y lo altos costos, restringen su aplicación originando que su uso comercial sea limitado (Becerril, *op.cit*).

Finalmente los *sistemas de absorción (de carbón y resinas)* se están aplicando comercialmente a las corrientes residuales que contienen bajas concentraciones de constituyentes peligrosos (Corbit, 1991).

4.1.2 Extracción

Este método se basa en el uso de sustancias orgánicas no polares para separar tóxicos no polares o agua para sustancias peligrosas de carácter polar. Se obtienen tres fases: la orgánica, la acuosa y la sólida. El residuo a tratar requiere un pretratamiento antes de adicionar el disolvente para que puedan manejarse los lodos con bombas. Se requiere de condiciones alcalinas ($\text{pH} = 10$) para que los disolventes no se oxiden. Los disolventes no polares que contienen la (s) sustancia(s) tóxicas se destilan y reciclan mientras que el residuo, que se conoce como fondos de destilado, se tratan térmicamente o se confinan. En el caso de las extracciones acuosas se utiliza un filtro de carbón para separar los orgánicos del agua y, si contiene metales por arriba del límite permisible se precipitan mediante procesos fisicoquímicos. Los sólidos se analizan para determinar si se necesitan ser estabilizados antes de enviarse al confinamiento (Fernández, 1994)

4.1.3 Precipitación química

La precipitación química es un proceso mediante el cual una sustancia soluble se convierte en insoluble, ya sea por una reacción o por cambios en la composición del disolvente. Este método es muy popular ya que desde hace mucho tiempo se usa para reducir la dureza del agua mediante la remoción del calcio y del magnesio. En el tratamiento de residuos peligrosos el proceso tiene una gran aceptación para eliminar metales tóxicos de residuos peligrosos que pueden convertirse en insolubles como: arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, selenio, plata, talio y zinc (Fernández, *ibidem*).

La precipitación mediante una reacción se basa en la adición de sustancias que precipitan a los tóxicos (por ejemplo, metales) que contiene un residuo (generalmente acuoso). El proceso se lleva a cabo en un tanque de reacción con agitación. Los reactivos forman especies insolubles con los tóxicos o aumentan la concentración de los iones por arriba del producto de solubilidad de los mismos o cambian su estado de oxidación.

Al disminuir la solubilidad de los componentes tóxicos, por las reacciones químicas y las condiciones en que se encuentran (pH y pE), se forman sólidos suspendidos que son separados por sedimentación. Para mejorar esta operación se agrega un coagulante químico como alumbre $[Al_2(SO_4)_3]$, cloruro férrico $(FeCl_3)$, sulfato férrico $[(Fe_2(SO_4)_3)]$ y algunos polímeros. Los sólidos precipitados pueden separarse por sedimentación y/o filtración (Fernández, *op. cit.*).

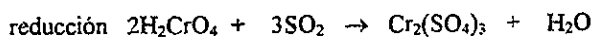
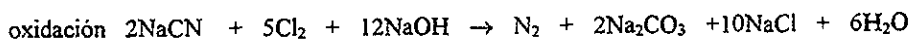
4.1.4 Neutralización

La neutralización química es simplemente la mezcla de un ácido con una base en solución acuosa*. En un sentido estricto, la neutralización se logra cuando el pH es = 7, es decir, cuando las concentraciones de iones hidrógeno e hidroxilo son iguales.

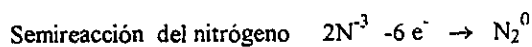
La neutralización se aplica ampliamente para el tratamiento de residuos acuosos que contienen ácidos o bases fuertes. Especialmente, se utiliza para el tratamiento de aguas residuales, pues frecuentemente son alcalinas o ácidas. Este proceso, además de su eficiencia presenta otras virtudes como un bajo costo, fácil manejo y la posibilidad de aplicarse a compuestos orgánicos, como fenoles ácidos (Fernández, *ibidem*)

4.1.5 Óxido-reducción

Este tratamiento se basa en reacciones conocidas como de óxido-reducción que consisten en el aumento de estado de oxidación de un reactante (pérdida de electrones) y la disminución del estado de oxidación de otro (ganancia de electrones). Por ejemplo:



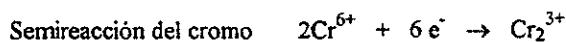
En la reacción de oxidación, el estado de oxidación del nitrógeno de -3 a 0 y el del carbono de 2^- a 4^+ , mientras que el cloro pasa de 0 a 1^- .



*La acidez y la alcalinidad se definen con respecto al pH, donde $pH = -\log[H^+]$, a temperatura ambiente.

Debido a este cambio el ión cianuro se transforma en nitrógeno y carbonato de sodio perdiendo su toxicidad que se debe a su capacidad de coordinarse con el hierro de la sangre.

En la segunda reacción de reducción el cromo de redujo de 6^+ a 3^+ y el estado de oxidación del azufre aumento de 4^+ a 6^+ , lo que permite disminuir la toxicidad del cromo, limitar su solubilidad y convertirse en un residuos manejable (Corbit, 1991).



Los procesos de óxido reducción son ampliamente usados, ya que es un tecnología bien establecida y fácil de instrumentar y controlar. Se ha aplicado con éxito en residuos que contengan metales, sulfuros, cianuros y cromo, así como en el tratamiento de algunos compuestos orgánicos como fenoles y plaguicidas (Corbit, *op. cit.*). Sin embargo, algunos oxidantes como hidruros y peróxido de hidrogeno ha sido mal empleados en el tratamientos de suelos contaminados.

4.1.6 Solidificación/estabilización y encapsulamiento

Todos los términos utilizados en la literatura como: estabilización, solidificación, fijación, etc. se refieren básicamente al concepto de atrapar, inmovilizar, confinar, encapsular al contaminante en una matriz sólida que debe poseer buenas características de estabilidad dimensional, de resistencia a los ciclos de congelación-descongelación, de permeabilidad, de tolerancia a las tensiones y de resistencia a la acción de los agentes biológicos, para que los residuos puedan ser manejados como residuos no peligrosos. Generalmente la matriz es un polímero o en una red cristalina estable (Becerril, 1993).

No obstante, como en los casos de muchos de los términos utilizados en la bibliografía de residuos peligrosos, no existe una concordancia entre los diversos textos. Algunos autores como Freeman (1989) se refieren a la "estabilización" como una técnica concebida para inmovilizar a las sustancias peligrosas o a transformaciones químicas que modifican a la sustancia en otra, que no es peligrosa y generalmente es sólida e insoluble.

Asimismo, en Corbit (1991) acotan el término solidificación a aquellas técnicas que cambian las características físicas del residuo para producir una estructura sólida que atrapa mecánicamente los contaminantes; o se refieren a la solidificación como un proceso de tratamiento que produce un sólido monolítico, o una masa terrosa, a partir de un residuo líquido y genera un producto con mejores características físicas e integridad estructural.

Los procesos de estabilización/solidificación se clasifican, de acuerdo al aditivo principal que se añade al residuo, de la siguiente manera (Corbit, *op. cit.*):

- Técnicas con cemento como base (Portland)

- Técnicas con cal como base (Pozzolanic)
- Proceso termoplástico
- Técnicas a base de polímeros orgánicos.

Cemento (Portland)

En esta técnica los residuos se mezclan con cemento, agua y se ajusta el pH con algún ácido. Los residuos que se pueden tratar son: metales pesados (como Cu, Cr, Ni, Pb, Zn) y los sólidos orgánicos (plásticos y resinas).

Las ventajas de este proceso son los bajos costos, la sencillez, puede realizarse *in situ* y que genera un sólido de alta resistencia. Las desventajas, en cambio son que puede estar sujeto a lixiviado y pueden existir interferencias entre compuestos como los boratos y los sulfatos.

Cal (Pozzolanic)

Este método consiste en mezclar los residuos con cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y silicatos para formar un sólido. Así se pueden tratar las cenizas y las escorias provenientes de hornos, el polvo de hornos de cemento y los metales pesados como Pb, As, Zn.

Es un proceso barato y relativamente sencillo, aconsejable para residuos (cenizas) de las plantas de energía eléctrica. Los problemas que presenta es el aumento del volumen del residuo y que depende de la formación de compuestos como silicatos de calcio e hidratos de aluminio

Polímero orgánico

Consiste en mezclar el residuo con un polímero (urea formaldehído o éster estireno de vinilo) y un catalizador que provoca la solidificación a través de la formación de una matriz de tipo esponja. Los residuos que se pueden tratar con este proceso son halogenuros, sulfatos, residuos ácidos y materiales radioactivos

Algunas desventajas de este proceso son que los contaminantes no se encuentran químicamente unidos, requiere de equipo especializado, algunas resinas se descomponen con el tiempo, algunos catalizadores son corrosivos, no es aplicable a compuestos orgánicos como: plásticos, aceites y solventes.

Termoplástico

Mediante este método, el residuo es secado, calentado y fijado en un matriz plástica de un material (asfaltos, polietileno o parafinas). Sirve para tratar metales pesados (Pb, Cd, Cu, Ni, As) y es aconsejable para materiales radiactivos

Entre las ventajas que presenta se encuentra que no incrementa su volumen, como en los procesos de cal y cemento, y produce un material de muy baja lixiviación. Entre las desventajas destaca la alta inversión de equipos, los elevados costos de energía y que no es aplicable a solventes, grasas, sales etc.

Las ventajas de estas técnicas, principalmente, se relacionan con la disminución de la superficie activa del material, que produce una menor solubilidad y movilidad de los tóxicos; y, como consecuencia final, se genera una menor lixiviación del residuo cuando se sujeta a pruebas de peligrosidad. Además, las técnicas permiten que el material sea fácilmente manejado y transportado. y reducen la posibilidad de contaminación de agua subterránea y superficial.

Otras ventajas son (Becerril, 1993):

- Pueden disminuir la toxicidad del contaminante
- Cuando se utiliza el cemento y pozzolanic el costo es bajo
- El intervalo de aplicación de estas técnicas es muy amplio
- Son aplicable a residuos radioactivos de bajo nivel

Entre las desventajas, se encuentra que:

- Cuando se utiliza cemento o pozzolanic, el proceso no siempre es eficaz, por lo que el tóxico puede no quedar unido íntimamente a la matriz, aumentando el riesgo de lixiviación y contaminación del ambiente
- No son aplicables para el manejo de muchos residuos orgánicos
- Las técnicas que utilizan polímeros o aditivos del tipo termoplásticos requieren de equipo y personal especializado, por lo que su costo es alto.

4.2 Biotratamientos de residuos peligrosos

El tratamiento biológico tiene por objeto reducir los compuestos orgánicos biodegradables presentes en materiales contaminados, como agua residual y desechos sólidos, en sustancias inorgánicas y material celular. Éste contiene nutrimentos, como carbono, nitrógeno, minerales, etc. que se integran a los ciclos naturales (Becerril, *op. cit.*). De acuerdo a las características de los procesos de biodegradación, este tipo de tratamiento, generalmente, se aplica a desechos municipales, aguas domésticas y aguas industriales que presentan una concentración límite de sustancias tóxicas.

Los organismos más importantes en este tipo de procesos son las bacterias, los hongos y los protozoarios. Estos microorganismos son capaces de degradar muchos compuestos bajo condiciones diferentes. Una población mixta de bacterias, hongos y protozoarios puede modificar o transformar muchos compuestos (Fuller, 1985).

Aunque muchos compuestos industriales se consideran resistentes al ataque microbiano por su estabilidad química o toxicidad, se han encontrado en áreas contaminadas diferentes organismos capaces de degradar este tipo de sustancias

Por lo tanto, se están llevando a cabo investigaciones para tratar residuos líquidos industriales y suelos contaminados, mediante la acción de este tipo microorganismos

adaptados; aunque el factor limitante para establecer procesos comerciales, generalmente, es la velocidad de la reacción.

A continuación se presentan una breve descripción de algunos de los procesos comúnmente utilizados para el tratamiento de residuos.

4.2.1 Tratamientos aeróbios

En estos procesos, las bacterias, hongos y otros microorganismos proveen de la energía necesaria para la biodegradación del desecho orgánico. Estos organismos utilizan oxígeno molecular para llevar a cabo las reacciones de oxidación de la fracción orgánica del residuo (Manahan, 1991).

Lodos activados

El proceso aerobio más conocido es el denominado "Lodos Activados", el cual generalmente se utiliza para tratar las aguas residuales municipales. Durante el tratamiento, colonias de microorganismos suspendidos y dispersos en grupos llamados floculos reaccionan con la materia orgánica. El oxígeno necesario se obtiene del aire mediante agitación mecánica (Tchobanoglous, 1993).

Este proceso ha sido modificado y adaptado para tratar lixiviados de rellenos sanitarios o de confinamientos de residuos peligrosos. Para este tipo de sustrato, se requiere desarrollar comunidades de bacterias adaptadas capaces de degradar compuestos orgánicos de baja biodegradabilidad y con cierta tolerancia a compuestos o elementos inorgánicos tóxicos. Por las dificultades que presenta el crecimiento de microorganismos resistentes, este tipo de proceso ha ido modificándose para aumentar la eficiencia de la biodegradación. Por ejemplo, se puede complementar el sistema con un alimentador continuo de carbón activado, el cual adsorbe compuestos orgánicos que no pueden ser degradados por los microorganismos (Freeman. *op. cit.*). La tecnología de este tipo más conocida es la llamada "PACT" (Powdered Activated-Carbon Treatment Process).

Composteo

El composteo es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales a un materia húmico estable (Tchobanoglous, *op. cit.*). La degradación de los residuos orgánicos es incompleta y los procesos microbianos pueden variar de anaerobio a aerobio o viceversa (Fabela, 1996). El material obtenido se conoce como composta, término del cual procede el nombre de la tecnología.

El composteo ha sido aplicado con éxito a materiales biodegradables como los desechos sólidos municipales desechos de jardín y lodos de plantas de tratamiento biológico de aguas residuales, que no contenían sales ni sustancias orgánicas o inorgánicas tóxicas. Sin embargo, en los últimos años este proceso se adaptado para ser utilizado en la degradación de ciertos desechos tóxicos como plaguicidas (malatión, páration, DDT, etc.), compuestos

orgánicos mercurados (acetato de fenilmercurico) y suelos contaminados (Freeman, *op. cit.*). Sin embargo, el éxito de estos sistemas está en discusión, ya que el tiempo de recuperación puede ser muy largo dependiendo de las concentraciones de las sustancias tóxicas, factores climáticos, etc.

Los métodos que principalmente se aplican a residuos peligrosos son el denominado Pila Estática Aireada y Bioreactor. El primero consiste en un red de tuberías de escape o aireación, sobre el cual se colocan los residuos y se cubre con un capa de composta para tener un adecuado control de temperatura y humedad. Una vez construida la pila se inyecta aire. La duración del tratamiento es de 3 a 4 semanas, dependiendo de la dimensión de la pila y el tipo de residuo y otros factores como la temperatura ambiente, humedad, pH, etc. Como muchos tóxicos orgánicos son muy volátiles es importante comprobar que los contaminantes no pasan a la atmósfera sin degradarse.

El bioreactor consiste en un recipiente cerrado, el cual puede tener un geometría cilíndrica o rectangular. En este método se introducen el residuo previamente triturado y se inyecta aire. De acuerdo al diseño del bioreactor puede ser dividido en dos tipos: "Flujo pistón" y "Lecho agitado". En el primero se introduce una cantidad fija de aire por lo que la relación entre las partículas del residuo y la cantidad de aire (oxígeno) es constante; mientras que en el segundo, el residuo se agita mecánicamente durante todo el proceso, por lo que la alimentación de aire es continua. Los tiempos de retención reportados para los bioreactores es de 4 a 12 semanas (Tchobanoglous, *op. cit.*).

4.2.1 Tratamientos anaeróbios

En estos procesos, los microorganismos transforman los residuos a compuestos simples como el dióxido de carbono, metano (CH_4) y ácido sulfhídrico (H_2S), en ausencia de oxígeno, y se puede aplicar a residuos orgánicos con altos valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) algunos de los cuales están clasificados como peligrosos (Manahan, 1991).

Reactores de lecho fijo. Consiste en un reactor empacado con material inerte, el cual tiene una gran área de contacto donde se forma y crece una biopelícula. El reactor es alimentado con una corriente, la cual puede tener una dirección ascendente o descendente. Este tipo de tratamiento, puede manejar cargas orgánicas de 10 a 20 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2/\text{dia})$, con una remoción de 80 al 95% de eficiencia y además este proceso tiene la capacidad de amortiguar cambios súbitos en la alimentación, es decir soportan cambios drásticos en la concentración del sustrato orgánico, e incluso de sustancias inorgánicas con alta toxicidad, sin disminuir considerablemente su eficiencia (Freeman, *op. cit.*).

Reactor de lecho fluidizado. En este tratamiento todos los microorganismos se encuentran inmovilizadas en una biopelícula, la cual se encuentra adherida sobre un soporte sólido e inerte como la arena o granito, los cuales poseen una gran área superficial. El reactor es alimentado con velocidades hidráulica capaces de suministrar un flujo continuo y mantener

en movimiento las partículas en todo el reactor sin que abandonen el reactor. El proceso tiene la capacidad de manejar cargas orgánicas de más de 15 kg./m³ /día. (Freeman *op. cit.*)

Reactor de anaerobio con manto de lodos y flujo ascendente (UASB). La principal característica de los reactores UASB es su capacidad para favorecer el desarrollo de un lodo granular con alta actividad específica y excelentes propiedades de sedimentación, que conforman un excelente medio para el desarrollo de las bacterias anaerobias. La alimentación del reactor se realiza a través del fondo y el flujo atraviesa el lecho granular de lodos en forma ascendente. Este tratamiento tiene la capacidad de manejar cargas orgánicas de hasta 30 kg. DQO/ m³-d., logrando una biodegradación del 95%, en tiempos cortos de retención hidráulica de hasta 24 horas (Noyola, 1991).

Reactores de dos etapas. En una primera etapa se realiza la hidrólisis de los compuestos orgánicos o su fermentación. Los productos catabólicos alimentan a los organismos en un segundo tanque, donde se realiza una eficiente metanogénesis. Especialmente, esta tecnología se aplica cuando el desecho contiene sustancias tóxicas para la metanogénesis, pues durante la biotransformación realizada en el primer reactor, estas sustancias se transforman en productos que sí se pueden ser degradados en el segundo reactor.

4.2.2 Limitaciones de los biotratamientos

Grado de biodegradabilidad

Este factor depende de la naturaleza química del desecho a tratar, así como del proceso y los microorganismos que se utilicen. Un desecho no es degradado sino cuando se logra desarrollar un grupo de microorganismos capaz de descomponer los compuestos presentes en el residuo.

Variaciones de carga

Los tratamientos aerobios, como por ejemplo el de Lodos Activados, en general son sensibles a variaciones bruscas de la carga orgánica, pues concentraciones extremas de la misma puede inhibir el crecimiento de los microorganismos que degradan los desechos. En cambio los tratamientos anaerobios como el reactor UASB amortiguan con mayor eficiencia los cambios bruscos de concentración de materia orgánica, manteniendo la población microbiana relativamente constante.

Requerimientos de nutrimentos

El nitrógeno y el fósforo son nutrimentos determinantes para el funcionamiento de estos sistemas. Es común que si uno de los dos no se encuentra en las cantidades necesarias, se agreguen al sistema biológico para evitar que se pierda la eficiencia y/o disminuya la velocidad de degradación.

Además, para que estos nutrimentos puedan ser utilizados por los microorganismos deben estar en formas solubles (inorgánicas), por lo que si provienen de sustancias orgánicas, éstas deben ser previamente hidrolizadas

Oxígeno

Los procesos aerobios requieren de un abastecimiento continuo de oxígeno. En general, es suministrado por algún sistema mecánico mediante la aireación del medio, aunque actualmente hay muchos sistemas que utilizan oxígeno puro. Si la aireación es ineficiente se provoca condiciones de anaerobismo causando una degradación incompleta del desecho y malos olores.

Como los sistemas anaeróbicos no requieren oxígeno, su presencia provoca una disminución en la eficiencia de los mismos, ya que disminuye la población de microorganismos que forman la biopelícula.

pH

El intervalo adecuado para el desarrollo de los microorganismos es de 6 a 8, por lo que es necesario un estricto control de este parámetro. Actualmente existen sistemas comerciales de tipo convencional para controlar el pH.

Temperatura

Generalmente, los microorganismos son sensibles a cambios bruscos de temperatura por lo que para no limitar su desarrollo es necesario mantener la temperatura en el intervalo óptimo del tipo de microorganismos presentes. Cuando la temperatura no se encuentra dentro de este intervalo el proceso pierde eficiencia o requiere de mayor tiempo para degradar el desecho.

Inorgánicos tóxicos y no tóxicos

A pesar de que se han desarrollado comunidades de microorganismos resistentes a metales potencialmente tóxicos, denominados "pesados" (en concentraciones abajo de un límite máximo); su acumulación, especialmente como precipitados, inhibe la actividad microbiana. En general, se realizan pretratamientos para remover estos contaminantes antes de tratar biológicamente al residuo. Las sales en concentraciones entre 2 y 5% también pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos (Freeman, 1989.).

Orgánicos tóxicos y no tóxicos

Los compuestos orgánicos tóxicos son difíciles de manejar, ya que la remoción selectiva de la toxina activa, en particular por medio de tratamientos químicos o físicos, es muy difícil. Cuando la toxina es biodegradable y se logran aislar organismos que la desactivan, -cultivándolos con éxito en medios enriquecidos que permiten transferirlos y mantenerlos vivos en el material contaminado-, se pueden diseñar sistemas biológicos para mantener la concentración en niveles que no afecten el bioproceso global. Si la toxina no es biodegradable, el único método biológico viable para el tratamiento del residuo consiste en desarrollar microorganismos resistentes a ella pero que actúan sobre los contaminantes biodegradables.

4.3 Incineración

4.3.1 Antecedentes

La incineración es un proceso térmico que mediante altas temperaturas oxida los contaminantes orgánicos. El proceso se lleva a cabo en una cámara cerrada que cuenta con una flama controlada (Brunner, 1995).

"La incineración es una práctica muy antigua para destruir residuos sólidos, realizada en sus inicios con métodos rudimentarios. Las primeras instalaciones para incinerar residuos sólidos urbanos, se ubicó en Europa, en la ciudad de Nottingham, Inglaterra en el año de 1874.

Fue a partir del inicio de este siglo, que los incineradores empezaron a ser utilizados más ampliamente como una forma de control de residuos urbanos. A finales de la segunda década de este siglo operaban en Europa alrededor de 300 instalaciones para la incineración de residuos sólidos municipales; mientras que en los E.U.A., ya existían cerca de 200 plantas operando con regularidad. En los años 50, se inicia la automatización de los incineradores, tornándose en instalaciones más eficientes.

A últimas fechas, los sistemas de incineración se han desarrollado rápidamente, debido principalmente a la crisis mundial de energéticos que se presentó en la década de los 70 que obligó a buscar combustibles alternos a los derivados del petróleo; aprovechando la energía (calor) que se libera en la incineración de los residuos sólidos. Los sistemas de incineración alcanzaron un mayor desarrollo en aquellos países que carecen de petróleo y de espacio para ubicar confinamientos. Durante los últimos 20 años, una cantidad importante de países industrializados han fortalecido sus programas de incineración, privilegiando sobremanera, aquellos que consideran la recuperación de energía" (Semarnap-INE, 1995-a).

Durante la incineración se convierte la energía química en calor (alta entropía), formando teóricamente dióxido de carbono el cual se acumula en la atmósfera, y parcialmente se disuelve en el agua de mar o puede ser transformado a azúcar por la vegetación. Para que una cantidad importante de dióxido de carbono se pudiera convertir en carbohidratos se requeriría de un aumento drástico de la cubierta vegetal en el mundo. En la práctica, además de dióxido de carbono se forman otras sustancias gaseosas como NO_x, SO_x y otros gases de alta estabilidad como dioxinas y furanos. Además, se obtienen cenizas que contienen entre otros compuestos óxidos de metales, entre ellos, los potencialmente tóxicos. El tipo de compuesto formado, su cantidad y el control de emisiones depende de las características del incinerador y del control del proceso.

El Cuadro 4.1, muestra la situación actual de la incineración en el mundo.

Cuadro 4.1 Situación actual de la incineración en el mundo

País	Población (millones de habitantes.)	Número de plantas de tratamiento térmico	Cantidad tratada en miles de ton/año	Parte de residuos peligrosos	Recuperación de energía en plantas
Suecia	8.6	2.3	1.8	45	100% 5 Twh calefacción
Dinamarca	5.2	38	1.7	35	100% La mayoría para calefacción
Alemania	61.2	47	9.2	70	La mayor parte
Holanda	14.9	12	2.8	60	50% de las plantas
Francia	55.8	170	7.6	58	65 de cap.
España	39.8	22	0.7	94	5 plantas
Italia	57.6	94	2.7	82	30% de cap.
Inglaterra	10.6	1	1.3	92	Pocas plantas
Hungría	10.6	1	0.3	91	No
E.U.A.	248.3	168	32	28	128 Plantas
Japón	123.2	1,893	32	28	Pocas plantas
Canadá	23.1	17	1.7	-	-
*México	80	2	-	0.25	No

Fuente: International Solid Association, 1992; *Dirección General de Normatividad Ambiental, Instituto Nacional de Ecología 1996

4.3.2 Aspectos teóricos

De acuerdo con Librizzi (1989), para llevar una incineración eficiente se deben controlar con los siguientes parámetros:

Temperatura de operación de la combustión

Este factor, se refiere al intervalo de temperatura que se utiliza para destruir² los residuos. Esta variable depende entre otras de la clase de incinerador, composición química del residuo, estado físico y la regulación legal a la cual se encuentre sujeta el desecho a destruir. Brunner (1995) reporta temperaturas de hasta 1539 °C en hornos de inyección líquida.

Tiempo de residencia

El tiempo de residencia en los incineradores, depende del volumen de la cámara de combustión del incinerador y de la relación de flujo de aire-residuo. El tiempo de residencia se encuentra directamente relacionado con la temperatura, ya que a mayor temperatura los

² El término "destrucción" se refiere únicamente al cambio de la naturaleza del tipo de compuesto presente y sus propiedades, ya que la materia no se crea ni se destruye sino se transforma

tiempos de residencia son menores. Los datos publicados indican diferencias notables en los tiempos de residencia, por ejemplo Librizzi (1989) reporta valores de horas para la incineración de residuos sólidos en hornos rotatorios, mientras que para un incinerador de inyección líquida se recomiendan lapsos de 0.5 a 2.0 segundos.

Alimentación de aire (oxígeno)

La combustión es un proceso de oxidación por lo que requiere de oxígeno. Generalmente, se alimenta el sistema con aire. Se puede llevar a cabo una combustión estequiométrica (reacción en la cual las cantidades de oxígeno y el residuo son equivalentes), pero en la práctica, no es posible lograr un control de proceso tan preciso que permita trabajar con una cantidad límite de oxígeno por lo que, en general, se adiciona un exceso.

Además, de los parámetros nombrados hay otros factores que deben tomarse en cuenta como son:

- Composición de los residuos
- Cuantificación del combustible principal y auxiliar
- Energía transferida en el sistema de combustión
- Transferencia de calor durante el proceso y distribución del calor en el sistema
- Composición química de los efluentes
- Selección y tratamiento para los efluentes gaseosos y sólidos
- Sistemas de control y monitoreo
- Destino final de los efluentes

Etapas del proceso de incineración

De acuerdo con Funck (1995), las etapas de un proceso de combustión de residuos sólidos, son las siguientes:

alimentación	una vez seleccionados, los residuos se alimentan manual o automáticamente a la cámara de combustión
secado	se aumenta la temperatura del sistema para eliminar el agua presente en los residuos
desgasificación	en condiciones de baja concentración de oxígeno, las partículas sólidas de residuo pasan a la fase gaseosa
gasificación	reacción de los compuestos de carbono presentes en la superficie de las partículas sólidas del residuo, con el oxígeno que contiene la atmósfera local, para formar CO/CO ₂ en diferentes proporciones.
Combustión	los productos de las etapas de desgasificación y gasificación se oxidan mediante una reacción exotérmica con aire inyectado
inertización	las cenizas son enfriadas, recolectadas y removidas del incinerador para tratarlas, estabilizarlas y confinarlas

Otros autores como Freeman (1989) y Brunner (1995), también consideran una etapa más del proceso el tratamiento de gases. Consiste en el enfriamiento de los mismos, filtración y lavado para que las emisiones a la atmósfera cumplan con los límites permisibles de concentración de partículas y gases tóxicos.

4.3.3 Efluentes

Durante el proceso de incineración se generan dos corrientes de efluentes: gases y cenizas. La composición química de estos efluentes, depende, entre otros factores, del tipo de residuo y de la calidad del equipo de control de gases.

La legislación de los E.U.A (C.F.R., 1992), establece que cuando se incineran residuos peligrosos en hornos y calderas industriales, se deben analizar y cuantificarlos siguientes parámetros a los gases de salida: Cr total, Cd, As, Ni, Mg, Be, Cu, Zn, Se, P, Tl, Pb, Sb, Ag, Hg, Ba, CO, CO₂, además de hidrocarburos, material particulado, SO₂, NO_x, HCl/Cl₂, dioxinas y furanos. Sin embargo, dependiendo de la composición del residuo puede dejarse de evaluar algunos de los parámetros.

En México, el anteproyecto NOM-CRP-ECOL-1995, regula las instalaciones destinadas al tratamiento térmico de materiales y residuos, provenientes de cualquier actividad y sus emisiones al ambiente. Este proyecto de norma indica en su capítulo XII, punto 12.3 “los parámetros que establezca la autoridad como indicadores de una operación controlada debiendo por lo menos contar con monitoreo continuo de CO, O₂, HCl...” y en el punto 12.3.2. señala que “los parámetros que no se midan permanentemente deberán medirse semestralmente tales como metales pesados, PST, SO₂, NO_x y anualmente dibenzodibenzodioxinas y dibenzofuranos.” En lo que respecta a las cenizas, señala que como presentan una composición química de carácter inorgánico (sales y metales pesados) se deben tratar (estabilización termodinámica) y, posteriormente, enviarse a confinamiento.

El cuadro 4.2, presenta un resumen de las concentraciones de los principales contaminantes generados durante el proceso de incineración en algunos países que utilizan este tratamiento.

Cuadro 4.2 Contaminantes en las emisiones de la incineración

Contaminantes (mg/m ³)	Alemania 1986	Alemania 1989	C.E.E. 1989	Holanda 1989	Francia 1986	Suecia 1986
CO	100	50	100	50	0.1%	100
Polvos	30	10	30	5	50	20
SO ₂	100	50	300	40	-	-
NO ₂	500	100	-	70	-	-
HCl	50	10	50	10	100	100
HF	2	1	2	1	-	-
C/C _x H _y	20	10	20	10	10 ppm	-

Fuente: Kreiner, 1994.

Continúa Cuadro 4.2

Contaminantes (mg/m ³)	Alemania 1986	Alemania 1989	C.E.E. 1989	Holanda 1989	Francia 1986	Suecia 1986
Compuestos inorgánicos:						
Clase 1 (Cd, Hg)	0.2	0.1(Cd)	0.2	0.005	0.3	0.08 (Hg)
Clase 2	1.0	1.0(Sb, As, Pb, Co, Cr, Cu, Mn, Sn)	1.0 (Ni, As)	1.0	1.0 (As)	-
Clase 3	5.0	-	5.0	1.0	5.0	-
Dioxinas		0.1	-	0.1	-	-
Muestra promedio	día	día	mes	hora	-	mes
Relacionado a:	11% O ₂	11 % O ₂	11% O ₂ , 9% O ₂	11 % O ₂	7 % CO ₂	10 %CO ₂

Fuente: Kreiner, 1994.

4.3.4 Tipos de incineradores

Existen diferentes clases de incineradores que se clasifican en función del diseño de la cámara de combustión, la cual se considera el corazón del proceso. A continuación se hace una breve descripción de cada una:

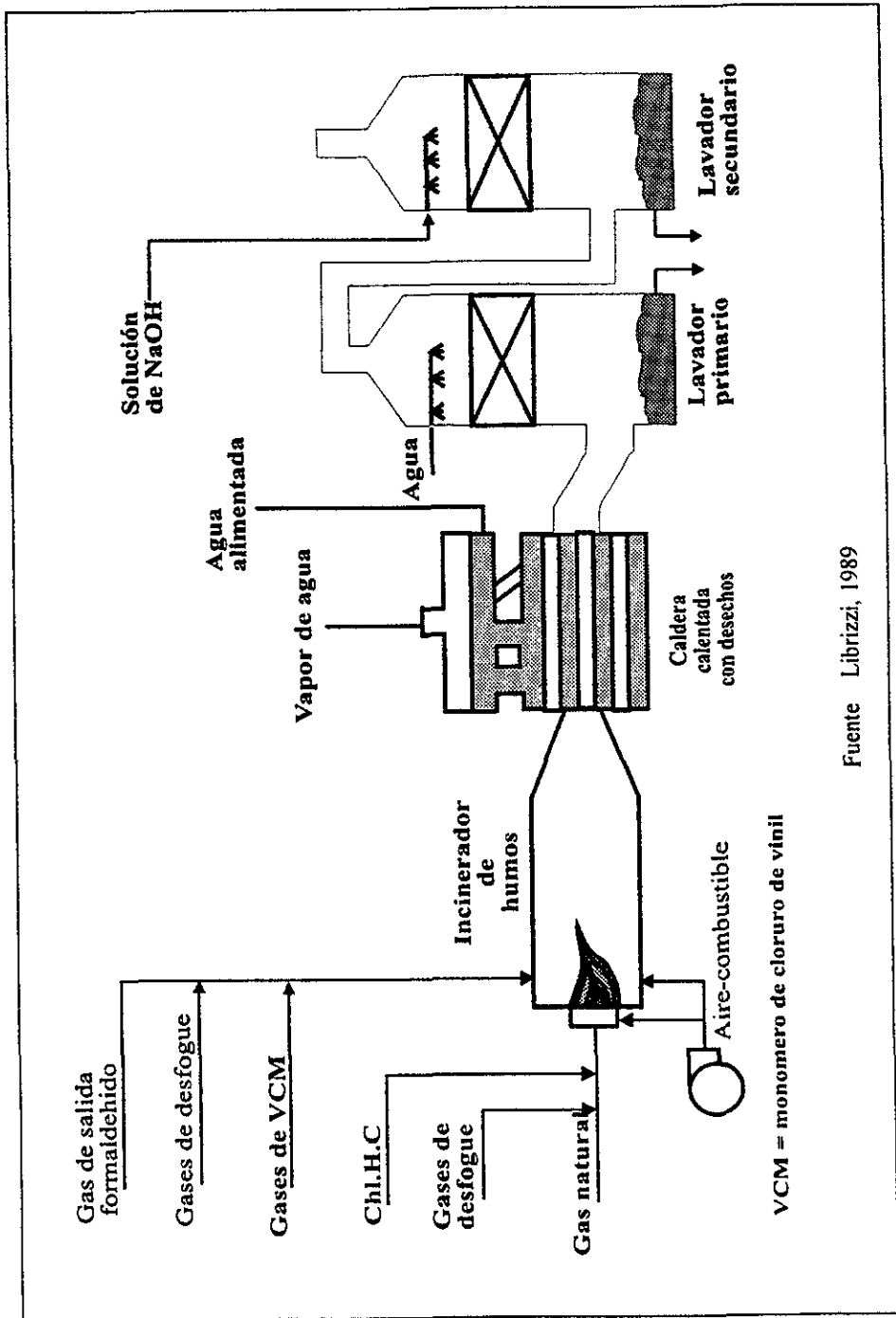
Incinerador de inyección líquida

Este tipo de incinerador (Figura 4.1) es usado para tratar residuos líquidos que pueden ser transportado utilizando bombas, o gases residuales. Los residuos son líquidos orgánicos, acuosos, acuoso-orgánicos o acuoso-orgánico-sólidos. Los residuos sólidos usualmente son disueltos en disolventes orgánicos o cuando es posible con otros residuos líquidos.

Como se manejan residuos líquidos el diseño de estos incineradores se basa en el de una caldera. Están equipados de un cilindro simple que puede ser vertical u horizontal. Los residuos son inyectados a través de un atomizador y la eficiencia del incinerador depende del grado de atomización del residuo al entrar en la cámara de combustión. La flama alcanza temperaturas de hasta 1539 °C (2,900 °F) y el tiempo de retención de los residuos es de uno a dos segundos.

En la actualidad el 64 % de todos los incineradores de residuos peligrosos que se encuentran en servicio son de este tipo.

Figura 4.1 Diagrama de un incinerador de inyección líquida



Fuente Librizzi, 1989

Incinerador de lecho fluidizado

Aunque este tipo de equipo se conoce desde hace tiempo, sólo recientemente se han utilizado para quemar residuos peligrosos. Consta de un cilindro vertical que puede ser de 13.7 metros (45 pies) de alto y un lecho de arena lumínica o carbonato de calcio que se mezcla con el residuo por medio de aire (Figura 4.2). Los residuos, en forma líquida o de lodo, se mezclan con el lecho a temperaturas entre 871 °C a,600 °F (Librizzi, *op. cit*)

Incinerador de horno rotatorio

Este tipo de incinerador acepta toda clase de residuos. La carga es alimentada dentro de un gran cilindro que puede tener mas de 18.3 metros (60 pies) de longitud. El cilindro gira lentamente y reclina a un ángulo de 5° (Figura 4.3). Los residuos sólidos y líquidos son inyectados o empujados dentro del horno y son quemados hasta convertirlos en cenizas y agua. El horno gira muy lentamente y el tiempo de residencia de los sólidos es de aproximadamente 60 minutos. Los gases de combustión provenientes del horno son enviados a cámaras de combustión secundaria. Estas unidades alcanzan temperaturas de 1,260 °C (2,300 °F) (Brunner, *op. cit*).

Incinerador de hogar múltiple

Este sistema fue originalmente utilizado para tostar rocas y minerales en minas. Posteriormente, se aplicaron para la quema de lodos, pues existía una gran demanda (Brunner, 1995). A partir de la década de los setenta se utilizó para la destrucción de los desperdicios industriales y algunos materiales peligrosos (Figura 4.4). Los equipos actuales son modulares y de pequeño tamaño.

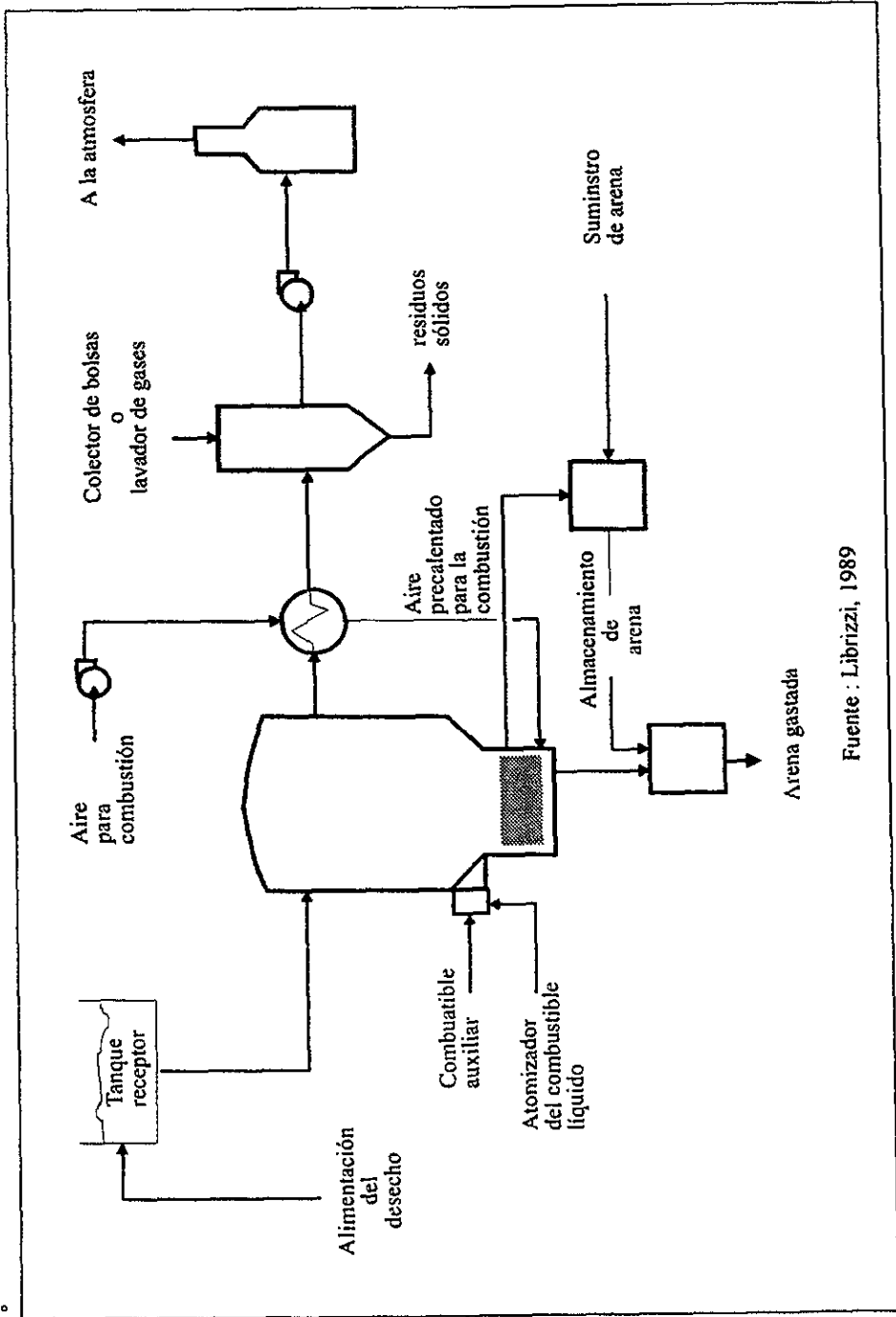
Existe un sistema modificado que se conoce como incinerador de aire controlado el cual es básicamente igual al sistema anteriormente descrito, pero contiene una sección de quemado adicional ubicada en la zona posterior a la sección principal. El objeto de esta modificación fue la de lograr la oxidación de aquellos productos cuya combustión en la primera sección había sido incompleta. (Brunner, *ibidem*)

Hornos cementeros

Desde hace más de 15 años, en E.U.A y Europa usan hornos cementeros para la recuperación de energía de los residuos industriales y de las llantas desechadas, utilizándolos como combustibles alternos (Villaseñor, 1994)

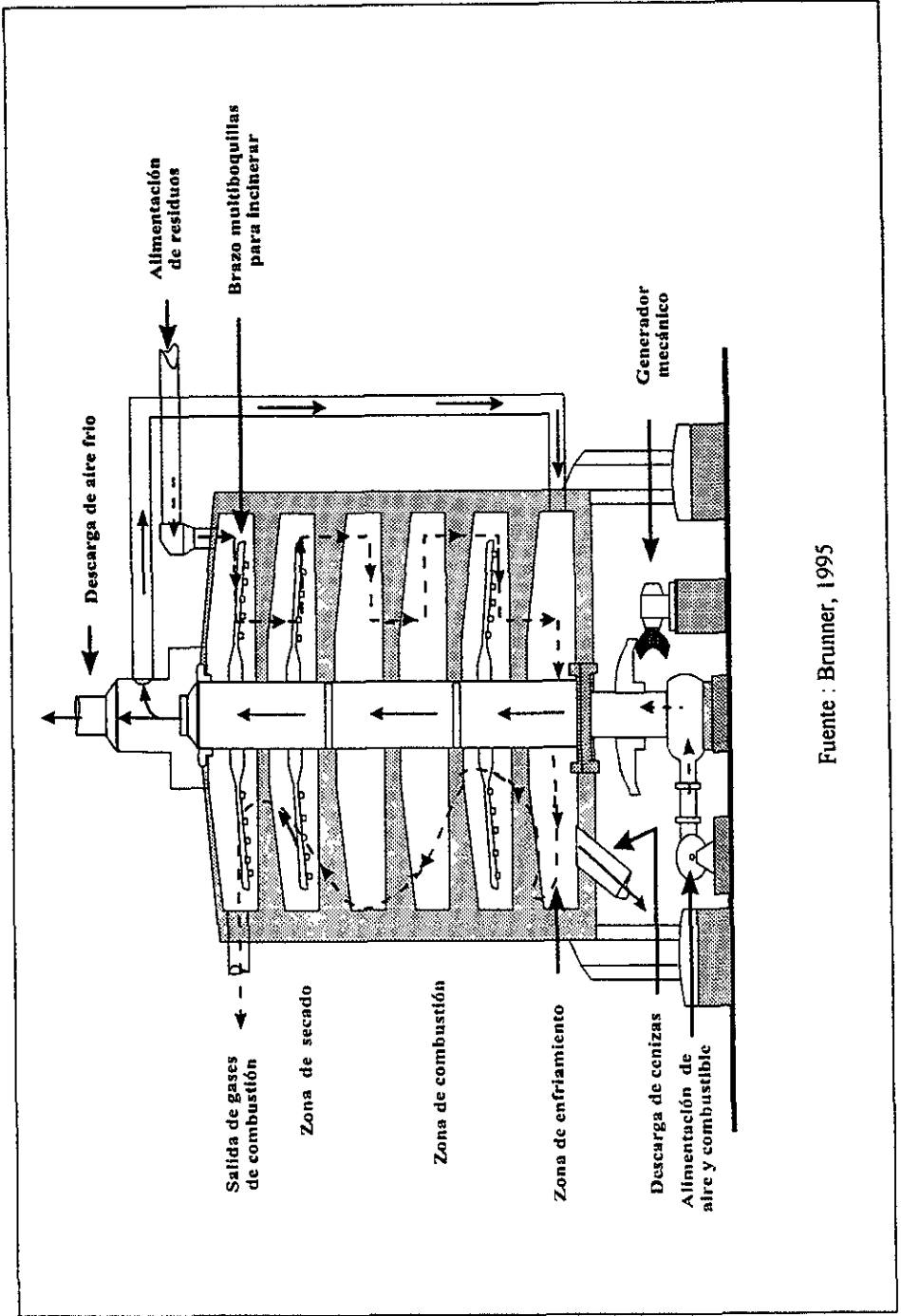
Algunos autores consideran la incineración de residuos peligrosos en hornos cementeros, como una caso particular de reducción y recuperación de energía (García, 1996). Freeman (1989) plantea que los hornos cementeros, conforman uno de los procesos más eficientes para la destrucción de algunos residuos industriales peligrosos.

Figura 4.2 Diagrama de un incinerador de lecho fluidizado



Fuente : Librizzi, 1989

Figura 4.4 Diagrama de un incinerador de hogar múltiple



Fuente : Brunner, 1995

Los compuestos que pueden incinerarse en este tipo de horno y que ayudan a la economía de las empresas cementeras ya que sustituyen a los combustibles tradicionales, son:

- Aceites y grasas usados
- Desperdicios plásticos
- Lodos orgánicos
- Disolventes gastados
- Adhesivos
- Resinas
- Otros líquidos.

En el Cuadro 4.3 se consignan cifras del consumo anual de combustibles alternos, provenientes de residuos industriales en hornos cementeros.

Cuadro 4.3 Uso de residuos industriales en hornos cementeros

País	miles toneladas
E.U.A	1,200
España	34
Francia	240
Japón	125
Suiza	82
Reino Unido	50
Alemania	150
Noruega	35

Fuente: Villaseñor, 1994

En México, se utilizan algunos residuos orgánicos sólidos y líquidos como combustibles alternos en los hornos cementeros. Se considera que hasta el momento esta industria representa la mejor infraestructura y la opción con mayor "capacidad técnica" para recuperar la energía de una parte de los residuos generados en el país. De acuerdo con Villaseñor (1994), el México el 11 % de los residuos peligrosos, contienen un poder calorífico significativo, lo que equivale 880,000 toneladas de estas sustancias, que son potencialmente un combustible auxiliar, a sus requerimientos de energía. Adicionalmente, cada año se desechan en nuestro país más de 17 millones de llantas usadas, las cuales se pueden aprovechar en la producción de cemento (Villaseñor, *op. cit.*)

El cuadro 4.4 resume las ventajas y desventajas de utilizar como combustibles alternos en los hornos cementeros, algunos residuos peligrosos.

Cuadro 4.4 Ventajas y desventajas del uso de residuos peligrosos como combustibles alternos

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Destruye los residuos orgánicos con eficiencias de superiores al de 99.998 % • Neutraliza y retiene azufre y cloro • Integra y fija metales pesados • Es un alternativa económicamente atractiva para el manejo de parte de los residuos peligrosos • Promueve la conservación de recursos no renovables del país 	<ul style="list-style-type: none"> • Existen en el país 35 plantas cementeras de las cuales sólo 6 utilizan combustibles alternos • Requiere de estrictos procedimientos en el manejo y la operación, por lo que cuando se introducen residuos no adecuados se puede impactar al ambiente no existe una legislación para reglamentar este tipo de operaciones.

Fuente: García, 1996.

4.3.5 Ventajas y desventajas de la incineración

Ventajas del proceso de incineración

- Se pueden tratar una gran variedad de residuos líquidos, sólidos y lodos, mezclados y sin mezclar.
- Se pueden alcanzar eficiencias de remoción de hasta 99.999 %.
- Reduce el volumen de los residuos hasta en un 90 %, sobre todo cuando los residuos contienen altas concentraciones de orgánicos
- Puede recuperar calor y algunos gases
- Generalmente se puede cumplir con los requerimientos para disposición final.

Desventajas del proceso de incineración

- Un alto contenido de humedad afecta la eficiencia del sistema y, en consecuencia, el balance energético (consumo de combustibles y generación de energía térmica)
- Cuando las concentraciones de compuestos orgánico halogenados son altas se generan gases ácidos que pueden atacar el material refractario e impactar a la atmósfera.
- Los metales tóxicos (como cadmio, arsénico, mercurio, plomo, estaño y plata) en forma de óxidos, hidróxidos o sales se volatilizan a altas temperaturas durante la incineración y son difíciles de remover usando equipos de control convencionales. Adicionalmente, elementos como el cromo pueden ser oxidados de un estado de oxidación bajo (trivalente) a un estado de oxidación más alto (hexavalente) potencializando su toxicidad para el ambiente y población

Cuadro 4.6 Ejemplos de exposición de poblaciones a confinamientos no controlados de residuos industriales

Período de operación	Sitio	Residuos	Año de estudio	Hallazgo en la población expuesta
1920-1953	Love Canal, New York, E.U.A	Compuestos orgánicos	1978	Bajo peso al nacer y menor desarrollo físico.
1940-1977	New Bedford, Massachusetts, E.U.A.	Bifenilos policlorados	1983	Niveles sanguíneos con BPC
1947-1972	Triana, Alabama, E.U.A.	Plaguicidas	1983	Hipertensión arterial.
1964-1972	Harden County, Tennessee, E.U.A	T.C.C, H.C, P.D., H.D. ³	1978	Lesiones hepáticas transitorias.
1970-1976	Lekkerkerk, Países Bajos	Disolventes orgánicos, metales	1960	Niveles sanguíneos de hidrocarburos aromáticos.

Fuente: Cortinas y Nava, 1993

En la actualidad, si bien está prohibida la disposición en los océanos, mares, lagos y ríos, se sigue utilizando el suelo y subsuelo para "eliminar" los residuos, utilizando métodos y técnicas para minimizar los efectos negativos que puedan causar estos materiales al ambiente. De esta manera, la "disposición final" (acción de depositar permanentemente los residuos) se debe realizar en sitios que dispongan con las condiciones adecuadas para minimizar los riesgos a la biota (Tchobanogluos, *op. cit.*).

Clasificación de métodos de disposición

Los métodos de disposición de residuos peligrosos y no peligrosos en el suelo de acuerdo a Freeman (1989), se clasifican según sus características, en:

- Superficiales
 - 1 - Aplicación en el suelo (*landfarming*)
 - 2.- Confinamientos controlados
 - a) Relleno sanitario.
 - b) Confinamiento para residuos peligrosos.
- Subterráneos
 - 3.- Inyección en pozos profundos.
 - 4.- Minas abandonadas y domos salinos

³Donde: T.C.C = Tetracloruro de carbono; H.C = Hexacloro; P.D = Penatadieno; H.D = Heptadieno

4.4.1 Aplicación en el suelo (*landfarming*)

Este proceso fue desarrollado hace más de 20 años por la industria petrolera y en los últimos años se ha aplicado a ciertos residuos peligrosos que genera las industrias alimentaria y química (Passos, 1991).

El *landfarming* consiste en la incorporación al suelo del *sustrato* orgánico de un residuo, para que los microorganismos que se encuentran en la capa superior del suelo lo degraden (Fuller, 1985). El espesor de la capa donde se deposita el residuo es de 15 a 30 cm, ya que es la zona donde ocurren la mayor parte de los fenómenos físicos y químicos. Las reacciones químicas son catalizadas por microorganismos capaces de degradar compuestos orgánicos. El tipo y cantidad de éstos es variable y depende de condiciones ambientales, no obstante en la mayoría de los suelos se encuentran: actinomicetos, bacterias, hongos y algas. Dependiendo de la disponibilidad de oxígeno los procesos de degradación pueden ser anaerobios o aerobios.

Los mecanismos que ocurren en este proceso son los siguientes :

- **Descomposición:** serie de etapas bioquímicas que transforman el carbono en CO_2 y H_2O y el carbono residual es asimilado por la masa celular microbiana. El suelo debe contener cantidades suficientes de nitrógeno para poder llevar a cabo esta etapa ya que, de lo contrario, será necesario añadirlas.
- **Lixiviado:** producción de un líquido que proviene de los remanentes de los residuos (por ejemplo, metales pesados) que se forma por reacción-arrastre, o *percolación*, y que contiene, disueltos o en suspensión, diversos componentes que se encuentran en el residuo.
- **Volatilización:** proceso inevitable, ya que en la etapa de descomposición se produce biogas (CH_4 y CO_2) y algunos otros compuestos como H_2S .
- **Incorporación al suelo:** asimilación del carbono y otros componentes por la acción microbiana típica del suelo.

Los factores principales que afectan los procesos que ocurren en el *landfarming* son (Passos, *op. cit*):

- **Composición del residuo.** Este factor se refiere, principalmente al tipo y cantidad de residuos orgánicos biodegradables.
- **Porosidad de partícula.** Este factor es determinante para el nivel de oxígeno, la permeabilidad del medio y el contacto de los residuos con los microorganismos.
- **Área de superficie.** El valor de la superficie activa del residuo es muy importante para la degradación del material contaminante, ya que entre menor es el tamaño de las partículas de los residuos, mayor es la zona de contacto con los microorganismos de los suelos
- **Nivel de oxígeno.** Como el proceso es aerobio la presencia de oxígeno determina la velocidad y eficiencia de biodegradación del residuo

- **Temperatura.** Este factor influye directamente en el crecimiento de los microorganismos, que son los que llevan a cabo la biodegradación del residuo y es determinante en la velocidad de las reacciones de oxidación. Existen microorganismos que se desarrollan en intervalos de temperatura de 15 a 35 °C (mesófilos) y otros entre 5 y 15 °C (criófilos).
- **pH.** Al igual que la temperatura, este factor también influye en el crecimiento de los microorganismos. El intervalo de pH entre 7 y 9 se considera adecuado; pues los metales potencialmente tóxicos, sean o no anfóteros, se encuentran en formas insolubles, lo que evita su efecto tóxico sobre los microorganismos y su transporte en la solución.
- **Nutrientes.** Los microorganismos requieren para su crecimiento la presencia de nutrientes en formas solubles y en relaciones de concentración. Cuando el suelo no contiene alguno o varios de los nutrientes, o el residuo altera la proporción de ellos, se pueden adicionar como fertilizantes.
- **Humedad.** Este factor es también importante para la actividad microbiana. Se recomienda un grado de humedad de un 10 al 20 %, dependiendo de la capacidad de retención del suelo.

Para realizar el *landfarming* se lleva a cabo las siguientes operaciones (Passos, 1991).

1. **Preparación de suelos:** a) ajuste de pH de acuerdo a las condiciones originales del suelo, en algunos casos cuando el suelo es ácido se agrega cal en proporción de 2 ton./ha; b) aplicación de nutrientes si se requieren, se recomienda aplicar 3 ton/ha de fertilizante; c) ajuste de la humedad del suelo (10-20 %)
2. **Aplicación del residuo:** Se deposita el material a degradar en una área determinada, cuya medida se selecciona de acuerdo al nivel de degradación potencial del suelo, previamente medido.
3. **Incorporación con suelo:** Se cubre el residuo con una capa de suelo de un espesor de 30 cm, estos puede ser llevado por métodos convencionales usados en la agricultura. Esta etapa es crítica pues involucra el contacto del residuo con el suelo y aire (oxígeno), del cual depende la eficiencia de la degradación aerobia.
4. **Equilibrar el suelo:** Se realiza un mezclado para lograr que las condiciones de temperatura, pH, humedad, nutrientes, etc., sean relativamente homogéneas y permitan mantener el equilibrio bioquímico del suelo y asegurar la biodegradación del residuo.
5. **Monitorear.** Medir periódicamente los parámetros del suelo y los niveles de contaminantes para vigilar la eficacia y eficiencia del proceso de biodegradación. Entre las actividades recomendadas se encuentran:
 - a) Caracterizar el suelo antes y después de la aplicación del residuo.
 - b) Registrar las cantidades y la frecuencia de la incorporación de los residuos.
 - c) Analizar los lixiviados.
 - d) Airear frecuentemente y medir el contenido de microorganismos en el suelo.

También es recomendable determinar el tipo de subsuelo y los posibles mecanismos potenciales de transporte y destino de los contaminantes o lixiviados; verificar la formación de gases como óxidos de nitrógeno, etc. para evitar o disminuir la posible contaminación de las aguas subterráneas y la atmósfera. Asimismo, es necesario controlar que no se está afectando al suelo en si mismo pues se puede reducir su potencialidad de biodegradabilidad.

Se recomienda realizar pruebas piloto en el lugar donde se va aplicar este método de disposición; e instalar pozos de monitoreo en los casos en que exista el riesgo de contaminar un acuífero .

Las ventajas que presenta el *landfarming* son :

- Bajo costo
- Puede enriquecer algunos suelos carentes de materia orgánica y, al mismo tiempo, eliminar los residuos
- Los subproductos de este proceso son compuestos que se incorporan a la naturaleza.

Las desventajas, por otra parte, son las siguientes :

- Se requieren grandes áreas para aplicar este método
- Si se aplica en un lugar inapropiado, puede contaminar los acuíferos subterráneos
- Puede contaminar y destruir el suelo
- Puede promover la contaminación del aire
- Se requieren instalar pozos de monitoreo para evaluar el comportamiento de los constituyentes tóxicos en los acuíferos subterráneos.

4.4.2 Confinamientos controlados

Existen otras formas de disponer los residuos, en instalaciones diseñadas y construidas específicamente para la disposición final de los residuos sólidos municipales, especiales e industriales. Estas instalaciones son conocidas como rellenos sanitarios y confinamiento para residuos peligrosos.

a) Relleno sanitario

Un relleno sanitario es un lugar preparado para depositar residuos sólidos municipales que son materiales generados por cualquier actividad urbana, con excepción de los residuos radioactivos, los generados por la industria y los provenientes de hospitales (EPA-Semarnap, 1995).

Desde el punto de vista ingeniería, un relleno sanitario se describe como "un elemento que, además de cumplir con la disposición permanente y segura de residuos municipales urbanos, puede coexistir con su entorno sin deteriorarlo" (Sedesol-INE, 1994-b).

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1994 establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios para la disposición final de los R.S.M y que a continuación se describen:

- El manto freático deberá encontrarse a una profundidad mayor de 10 metros
- Las zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable deberán encontrarse a una distancia mayor de 1,000 metros, aguas arriba, del sitio escogido
- Las zonas de fracturación deberán ubicarse, como mínimo, a una distancia de 500 metros del sitio y no deberá operar ningún relleno sanitario en la zona fracturada
- El suelo deberá reunir características tanto de impermeabilidad como de remoción de contaminantes
- El sitio deberá contar con suficiente material para la cubierta diaria de los residuos sólidos, para el tiempo que dure la vida útil del relleno sanitario
- Deberá tener una vida útil mínima de siete años
- El sitio deberá estar ubicado a una distancia mayor de 1,000 metros de la zona de inundación, cuerpos de agua y área donde se localizan drenajes naturales
- Deberá estar ubicado a una distancia mayor de 3 km. del área urbana; en un sitio de fácil y rápido acceso por carretera o caminos de terracerías transitables en cualquier época del año; a una distancia mayor de 200 metros de las vías de comunicación terrestre; fuera de áreas naturales protegidas, del área de influencia de aeropuertos, de los derechos de vía de oleoductos o gasoductos, de las líneas de conducción de energía eléctrica y a una distancia mayor de 150 m de zonas de almacenamiento de hidrocarburos
- El sitio deberá tener un buen sistema de drenaje natural, independientemente de la red de drenaje pluvial con que se equipe
- La pendiente media del terreno natural del sitio no deberá ser mayor a 30 % y deberá estar protegida de los procesos de erosión hídrica.

Los componentes de los cuales de cubrir un relleno sanitario para su construcción son:

Sistema de revestimiento

El sistema de revestimiento tiene como objetivo proporcionar una barrera que reduzca al mínimo la infiltración del lixiviado durante la vida activa y posterior al cierre del relleno sanitario.

Los tipos de revestimiento pueden ser de los siguientes tipos: atenuación natural, tierra compactada, tierra compactada y geomembrana, geomembrana sencilla (revestimientos geosintéticos de arcilla) u otras combinaciones.

Administración de lixiviado.

El sistema de recuperación del lixiviado tiene como objetivo la eliminación eficaz del líquido que se acumula en la base del relleno sanitario a fin de reducir al mínimo el potencial de fuga a través del sistema de revestimiento.

- Evitar la erosión por lluvia y viento
- Evitar hundimientos
- Operar con un mínimo de mantenimiento durante un tiempo máximo.

Postterminación

La postterminación consiste en la vigilancia y operación del relleno después de un período de tiempo de 30 años del cierre (O'leary, *op. cit.*). Las principales atenciones que recibe esta actividad son:

- Mantener su integridad y eficacia reparando los hundimientos y las partes erosionadas
- Evitar la erosión producida por el flujo continuo y los escurrimientos
- Monitorear e inspeccionar las aguas subterráneas, el lixiviado, la generación y concentración de biogas, los hundimientos, la erosión de la superficie y la calidad del aire
- Mantener la recolección y el tratamiento del lixiviado y del biogas
- Describir los planes futuros para el uso del lugar.

b) Confinamiento de residuos peligrosos

Un confinamiento controlado para residuos peligrosos es una instalación de disposición en donde los residuos peligrosos se colocan en el suelo y se intentan sepultar o alterar, de tal manera que no representen un peligro para la biota (O'leary, 1992).

Los confinamientos controlados no son homogéneos y, generalmente, se conforman de celdas, en las cuales se colocan un volumen discreto de residuos peligrosos, aislándolos de las celdas adyacentes por medio de barreras apropiadas (O'leary, *op. cit.*). Las barreras entre las celdas consisten comúnmente de una capa de suelo natural que conviene presente una textura fina (arcillas), para restringir el movimiento lateral o descendente de los lixiviados de los residuos peligrosos. Generalmente, el relleno se continua por encima del nivel del terreno para utilizar eficientemente el espacio y suministrar un nivel apropiado para el escarmento de la precipitación (EPA-Semarnap, 1995).

Diseño y construcción

El diseño y construcción de confinamientos controlados involucra las siguientes etapas (Tchobanoglous, 1993).

1. Identificación y selección del sitio.
2. Diseño.
3. Construcción
4. Operación.
5. Terminación, y postterminación.

1. Identificación y selección del sitio

La selección de un lugar apropiado para construir un confinamiento es la base de los confinamientos controlados. De esta etapa dependen completamente el principio y

funcionamiento de estas instalaciones. La ubicación y selección de sitios adecuados para la construcción de confinamientos controlados debe de asegurar que el sitio es adecuado a los requerimientos del proyecto y se minimizan los riesgos para la salud y el ambiente dentro de un costo económica aceptable, maximizado la aceptación pública (Morales, 1994):

Los pasos para la selección de estos sitios son lo siguientes:

1. Definir el área de estudio
2. Definir los factores de selección
3. Definir criterios de selección y establecer métodos para la aplicación de los mismos
4. Establecer métodos para la aplicación de criterios.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-055-ECOL-1993) establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de R.P, excepto los radioactivos.

2. Diseño y construcción

Una vez seleccionado y determinadas las características del sitio, se procede a elegir la forma de las celdas, las principales formas son:

a. Área

El método consiste en depositar los residuos en un talud inclinado, para formar la celda que después se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo. El material de cubierta se acarrea de sitios adyacentes(O'Leary, 1992). Este método se puede usar en cualquier terreno disponible, como canteras abandonadas, inicio de cañadas y terrenos planos.

b. Trinchera

En la mayoría de los casos, los residuos peligrosos son depositados inicialmente debajo de la superficie del terreno en una trinchera natural, o excavada para ese propósito. El residuo es depositado en un extremo de dicha trinchera formando celdas y cubriéndolas regularmente (O'Leary, *Ibidem*).

Los requisitos que se deben observar al diseñar, construir y operar celdas de un confinamiento controlados para residuos peligrosos se encuentran establecidos en la NOM-ECOL-057-ECOL-1993.

4. Operación

La operación de un confinamiento controlado es un conjunto de acciones que garanticen la protección a la biota. La Norma Oficial Mexicana (NOM-ECOL-058-1993) establece los requisitos para operar un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

La operación de un confinamiento controlados se divide en las siguientes suboperaciones :

- a) Registro
- b) Ubicación de los residuos peligrosos en celdas de confinamiento

- c) Operación
- d) Cubierta final
- e) Monitoreo
- f) Obras complementarias.

5. Terminación y postterminación

Cuando un confinamiento controlado ocupa el total de la capacidad para la que fue construido, se prosigue con el cierre de estas instalaciones. El cierre de las instalaciones, al igual que el caso del relleno sanitario, consiste en cubrir la superficie de las celdas con objeto de impedir erosión del suelo y maximizar la transevaporación del confinamiento; con el fin de proteger la salud de las personas y el ambiente de la exposición a los residuos enterrados.

- Reducir al mínimo la infiltración del agua de la superficie hacia los residuos
- Evitar la erosión por lluvia y viento
- Evitar hundimientos

La postterminación consiste en la vigilancia y operación del confinamiento de residuos peligrosos, después de un periodo de tiempo de 30 años de la terminación o cierre (O'Leary, *op. cit.*). En general, las actividades de en esta etapa son:

- Operar con un mínimo de mantenimiento durante un tiempo máximo.
- Mantener su integridad y eficacia reparando los hundimientos y las partes erosionadas
- Evitar la erosión producida por el flujo continuo y los escurrimientos
- Monitorear e inspeccionar las aguas subterráneas, el lixiviado, la generación y concentración de biogas, los hundimientos, la erosión de la superficie y la calidad del aire
- Mantener la recolección y el tratamiento del lixiviado y del biogas
- Describir los planes futuros para el uso del lugar.

Ventajas y desventajas del uso de confinamientos controlados

Las ventajas que presentan el relleno sanitario y el confinamiento controlado indican que :

- Son instalaciones necesarias que disminuyen la disposición clandestina de los residuos peligrosos y no peligrosos
- Son un medio de disposición adecuado, siempre que se lleven a cabo los sistemas de mantenimiento y monitoreo apropiados
- Representan un método de almacenamiento de largo tiempo
- Son invariables frente a las cantidades y a la naturaleza química de los residuos.

Por otra parte, presenten serias desventajas como:

- Los riesgos potenciales de contaminación de las aguas subterráneas y de contaminación y destrucción del suelo
- El biogas y el lixiviado generados en los confinamientos se tienen que tratar por algún método
- Los olores desagradables y la fauna nociva que pueden producir (principalmente en el relleno sanitario)
- La construcción de un relleno sanitario o un confinamiento controlado puede destruir sitios naturales y vírgenes
- Los altos costos de la disposición de residuos peligrosos en confinamientos controlados.
- En caso de problemas de mantenimiento u operación, se hereda un pasivo ambiental a las nuevas generaciones

4.4.3 Inyección en pozos profundos

La disposición final en zonas profundas de la tierra (por debajo de los acuíferos) por medio de pozos profundos, ha sido una técnica utilizada para “eliminar” residuos peligrosos líquidos desde hace aproximadamente 60 años. Sólo en E.U.A, en la década pasada, hubo alrededor de 450 pozos de disposición de residuos industriales. Además, otros miles de pozos se utilizaron para disponer aguas alcalinas que se obtienen de la producción de petróleo. Los pozos de inyección también han sido utilizado para disponer estos materiales en países como Alemania, Canadá, Japón, Holanda, España e Inglaterra (Freeman, 1989).

En los E.U.A. se informa que fueron inyectados los siguientes residuos: ácidos (41.3%), químicos orgánicos (36.3%), metales pesados (1.4%), químicos inorgánicos (0.08%) y otros (20.92%).

El método de inyección profunda consiste en aislar los residuos de la geología superior colocándolos en formaciones profundas donde se presupone con base en la información geológica disponible que permanecen prácticamente aislados. Los residuos a disponer son líquidos, que pueden ser o no tratados antes de ser dispuestos; esto se debe, principalmente, para evitar daño a los sistemas de inyección que tienen estas instalaciones (Corbit, 1991).

La práctica de esta alternativa se basa en principios hidrogeológicos. Los residuos se inyectan en formaciones profundas que frecuentemente son muy salinas y que se encuentran aisladas de formaciones superiores, por lo que no funcionan como un suministro de agua para el consumo humano.

La profundidad frecuentemente utilizada en estas instalaciones (E.U.A.) es de alrededor de 1,200 m, desde el nivel del terreno a la parte superior de la zona de inyección. El equipo que se utiliza consiste en tubos concéntricos. El conductor más externo que actúa como

superficie protectora, debe extenderse por debajo de la formación de suministro de agua para consumo humano y está concentrada en toda su longitud. El tubo de inyección se encuentra dentro del tubo de cubierta exterior y se extiende desde la parte superior de la cubierta del pozo hasta la zona de inyección. El tubo de cubierta también se cementa en toda su longitud para asegurar que no penetren residuos a las formaciones que se encuentran por arriba de la zona de inyección. El espacio entre el tubo y la cubierta se cierra en el fondo por un empaque que previene la entrada del líquido al anulo. El anulo generalmente se lleva con un fluido presurizado que se mantiene a presión para prevenir el escape de los residuos del anulo, si se llegasen a presentar fugas (Corbit, *Ibidem*). La parte superior del pozo contiene válvulas y medidores de presión para controlar la operación de inyección.

Al disponer residuos peligrosos en pozos se deben considerar los siguientes factores (Freeman, 1989):

Volumen

- Características físicas.
 - densidad
 - viscosidad
 - temperatura
 - contenido de sólidos suspendidos
 - contenido de gas
- Características químicas
 - constituyentes disueltos
 - pH
 - estabilidad química
 - reactividad
 - (a) con los sistemas de componentes
 - (b) con formación de agua
 - (c) con formación de minerales
 - toxicidad
- Características biológica

4.4.4 Minas abandonadas y domos salinos

El uso de minas abandonadas para la disposición final de los residuos peligrosos es un alternativa económicamente viable que ha sido utilizada, desde hace 35 años, por la industria petrolera como solución al problema de los residuos provenientes de sus procesos de extracción y refinación (Freeman, *op. cit*)

Las minas abandonadas son instalaciones fuera de uso, en las que se extrajo un mineral o varios de ellos de la superficie o profundidad de la tierra, pero que su explotación se detuvo por agotamiento del mineral, o por problemas económicos o de otra índole.

El tipo de minas que se utilizan para disposición de residuos son de sal o de hulla. Las ventajas de las minas de sal es que son impermeables a líquidos y gases, y por su naturaleza higroscópica adsorben grandes cantidades de agua y no favorecen la corrosión de los recipientes metálicos. En las minas de hulla, a su vez, no existen riesgos de explosiones por gas metano, pero debe asegurarse el cierre permanente de las minas y de los residuos que ahí se depositan, aunque sean sólidos y se encuentren envasados herméticamente, para prevenir una posible reacción entre los residuos y su entorno geológico (Cortinas, 1993).

Las ventajas que presenta el uso de minas y domos salinos son (Freeman, 1989):

- Requieren una menor inversión económica para adaptar las instalaciones, así como para operar y dar mantenimiento, que un confinamiento controlado
- Las minas que operan en la profundidad de la tierra tienen muy poca probabilidad de contaminar el aire, ya que sólo existe exposición en las operaciones de embalaje, empaque y distribución de los residuos
- Existen pocas probabilidades de contaminación de las aguas subterráneas, ya que los residuos se encuentran aislados y estabilizados (mediante solidificación, encapsulamiento u otros), además de que muchas veces se recubre el área con un geomembrana impermeable
- En caso de accidentes, como derrames, el área contaminada se encuentra limitada y aislada, por lo que disminuye, sus efectos sobre el ambiente.

Las desventajas, por otra parte, son :

- Se requiere hacer estudios e investigaciones de los sitios donde se construirán estas instalaciones
- Se pueden contaminar los acuíferos subterráneos
- Se requiere personal especializado.

5. NUEVAS TECNOLOGÍAS TÉRMICAS

5.1 Generalidades

Debido a que los sistemas tradicionales de incineración y confinamiento han afectado negativamente al ambiente y la población (en menor o mayor grado), una gran cantidad de especialistas de diversas disciplinas, especialmente ingenieros químicos, se han abocado a diseñar nuevas tecnologías; que se han inspirado en los principios que rigen los procesos naturales; los cuales, como se comentó en el primer capítulo, son cíclicos, de alta eficiencia y bajo impacto. Complementariamente se busca que los procesos sean rentables.

Dada la gran experiencia que se tiene en los sistemas tradicionales y a que las regulaciones y condiciones económicas se han desarrollado en función de los requerimientos de éstas, es difícil el cambio a las nuevas tecnologías. No obstante, los países más ricos están promoviendo el cambio en esa dirección, pues estas tecnologías representan ahorros importantes a mediano plazo y son aceptadas por la comunidad.

5.2 Pirólisis

5.2.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

El estudio y primeras aplicaciones de esta tecnología se remontan a la década de 1930. Básicamente, consiste en la descomposición térmica de las cadenas de carbono (compuestos orgánicos) en ausencia de oxígeno (medio reductor) y, a menores temperaturas que la incineración, para generar diversos productos los cuales pueden ser utilizados como materia prima o combustibles fósiles de alta pureza. Los productos obtenidos son hidrocarburos (gas y líquidos), carbón y una fase sólida inorgánica en donde se recuperan sales, metales y otros materiales particulados. Las condiciones del proceso varían desde un calentamiento al vacío (termólisis) hasta condiciones donde se utilizan pequeñas cantidades de oxígeno.

Tradicionalmente se ha utilizado para descomponer el gas natural y los compuestos líquidos del petróleo, a temperaturas que oscilan entre 500 y 650 °C (1040 y 1202 °F), con un valor promedio de 350 °C (662 °F). La pirólisis del petróleo, da como productos finales carbón, hidrógeno, alcanos, olefinas acetileno y compuestos aromáticos. En años más recientes, las investigaciones se enfocaron a las condiciones específicas operacionales de la pirólisis, así como los productos que se llegan a obtener en dicho proceso en función de la temperatura, a las condiciones atmosféricas internas del proceso (O₂ y presión) y a los tipos de material que se pueden tratar.

A partir de 1970, se publicaron artículos sobre la viabilidad de aplicar la pirólisis para obtener combustibles de los desechos sólidos orgánicos y aminorar el problema de la contaminación. "La aplicación de la pirólisis para el tratamiento de residuos peligrosos es muy útil porque permite el control preciso del proceso de combustión" (Weismatel, 1973).

Estudios realizados por Kaiser y Friedman (1968), demostraron en pruebas de laboratorio que era posible gasificar completamente materia orgánica procedente de basura homogénea. En cuanto a la emisión de gases producida durante el proceso, revelaron que la cantidad de gas producida es alta cuando el proceso se lleva a cabo a temperaturas altas, y mucho menor la producción de intermediarios. Drobny y Hull (1980) sugirieron que el carbón producido durante la pirólisis puede ser convertido en gas mediante la adición de oxígeno al ambiente después de la pirólisis, ya que el calor producido de la combustión del carbón puede ser aprovechado para pirolizar más desechos que entran al proceso, estableciendo un sistema más eficiente en el que el calor desprendido es reutilizado.

Por ejemplo, de una tonelada de residuos sólidos municipales se puede obtener:

- 69 a 916 kg. (154 a 424 libras) de sólidos
- 1.89 a 22.68 litros (0.5 a 6 galones) de alquitrán
- 3.78 a 15.12 litros (1 a 4 galones) de aceite
- 366.66 a 502.74 (97 a 133 galones) de alcohol
- 7.264 a 14,528 (16 a 32 libras) de sulfato de amonio
- 0.906 a 511.56 m³ (2 a 18 058 ft³) de gas

De una tonelada de residuos industriales (básicamente papel, trapo y cartón), se generan

- 280.57 a 289 kg (618 a 638) de libras de sólidos
- 5.67 a 11.34 litros (1.5 a 3) galones de aceite
- 257.07 a 283.5 litros (68 a 75) galones de alcohol
- 5.448 a 10.44 kg (12 a 23) libras de sulfato de amonio
- 262.861 a 398 442 litros (9279 a 14 065 ft³) de gas

Roy y Darmstadt (1995), reporta que cuando el caucho y llantas, son pirolizadas en un reactor al vacío (0.3 kPa), se obtiene: 35. % de carbón e inorgánicos (sales y metales), 10 % de gases, y 55 % de líquidos (parafinas, aromáticos, naftalenos y olefinas, entre otros)

Hay una gran variedad de residuos cuyo tratamiento con pirólisis resulta muy recomendable, como:

- Materiales que son muy viscosos, abrasivos o que varían mucho en consistencia como para ser atomizados en un incinerador
- Residuos que presentan un cambio total o parcial en sus fases durante el proceso térmico, como los plásticos
- Materiales que contienen sales o metales que se funden o pueden volatilizar en las temperaturas de un incinerador normal
- Materiales con alto contenido de residuos, como líquidos con una concentración elevada de cenizas
- Residuos almacenados en contenedores o tambores que no pueden ser drenados.
- Residuos inorgánicos volátiles a altas temperaturas como NaCl, FeCl₂, Zn y Pb.

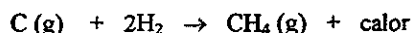
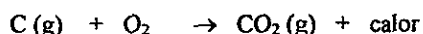
Descripción del proceso

Reacciones y parámetros del proceso de pirólisis

La reacción principal es el rompimiento de enlaces carbono-hidrógeno y a las escisiones de las cadenas de carbono, cuyo tamaño básicamente determina el estado físico de los productos (gases, líquidos y sólidos).

material orgánico → hidrocarburos gaseosos + hidrocarburos líquidos + carbón

Reacciones secundarias



Los gases recuperados contiene principalmente 12.58 % de hidrógeno, 22.46 % de metano, 15.155 de etano, 13.77 % de propano y 9.67 % de isobutano. Estos productos poseen altos valores calóricos.

La fracción líquida está formada por diversos productos como benceno, xileno, tolueno, estireno y limoleno. La composición de la mezcla puede compararse con el "diesel 2", aunque también se han reportado la obtención de alquitrán (brea) y alcoholes.

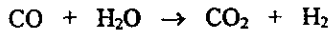
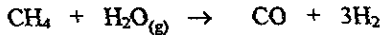
El carbón se produce en forma de un polvo muy fino y ligero el cual puede ser fácilmente obtenido de materiales cribados que contengan el compuesto original; por ejemplo, plástico. Este residuo sólido tiene como característica que posee un alto valor calorífico, puede utilizarse como carbón activado o materia prima para la fabricación de llantas o puede ser adicionado a los suelos.

Cuando el carbón queda contaminado con sustancias consideradas peligrosas, los residuos se tratan nuevamente (Freeman, 1989).

El rendimiento específico de los productos del proceso de pirólisis está influenciado por el tiempo de residencia, temperatura, tamaño de partícula del desecho alimentado, y la atmósfera (O_2 , aire, O_2 libre, vapor). El tipo de material pirolizado y la temperatura del proceso también influyen en el tipo de producto que se obtiene:

- La pirólisis a temperatura baja, fundamentalmente, conduce a reacciones alifáticas, y a alta temperatura, se aromatizan las fracciones alifáticas

- La cantidad de carbón producida disminuye con el aumento de la temperatura, pues se favorece su conversión a gas
- La cantidad de agua disminuye con el aumento de la temperatura debido a que reacciona con el monóxido de carbono y metano.



- La cantidad de aceites ligeros condensados disminuye con el aumento de la temperatura debido a reacciones de "cracking" las cuales dan productos de bajo peso molecular
- Como consecuencia del aumento de los gases con la temperatura también se incrementa el contenido calorífico.

Tipos de sistemas de pirólisis

La mayor parte de los sistemas de pirólisis son muy similares. Entre los tipos de reactores que se usan en pirólisis, los más populares son:

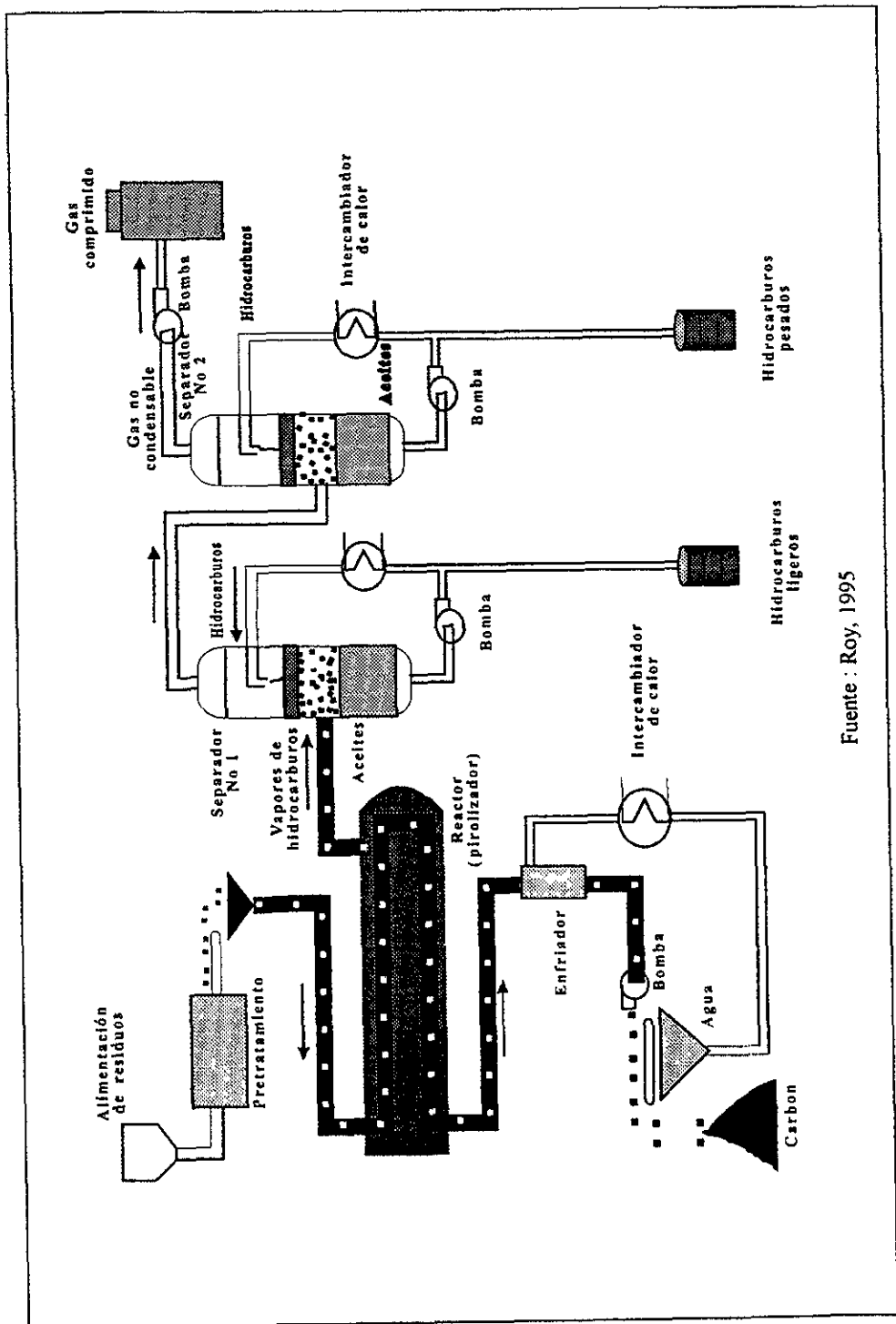
- Reactor de eje
- Reactor de horno rotacional
- Reactor de lecho fluidizado

En los reactores verticales la alimentación de los desechos sólidos se alimentan por la parte superior, depositándose en el fondo por su propio peso. El oxígeno, el aire, o el calor de cambio se alimenta por la parte inferior del reactor. Los gases generados en el proceso pasan hacia arriba y son removidos por la parte superior .

El reactor de horno rotacional es un cilindro con movimiento rotacional que gira en un ángulo conveniente. La alimentación se lleva a cabo en uno de los extremos del reactor y el material se transporta debido a la pendiente y al movimiento rotacional (**Figura 5.1**).

El reactor de lecho fluidizado se usa habitualmente en procesos de gasificación del carbón. Los desechos sólidos requieren de una pretrituración antes de ser alimentados, ya que la fluidización requiere de un material de tamaño uniforme. Estos reactores operan a bajas temperaturas en un intervalo entre 760 a 982 °C (1,400 a 1,800 °F) por debajo de estas temperaturas forman escoriaciones. El calor necesario para el proceso de pirólisis se genera por una oxidación parcial de los desechos o por recirculación precalentada de los sólidos fluidizados. Una desventaja del reactor es que requiere de una considerable preparación de la cámara de alimentación y la ventaja principal es que ofrece un buen control de la temperatura (en la práctica se ha preferido el de horno rotacional).

Figura 5.1 Diagrama del proceso de pirólisis



Fuente : Roy, 1995

5.2.2 Consideraciones

Ventajas de la pirólisis

- El volumen de los residuos puede ser reducido hasta en un 90 % o más cuando el material contiene únicamente compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno
- No causa problemas de contaminación de aire, ya que es un proceso prácticamente cerrado
- Es un proceso que requiere pequeños espacios, resultando en bajos costos para su transportación
- Es factible recuperar metales, ya que los procesos de oxidación son mínimos
- Requiere de menos temperaturas que la incineración, por lo tanto aumenta la vida de los refractarios y disminuye las necesidades de mantenimiento
- No requiere de un control de emisiones tan complejo como los incineradores
- El carácter endotérmico permite el control de proceso
- Residuos sólidos y líquidos pueden ser homogeneizados, transformándolos mediante la pirólisis en una corriente gaseosa muy adecuada para una incineración controlada,
- Los constituyentes recuperables quedan en la fase sólida
- Se forman vapores condensables con valor económico que se pueden recuperar
- Los vapores no condensables pueden utilizarse como fuente de energía.

Limitaciones de la pirólisis

- Parte de los componentes con valor energético o contaminantes como azufre pueden ser retenidos por el carbón
- Se requiere de incineración para "destruir" sustancias carcinogénicas presentes, de acuerdo a los requerimientos legales.

5.3 Proceso de oxidación con aire húmedo (OAH)

Este proceso se desarrolló en E.U.A y Europa en la década de 1970, para tratar residuos que contienen concentraciones tan bajas de contaminantes que no pueden ser incinerados o son tan tóxicos que no pueden ser tratados biológicamente; como es el caso de cianuros, fenoles, sulfuros y disolventes clorados. Desde hace 10 años funcionan plantas que tratan desde 22.68 a 11, 340 l/minuto -6 a 3,000 galones/minuto- (Copa, 1990).

Este proceso ha sido modificado con el objeto de reducir los requerimientos de presión y temperatura originalmente establecidos. La **Figura 5.2** muestra el diagrama de flujo del proceso actual.

5.3.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

La reacción de oxidación se realiza en fase acuosa adicionando un gas donador de oxígeno, que usualmente es aire, a temperaturas de 150 a 325 °C y presiones de entre 2, 069 a 20, 690 kPa. El suministro estequiométrico de oxígeno y un nivel adecuado de presión permiten controlar la evaporación pues se forma agua líquida.

Experimentalmente se ha demostrado que es una reacción de primer orden ($dC/dt = -kC$, donde: C = concentración de la sustancia oxidable).

Se asume que la presión parcial del oxígeno, y la mezcla gas-líquido, son suficientes para suministrar el agente oxidante, en cantidades suficientes como para abastecer O_2 ilimitadamente, así se asegura una cinética de primer orden, respecto a la sustancia a oxidar.

La constante de velocidad, depende en mayor grado de la temperatura que de la presión debido que a temperaturas entre 200 a 280 °C (392 y 536 °F) y tiempos de residencia de 15 a 60 minutos, se logra un valor de “destrucción” de más del 99%. Bajo estas condiciones se obtienen constantes de velocidad de 0.1 a 1 minuto⁻¹. Para sustancias más tóxicas, se utilizan temperaturas mayores a 280 °C, con el objeto de lograr una oxidación completa (Copa, *op. cit.*).

Los mecanismos de la reacción reportados por Copa (1991), involucran radicales libres tales como hidróxido, hidroperóxido, y oxígeno. Tales mecanismos pueden explicar la oxidación completa de compuestos orgánicos y justificar a el agua como “catalizador”.

Se reporta, que la estequiometría del abastecimiento de oxígeno y la presión, es necesaria para un control adecuado de la evaporación del compuesto a tratar.

Freeman (1989), reporta que la transferencia de oxígeno completa puede ser obtenida de compuestos con concentración de 200 g/l de demanda de oxígeno (OD), con lo que se obtiene eficiencia de destrucción de 95 a 99 %, utilizando tiempos de 15 a 60 minutos.

Un gran aumento en la solubilidad y en los coeficientes de transferencia del O_2 , permite obtener altas eficiencia debido al calor generado en la reacción.

En la práctica, Copa (1991), ha comprobado que materiales como sales de cobre, pueden ser utilizados con catalizadores en el proceso de oxidación con aire húmedo

De acuerdo a Baillod (1985) los pasos de este proceso son los siguientes:

- El residuo, en fase líquida es presurizado a 4,771 kPa y enviado a un intercambiador, donde se eleva la temperatura hasta alcanzar 173 °C, bajo estas condiciones se alimenta al reactor.
- Aire, tomando del ambiente se comprime y calienta a 4,771 kPa y 173 °C, el cual se envía al reactor de oxidación.
- Los compuestos orgánicos son oxidados a una temperatura de 232 °C, presión de 4,771 kPa y tiempos de retención de 15 a 60 minutos
- Al término de la reacción, se forma un efluente gaseoso, la cual se envía al intercambiador de precalentamiento, con el objeto de aprovechar la energía residual para generar. Posteriormente la corriente se envía un separador de gas líquido, de esta operación se generan dos fases una líquida y gaseosa.

- Los líquidos consisten en el residuo oxidado y los gases se liberan a la atmósfera. La corriente líquida, se envía a un separador líquido sólido, donde se envía a un tratamiento biológico por motivos legales.
- De acuerdo a Freeman (1989), se pueden favorecer la reacción utilizando catalizadores homogéneos o heterogéneos y acidificando.

Tipos de residuos posibles de tratar

La oxidación con aire húmedo es un proceso versátil de amplia aplicación, que generalmente se aplica a residuos líquidos inorgánicos como, cianuros y sulfitos, y desechos orgánicos como alifáticos, clorados, fenoles, hidrocarburos aromáticos, y compuestos que contienen oxígeno, nitrógeno, o azufre. Este proceso, también se ha utilizado para regenerar carbón activado .

5.3.2 Consideraciones

Efluentes

Los la materia orgánica se descompone en compuestos orgánicos sencillos, como CO₂, agua, ácido acético, se generan otros elementos y compuestos como nitratos y nitrógeno gaseoso

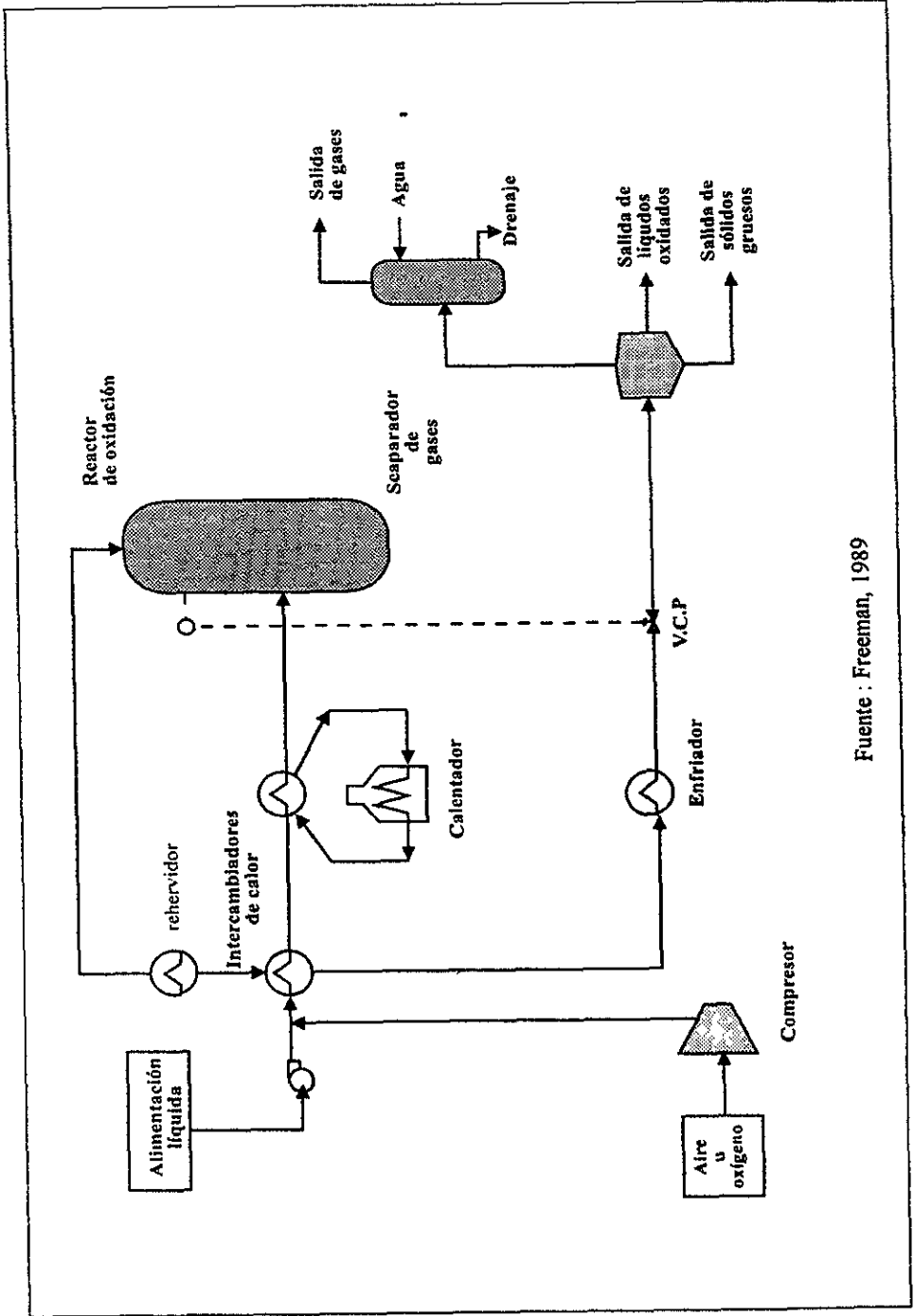
Las ventajas de la oxidación con aire húmedo son:

- Los gases provenientes de este proceso se encuentran libres de óxidos de nitrógeno, dioxinas, furanos y material particulado en fase gaseosa
- A temperaturas más elevadas que las críticas puede oxidar compuestos clorados, como DDT (diclodifeniltricloroetano) y bifenilos policlorados (entre otros Bpc 1234, Bpc 1254 y 4,4-diclorofenil).

Las limitaciones que presenta este método son:

- El equipo principal del proceso (reactor, intercambiadores, tubería, válvulas y tanques) requiere construirse con materiales de alta resistencia a la corrosión, como *incoloy* 800 y 825, *Inconel* 600 y 625 o titanio de grado 1, 2, 3, 11 y 20
- Para lograr altas eficiencias de descomposición de los desechos se requiere que el reactor opere a condiciones de *flujo tapón*. Es decir, que las condiciones de la mezcla reaccionante sean las mismas en cualquier punto de la sección transversal del reactor, lo que es difícil de lograr con tiempos de residencias largos y un flujo pequeño
- Cuando los residuos son tratados por este proceso los compuestos tóxicos orgánicos no son total mente “destruidos”, aunque la mayor parte se transforma en dióxido de carbono y agua. Los residuos orgánicos resultantes (si bien son prácticamente inofensivos), requieren un tratamiento posterior (como la biodegradación) para cumplir con la legislación vigente.

Figura 5.2 Diagrama del proceso de oxidación con aire húmedo



Fuente : Freeman, 1989

5.4 Oxidación con agua a condiciones supercríticas (OACS)

En este tratamiento (Figura 5.3) los compuestos orgánicos, -incluyendo los que contienen cloro, flúor, y fósforo-, son oxidados en medio acuoso y condiciones por encima del punto crítico del agua pura; esto es, a una temperatura mayor de 374 °C (705 °F) y una presión mayor de 464.72 kPa (3,205 psi). Se puede utilizar como agente oxidante, aire, oxígeno molecular o agua oxigenada. Las reacciones son exotérmicas y el calor liberado puede ser utilizado en el propio proceso.

A temperaturas mayores de 500 °C (939 °F) se pueden obtener conversiones del orden del 99.99 % en un tiempo de residencia menor a 1 minuto. Los hidrocarburos pueden ser convertidos completamente a monóxido de carbono, hidrógeno y agua. El cloro, el fósforo y el azufre, que contienen los residuos orgánicos son convertidos a compuestos inorgánicos que pueden ser precipitados, agregando alguna base para formar sus respectivas sales (Rofer, 1990). Por ejemplo, el fósforo forma ácido fosfórico, los sulfuros se convierten en ácido sulfúrico, y los compuestos clorados en ácido clorhídrico.

5.4.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

El proceso de basa en el comportamiento del agua a condicione supercriticas (temperaturas que van de los 450 a 600 °C y presiones a partir de 525.70 kPa). Bajo estas condiciones, el agua se comporta como un fluido orgánico de baja polaridad que solubiliza a cualquier sustancia no polar como son los hidrocarburos mientras que sucede lo contrario con las sales inorgánicas.

La solvatación de los compuestos orgánicos y el oxígeno permite un contacto íntimo en una sola fase, lográndose que la reacción dependa principalmente de la cinética y no del proceso de transporte, por lo que las reacciones ocurren en una velocidad mayor y con mayor eficiencia que en el proceso de oxidación con aire húmedo (Houser, 1990).

Además de agua en estado supercrítico también se están probando otras tecnologías basadas en sustancias que requieren menores presiones y temperaturas, como es el caso del dióxido de carbono. Sin embargo, no se puede utilizar este tipo de sustancia (gas), cuando el contaminante forma efluentes finales que contienen compuestos gaseosos.

Descripción del proceso

De acuerdo a Freeman (1989), los pasos de este proceso son los siguientes:

- El residuo, como solución acuosa o lodo es presurizado y enviada al tubo de entrada del reactor de oxidación. Se calienta hasta condiciones supercriticas mezclándolo con los efluentes que del reactor (reciclado)
- Oxígeno en forma de aire comprimido es alimentado, utilizando como fluido en el inyector que alimenta parte del efluente que se recicla (ya tratado). Bajo estas

condiciones se logra que la mezcla de entrada se convierta en una fase homogénea de aire, compuestos orgánicos y agua supercrítica

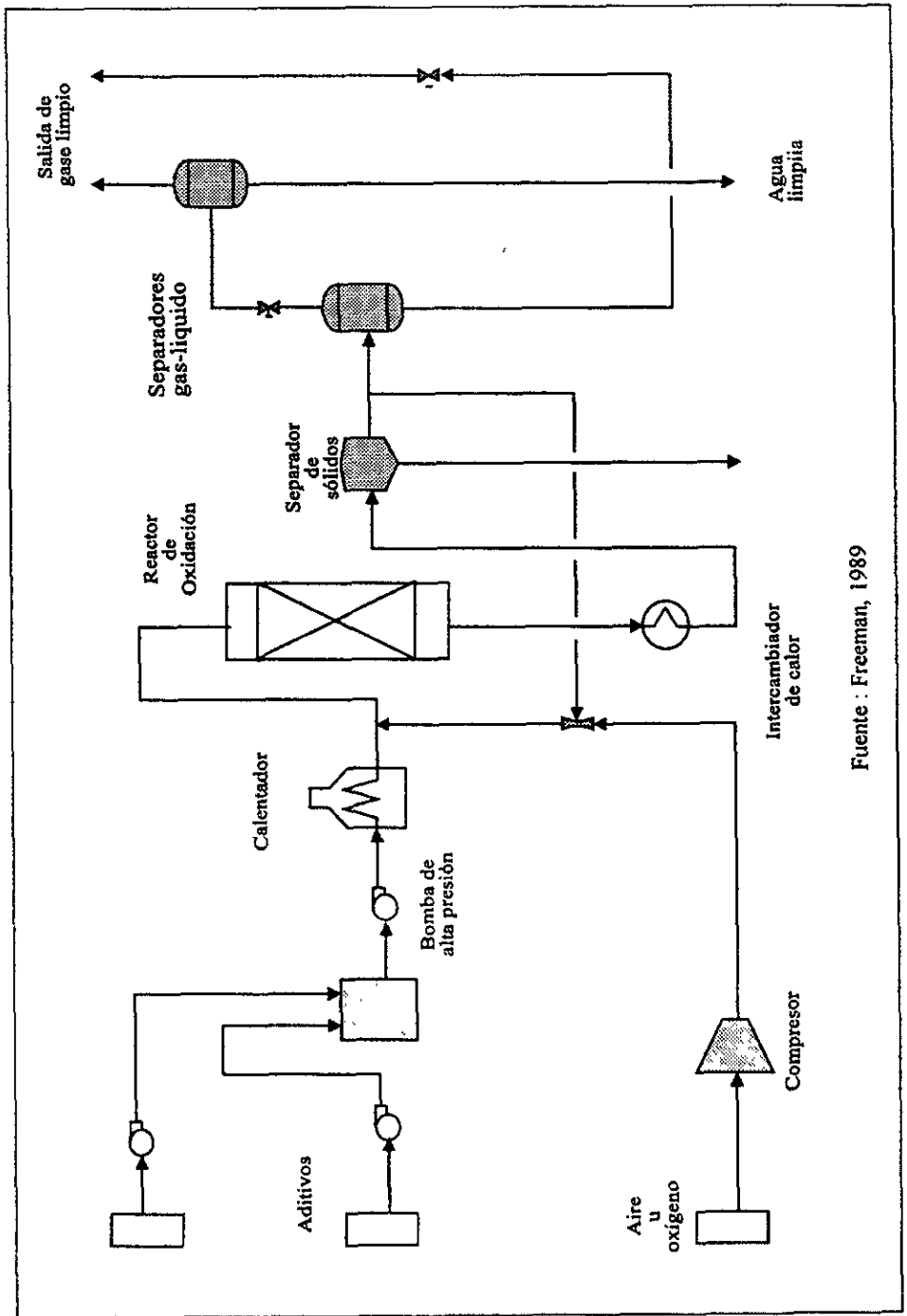
- Los compuestos orgánicos son oxidados en una reacción rápida y controlada. El calor liberado por la combustión es suficiente para que el fluido alcance el nivel de temperatura necesario para lograr una rápida oxidación de los compuestos orgánicos
- El efluente del reactor de oxidación es alimentado a un ciclón. Las sales inorgánicas que contenía la carga o las que se formaron durante la combustión, precipitan y pueden ser separadas
- El fluido que sale del separador de sólidos es una mezcla de agua, nitrógeno molecular y dióxido de carbono. Una parte de éste, es reciclado a través del inyector al reactor de entrada, con el objeto de lograr las condiciones supercríticas
- El remanente del efluente, que no ha sido enviado al reactor de entrada, puede ser utilizado para recuperar energía. La corriente es enfriada a temperatura subcrítica en un intercambiador de calor que es utilizado para generar vapor a bajas temperatura y presión
- Bajo condiciones subcríticas, la mezcla que presenta dos fases es introducida a un separador de líquido vapor de alta presión. Prácticamente, todo el nitrógeno y la mayor parte del CO₂ pasan a la fase gaseosa, mientras que el líquido está formado por agua con dióxido de carbono disuelto
- La corriente de gas puede ser expandido a través de una turbina para extraer la energía todavía disponible. Una parte de esta energía es usada para comprimir el aire que se introduce en el sistema
- El líquido del separador es despresurizado y alimentado a un separador de baja presión. El vapor formado principalmente por CO₂ es enviado a un respiradero junto con el efluente de la turbina de gas. El efluente líquido es agua pura.

Tipos de residuos posibles de tratar

En general, el tratamiento con agua a condiciones supercríticas es aplicable a la mayoría de los compuestos orgánicos. Algunas corrientes de residuos tratados con gran éxito incluyen (Rofer, 1990):

- Residuos de pintura, residuos de lubricantes de maquinaria, aceites y grasas gastados, y aceites contaminados con bifenilos policlorados
- Aguas subterráneas contaminadas con compuestos tóxicos orgánicos
- Suelos contaminados con derrames de compuestos orgánicos tóxicos
- Mezclas de compuestos orgánicos y radioisótopos, incluyendo el uranio.

Figura 5.3 Diagrama del proceso de oxidación con agua a condiciones supercríticas



Fuente : Freeman, 1989

5.4.2 Consideraciones

Efluentes

El oxidante que no reacciona, que en el caso de utilizar aire principalmente está formado por oxígeno y nitrógeno, y el CO₂ provenientes de las reacciones, conforman los principales efluentes de este proceso. Cuando son tratados compuestos que contienen algún halógeno o azufre, se transforman en ácidos clorhídrico o sulfhídrico que deben ser neutralizados para controlar la corrosión (Houser, 1991).

Ventajas del proceso OACS

- Se aplica a gran variedad de residuos que contengan compuestos oxidables (ideal para tratar suelos contaminados)
- Los efluentes se encuentran libres de componentes producidos por la incineración, como son óxidos de nitrógeno (NO_x), dioxinas, y material particulado. Los efluentes de la reacción no son tóxicos y se pueden manejar fácilmente
- Las temperaturas requeridas para llevar a cabo el tratamiento (450 a 600 °C) son menores que del proceso de incineración (800 a 1,400 °C) por lo que se requiere menor energía y se evita la formación de compuestos refractarios que se bioacumulan como dioxinas.

Limitantes del proceso OACS

- Uno de los problemas que hay que enfrentar cuando se utiliza este tratamiento es la corrosión, generada por las sales formadas durante la neutralización
- Las sales que se precipitan pueden causar problemas de obstrucción en las líneas de conducción, especialmente en los equipos de alta presión y en los sistemas reductores de presión
- El proceso requiere equipo de alta resistencia a la presión y corrosión, como aleaciones de níquel, o *Hasteloy C276* o bien materiales cerámicos, con altos costos de mantenimiento.

5.5 Tecnología “Reducción en fase gas”

Bajo el auspicio del Programa del Superfondo para la Evaluación de Innovación de Tecnología de E.U.A, algunas compañías han desarrollado el proceso de reducción química en fase gaseosa. Este tratamiento ha sido probado con éxito en países con Australia, Canadá y E.U.A. para “destruir” residuos líquidos, sólidos y suelos contaminados por compuestos como: bifenilos policlorados, fenoles, plaguicidas y otros (Kye, 1996).

5.5.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

El proceso se basa en una reducción química en fase gaseosa en un ambiente rico en hidrógeno, donde reaccionan los desechos líquidos orgánicos, a una temperatura de 900 °C

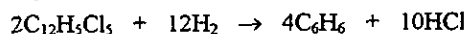
(1,650 °F) y presión ambiente para elaborar como producto, un gas reformado de alto poder calorífico.

El proceso de reducción en fase gaseosa se puede aplicar a corrientes de residuos acuosos, ya que el agua bajo las condiciones de la reacción, se comporta como un donador de hidrógeno, favoreciendo la reducción. Los productos de la reacción incluyen ácido clorhídrico, de la reducción de compuestos clorados tales como los bifenilos policlorados; así como hidrocarburos más ligeros como el metano y etileno, generados por la reducción de hidrocarburos más pesados, ya sean de cadena abierta lineal o aromáticos. La ausencia de oxígeno libre en el reactor inhibe la formación de dioxinas, compuestos refractarios que se forman durante la incineración.

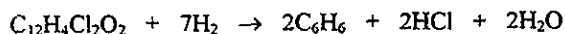
Reacciones

Las reacciones que ocurren durante la transformación ("*destrucción*") de bifenilos policlorados cuyas siglas en inglés son *PCB's* y en español *Bpc*, en HCl e hidrocarburos ligeros, son las siguientes: centrar o dar margen a las reacciones

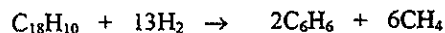
- 1) El *Bpc* (por ejemplo el 2,4,5,9,10-pentaclorobifenilo) reacciona con el hidrógeno dando benceno y ácido clorhídrico



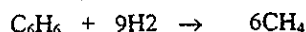
- 2) Las dioxinas (por ejemplo el 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina) y el hidrógeno producen benceno, ácido clorhídrico y agua



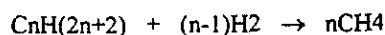
- 3) Los hidrocarburo poliaromáticos (por ejemplo fenantreno), reaccionan con el hidrógeno y producen metano



- 4) El benceno y el hidrógeno producen metano



- 5) Los hidrocarburos reaccionan con hidrógeno produciendo metano

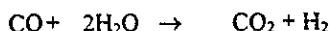


Reacciones de reducción "*desplazamiento*" de agua

- 1) El metano y agua producen monóxido de carbono e hidrógeno



- 2) El monóxido de carbono y agua producen dióxido de carbono y agua



Descripción del proceso

El proceso patentado se lleva a cabo en un reactor (*ECO LOGIC*), el cual se puede combinar con otra tecnología también patentada denominada Unidad de Desorción Térmica (TDU por sus siglas en inglés), que permite liberar los contaminantes orgánicos de la matriz sólida, mediante un baño de metal fundido como medio de transferencia de calor.

Los componentes principales del proceso son:

- Sistema de manejo de residuos líquidos (incluyen tanques, bombas, intercambiadores de calor etc.)
- Unidad de desorción térmica (TDU) para suelos contaminados
- Reactor
- Scrubber
- Caldera
- Sistema de almacenaje de gas
- Sistema de control de proceso

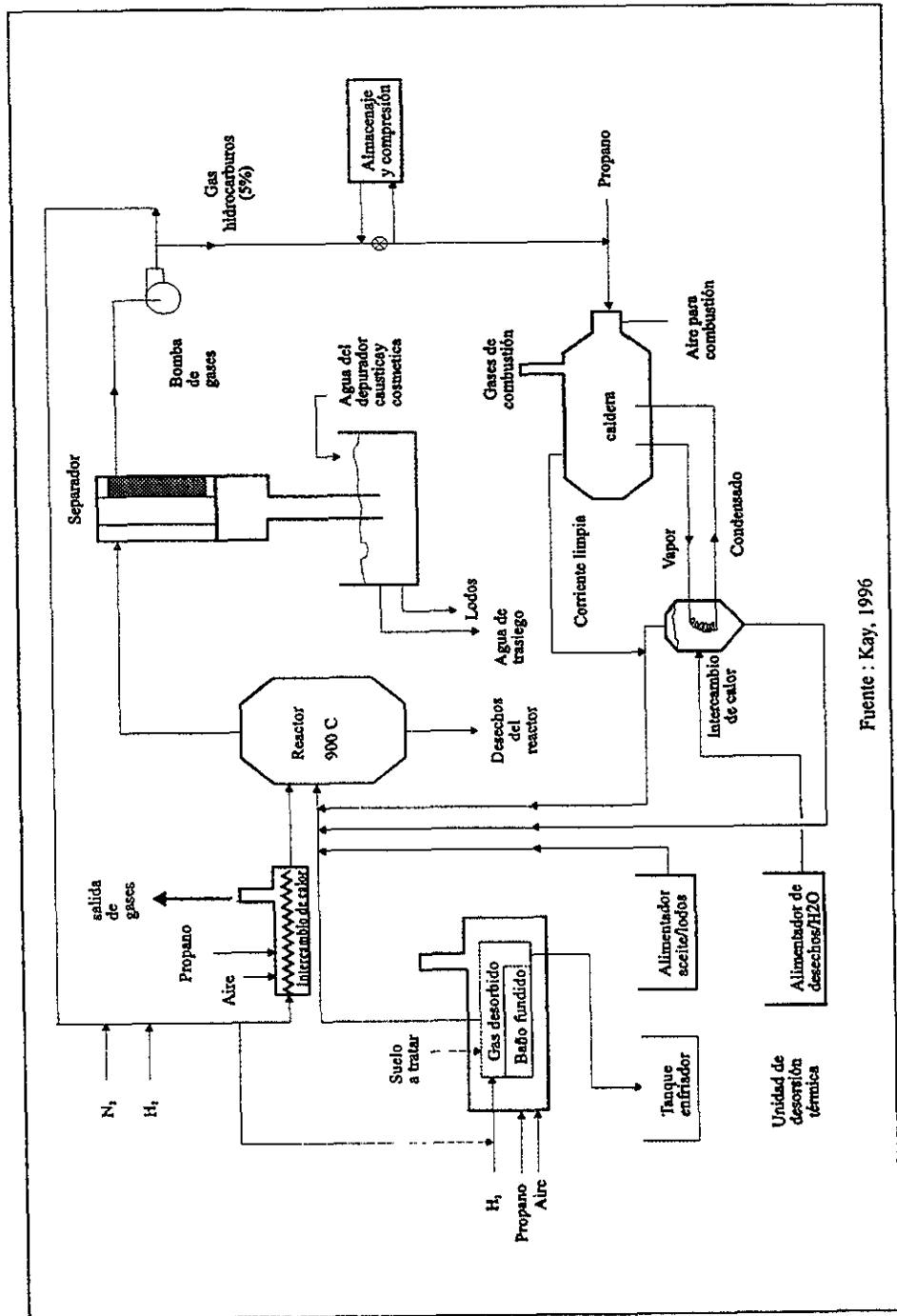
La **Figura 5.4** muestra el diagrama de flujo.

Tipos de residuos posibles de tratar

El proceso ha sido aprobado por la EPA y CEPA para la destrucción de bifenilos policlorados y compuestos clorados. Las matrices que se pueden someter a este tratamiento pueden ser sólidas o líquidas. Por ejemplo, se pueden tratar una gran cantidad de residuos como lodos de planta de tratamiento de aguas residuales, suelos contaminados con grasas, aceites, resinas o bifenilos policlorados, líquidos como aceites contaminados, fenoles, tetracloruro de carbón, etc.

Para desorber los contaminantes del suelo se utilizan temperaturas que oscilan entre 500 y 600 °C (930-1,100 °F). Los orgánicos desorbidos de la matriz sólida se ponen en contacto con una corriente gaseosa rica en hidrógeno. La mayoría de los metales volátiles que se encuentran en la matriz se disuelven en el baño de metal fundido o permanecen como sólidos en el suelo, pero los más volátiles pasan al reactor junto con los orgánicos. La temperatura del suelo antes de ser dispuesto, se disminuye utilizando agua de enfriamiento. El gas que contiene el agente reductor (hidrógeno) y los contaminantes orgánicos es transportado al reactor en donde se lleva a cabo la reducción de los contaminantes y del agua, produciéndose compuestos de alta energía que conforman un combustible de alta calidad conocido como *gas reformado*.

Figura 5.4 Diagrama del proceso en reducción en fase gas



Fuente : Kay, 1996

5.5.2 Consideraciones

Efluentes

Como ya se comentó, los principales efluentes de este proceso, consisten en ácido clorhídrico gaseoso cuando se tratan a compuestos orgánicos clorados, hidrógeno (aproximadamente 95%), e hidrocarburos ligeros como metano y propano y una pequeña cantidad de vapor de agua. No se forman desechos ya que todos los efluentes conforman productos reutilizables. El hidrógeno se recircula al reactor y una pequeña parte (5%) se utiliza como combustible. Si no se puede utilizar el ácido clorhídrico se neutraliza formando cloruro de calcio.

Ventajas del proceso Eco Logic:

- ◆ Se pueden procesar para descontaminar un gran cantidad de residuos sólidos, líquidos y suelos
- ◆ La eficiencia de *destrucción* de los contaminantes es muy alta (> 99 999%)
- ◆ A diferencia de los métodos de incineración, esta tecnología de reducción no genera material particulado, dioxinas y furanos
- ◆ Los productos del tratamiento se pueden recuperar y utilizarse como combustibles (metano, propano, e hidrógeno)
- ◆ El equipo es móvil, por lo que puede transportarse a los sitios contaminados
- ◆ Cuando se tratan compuestos clorados y bifenilos policlorados se recupera HCl.

Limitantes del proceso Eco Logic:

- ◆ Cuando no existe un mercado local para el HCl se requiere neutralizar con cal y formar CaCl_2
- ◆ No se pueden procesar matrices que contienen S^{2-} , Se^{2-} , Te^{2-} y otros aniones de elementos potencialmente tóxicos que se encuentran en sus estados más reducidos ya reaccionan con el hidrógeno para formar hidruros gaseosos tóxicos.

5.6 Proceso de baño con vidrio fundido (Molten Glass Process)

Este tratamiento a sido desarrollado por las compañías norteamericanas Molten Metal Technology y Elkem Technology, para la destrucción y/o inmovilización de desechos peligrosos y radiactivos.

Este proceso puede destruir combustibles y algunas porciones tóxicas de desechos peligrosos y simultáneamente incorporar residuos como cenizas y metales pesados, dentro de un forma estable de vidrio. El producto final queda reducido a una pequeña porción la cual es fijada dentro de una matriz de vidrio (borosilicato) denso, estable y cristalino (Department of Energy of U.S.A, 1994)

5.6.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

Cuatro electrodos son introducidos en la matriz contaminada, por ejemplo suelos, aplicando un voltaje eléctrico que genera una corriente que se conduce a través de los iones presentes (Freeman, 1989). La resistencia eléctrica genera calor alcanzándose temperaturas de hasta 2,000 °C. Bajo las condiciones antes descritas, los componentes de silicio y otros minerales forman un vidrio fluido, a través del cual se forman corrientes convectivas que distribuyen uniformemente el calor (Bult, 1985). A este tipo de fenómeno se le conoce como “el principio de calentamiento de Joule”.

Descripción del proceso

Los procesos Molten Glass se dividen en tres categorías básicas, siendo potencialmente aplicables a una gran variedad de residuos peligrosos.

1. Vitrificación *In Situ*
2. Hornos de fundición de vidrio verticales
3. Hornos de fundición de vidrio horizontal

Los tres tipos se basan en la destrucción de compuestos orgánicos y de nitratos presentes en el desecho, inmovilizando las porciones residuales dentro de una matriz de vidrio. A continuación se describen brevemente es estos tres proceso

1.- Vitrificación *In situ*

Esta técnica convierte al material contaminado, como por ejemplo un suelo, en un producto inerte, vidriado y cristalino (Figura 5.5). De acuerdo a Bult, *op. cit.* (1985) las principales operaciones del proceso cuando se aplica a un suelo, son las siguientes:

- Se introducen en el suelo cuatro electrodos de molibdeno y de grafito que están interconectados
- Se adiciona una mezcla de pedacería fina de grafito y frita de vidrio entre los electrodos para favorecer la conducción de electricidad, ya que el suelo seco es aislante
- Se aplica un potencial eléctrico entre los electrodos para aumentar la temperatura, la cual puede llegar hasta 2,000 °C que es una temperatura superior a la de fundición del suelo (arriba de 1,600 °C)
- Bajo estas condiciones (alta temperatura), la corriente es transmitida a través del suelo fundido y el grafito se oxida consumiéndose lentamente. En este punto del proceso la temperatura es de 1,450 a 1,600 °C
- Según aumenta el volumen de vidrio formado, los contaminantes no volátiles semivolátiles como metales pesados y radionuclidos quedan atrapados en la red del vidrio (óxido de silicio)
- Los compuestos orgánicos tóxicos que son expuestos a altas temperaturas y bajo nivel de oxígeno se pirolizan. Los productos formados migran a la superficie donde al contacto con el aire se oxidan (combustión)
- Si es necesario se colocan en la superficie del suelo tratado campanas que permiten captar los gases que el proceso genera. Cuando es necesario, se instalan sistemas de tratamiento de los mismos.

2.-Hornos de fundición de vidrio verticales

Este proceso ha sido diseñado para reducir el volumen de desechos, ya sean combustibles o no combustibles, incorporándolos posteriormente a una matriz de vidrio muy estable. Es una adaptación del proceso para la producción de botellas y vidrio plano en un horno de fundición tipo *Vermel*.

Los residuos se alimentan a una tina de vidrio fundido, la cual se mantiene entre 1,000 a 1,200 °C mediante la aplicación de un potencial eléctrico que genera una corriente entre dos electrodos *Inconel 690* ubicados en posiciones extremas del recipiente. Bajo estas condiciones de temperatura, los compuestos orgánicos presentes se oxidan y volatilizan. Los gases son captados y se enfrían, mientras que los componentes no volátiles quedan atrapados en la matriz de vidrio.

El material vidriado se puede moldear para formar bloques que pueden ser utilizados en sistemas de construcción convencional.

3.-Horno de fundición de vidrio horizontal

Los residuos se colocan en recipientes móviles que atraviesan un horno con forma de un túnel, el cual es calentado eléctricamente mediante electrodos colocados a lo largo de las paredes y alimentado con vidrio fundido. El medio contiene oxígeno por lo que el horno funciona como incinerador. Las operaciones que se realizan en este proceso son las siguientes (Freeman, *op. cit*):

- Los contaminantes orgánicos son oxidados en el baño de vidrio a una temperatura de 1,200 °C
- El material particulado que se forman durante la oxidación es recolectado a la salida de horno; y lo gases se filtran y envían a la atmósfera
- Los contaminantes de naturaleza inorgánica, como metales pesados, son atrapados en la matriz de vidrio, que es retirada periódicamente.

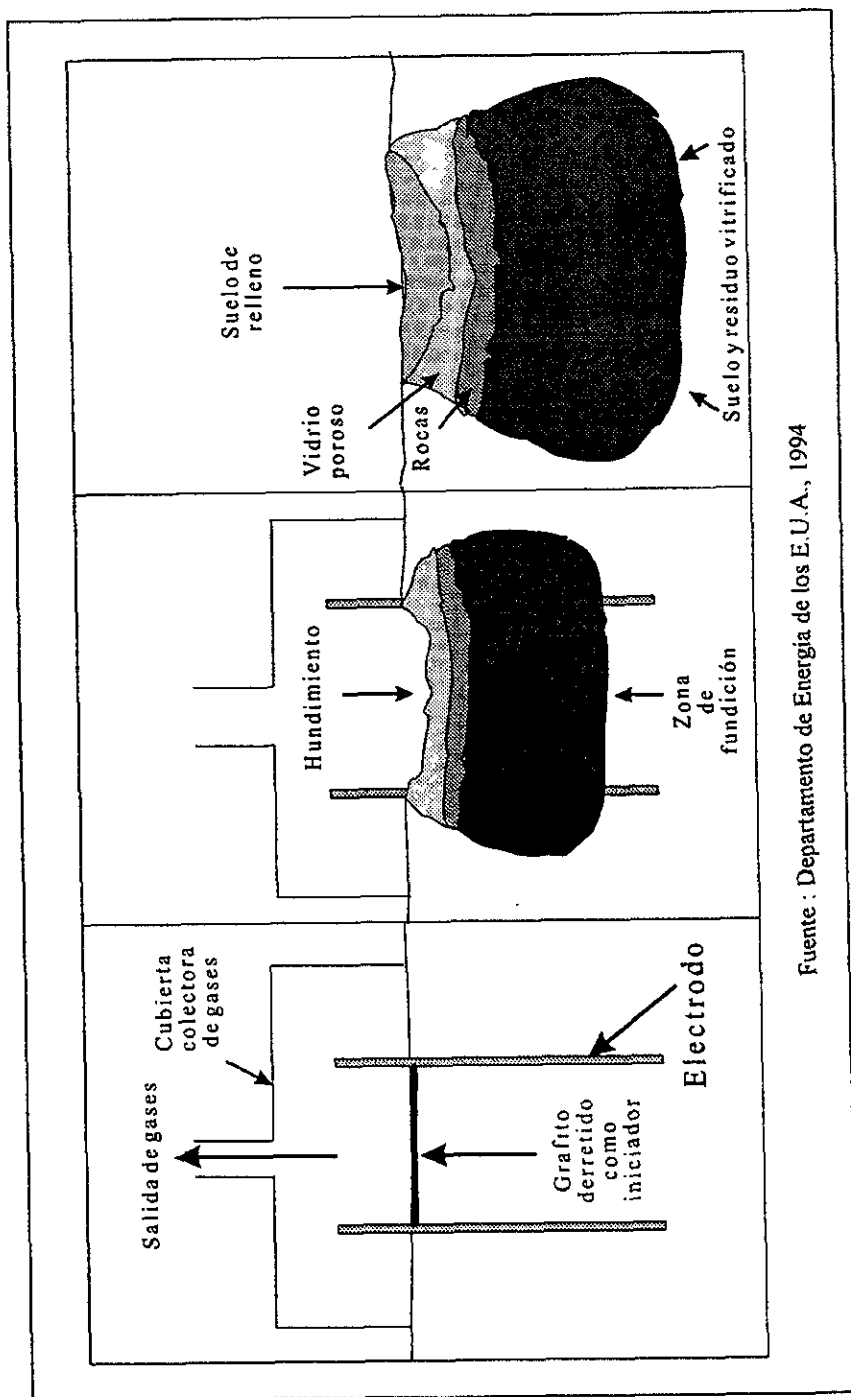
Como en la tecnología antes descrita este material vidriado también se puede moldear para formar bloques que pueden ser utilizados en sistemas de construcción convencional.

Tipos de residuos posibles de tratar

De acuerdo con el Departamento de Energía de los E.U.A. (Department of Energy of U.S.A, 1994), los residuos que pueden ser “*destruidos*” por este proceso, son:

- Sólidos que contienen elementos potencialmente tóxicos como metales pesados,
- Cenizas provenientes de la incineración de residuos sólidos municipales y/o peligrosos,
- Radionuclidos,
- Compuestos volátiles,
- Líquidos orgánicos de bajo peso molecular,
- Suelos contaminados por bifenilos policlorados o compuestos clorados.

Figura 5.4 Diagrama del proceso de vidrio fundido (Molten Glass Process) *In Situ*



Fuente : Departamento de Energía de los E.U.A., 1994

5.6.2 Consideraciones

Efluentes

Básicamente los efluentes son CO₂ y vapor de agua. Sin embargo en el caso de tratarse residuos clorados, se generan trazas de ácidos clorhídrico, el cual es tratado posteriormente

Ventajas de proceso Molten Glass

- El volumen original del residuo se reduce hasta en un 98%
- Las eficiencias de remoción son del 99.97 al 99.999 %
- Se puede aplicar a un gran variedad de residuos, incluyendo materiales radiactivos ya sean sólidos o líquidos
- El material de vidrio en que quedan atrapados los contaminantes que no se gasifican, es muy estable (difícil de intemperizar), impermeable y durable.
- El material de vidrio puede ser utilizado para construir bloques sólidos para construcción
- El material de vidrio por su alta estabilidad y baja reactividad, no requiere ser confinado ni sujeto a ningún mantenimiento
- El equipo de tratamiento es versátil y móvil, por lo que puede ser transportado a las zonas contaminadas, disminuyendo costos y riesgos asociados al transporte de materiales peligrosos.

Limitantes del proceso Molten Glass

- Los costo de operación y mantenimiento son altos
- Se consume grandes cantidades de electricidad, por lo que se debe considerar el costo ambiental asociado a la generación de la energía
- Estas técnicas destruyen los materiales naturales, como es el caso de los suelos (arcillas y materia orgánica).

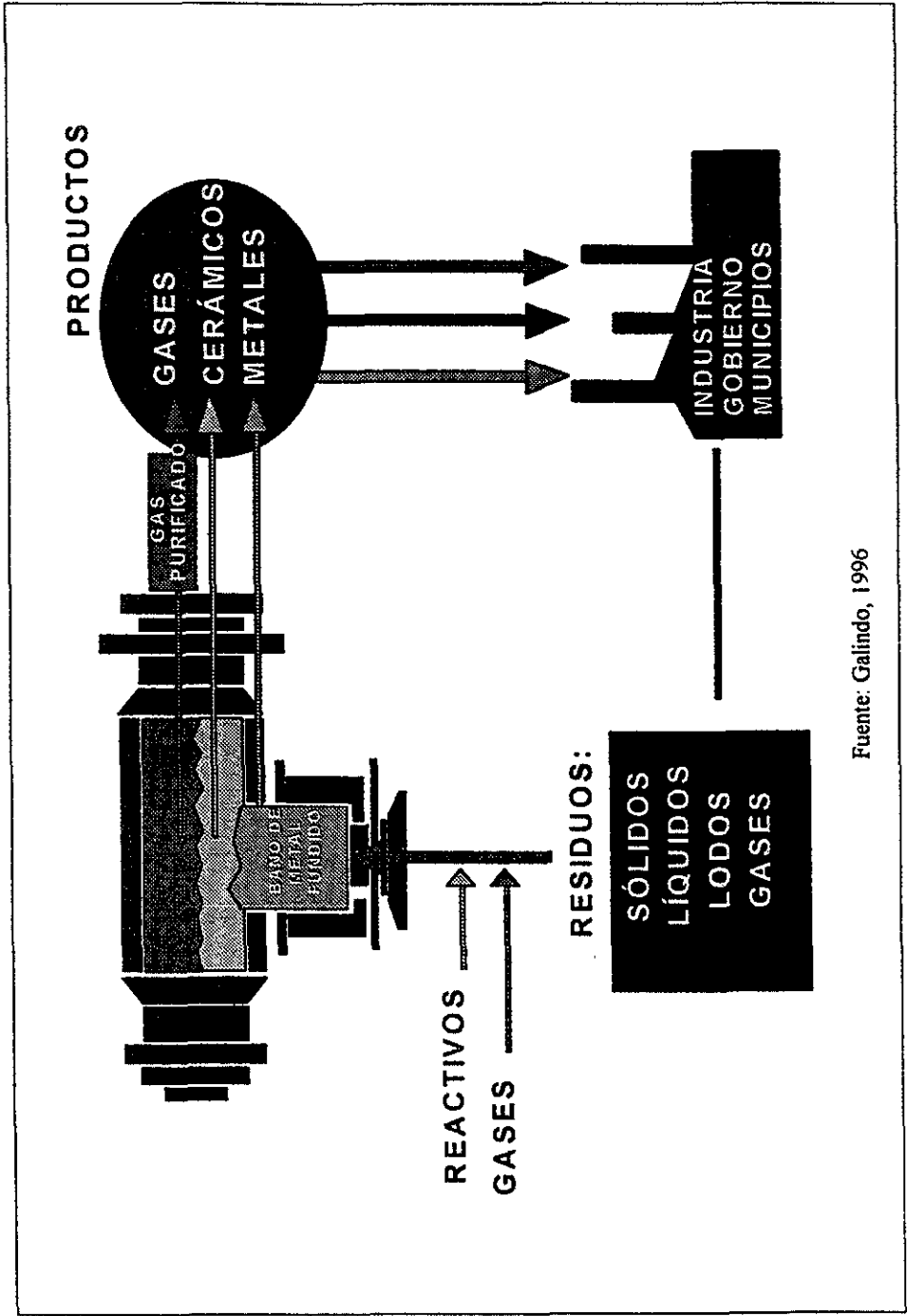
5.7 Pirólisis con metal fundido (Molten Metal Process)

La compañía Molten Metal Technology Inc, ha desarrollado las tecnologías denominadas CEP y QUAMTUM CEP, para el reciclaje y destrucción de residuos peligrosos, permitiendo su transformación en materias primas (orgánicos, inorgánicos y metales), sin presentar ningún impacto ambiental negativo de importancia, excepto el gasto energético (EPA, 1994).

5.7.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

Este proceso pertenece a la categoría de procesos de pirólisis a baja presión y altas temperaturas. El principio del proceso se basa en un baño de metal fundido, como por ejemplo de cobre, hierro o cobalto, que se mantiene a temperaturas de 1,650 °C. Bajo estas condiciones los residuos orgánicos se descomponen y el material inorgánico de alto punto de fusión forma una escoria (**Figura 5.6**).

Figura 5.6 Diagrama del proceso de metal fundido (Molten Metal Process)



Fuente: Galindo, 1996

Descripción del proceso

- El metal se calienta mediante una corriente eléctrica transmitida por el electrodo que se encuentra sumergido en el baño
- Los residuos se introducen en el fondo del baño donde se descomponen formando moléculas de bajo peso o átomos que se recombinan
- Los gases formados son enviados a una cámara para completar su oxidación y remover los vestigios de sólidos que han sido arrastrados. Principalmente se forman CO, H₂ y vestigios de CO₂, pero dependiendo de las condiciones de reacción puede generarse otros productos, por ejemplo gas de síntesis
- Los componentes inorgánicos de los residuos forman una escoria fundida que flota en la superficie del baño de metal líquido, por lo que puede ser removida.

Tipos de residuos posibles a tratar

Esta tecnología puede aplicarse a una gama muy amplia de residuos sólidos, líquido, lodos y gases como: lodos de perforación de pozos petroleros, cortes de refinación de petróleo, catalizadores agotados, metales pesados, cenizas provenientes de combustión, lodos, de plantas de tratamiento, mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos y otros (EPA, 1994-a).

5.7.2 Consideraciones

Actualmente, la compañía Molten Metal Technogy Inc. que esta comercializando su tecnología como un procesamiento de extracción catalítica, informó que la EPA la aceptado como una tecnología de prevención, reciclamiento y destrucción de residuos peligrosos y no peligrosos.

En nuestro país, la compañía Celanese Mexicana, planeó construir un sistema para reciclamiento de residuos peligrosos y no peligrosos de la zona del sureste de México utilizando esta tecnología. Se pensó ubicar la instalación en el estado de Veracruz, específicamente en el complejo petroquímico la "Cangrejera". La construcción sería realizada por Celanese y la operación quedaría a cargo de la compañía Molten Metal. El sistema de procesamiento de extracción catalítica, sería capaz de tratar y reciclar 50,000 toneladas por año de residuos petroquímicos, y el gas de síntesis sería utilizado por Celanese. De no haber sido por problemas derivados del rechazo de grupos ecologistas que consideraron que era un incinerador y de las industrias vecinas que planeaban el uso de otras tecnologías, esta instalación de acuerdo a Celanese podría haber iniciado sus operaciones a finales de 1997 (Galindo, 1996).

Sin embargo, en 1997 la empresa estadounidense se declaró en quiebra, posiblemente por la competencia que representan otras opciones menos limpias pero más baratas como el confinamiento y la incineración tradicional.

Ventajas del proceso Molten Metal.

- Es aplicable a una amplia gama de desechos orgánicos e inorgánicos
- No requiere una unidad de postratamiento, como en un proceso de combustión
- Se generan materias primas, los cuales pueden ser utilizados por la industria.

- Permite transformar los desechos en materias primas, con lo cual se logra a nivel regional, implementar sistemas de ciclos cerrados .

Limitantes de proceso Molten Metal

- Altos costos de operación
- Altos gasto de energía, principalmente electricidad

5.8 Proceso de arco de plasma

Los equipos de arco de plasma han sido utilizados por décadas en la industria, como en procesos metalúrgicos, síntesis de materiales etc. (Freeman, 1989). En años recientes esta tecnología ha sido aplicada para tratar residuos peligrosos, ya que se alcanzan temperaturas de 2,000 a 10,000°C (3,632-18,032 °F). La compañía Rotech, Inc. ha sido el líder en el desarrollo de este tipo de equipo.

5.8.1 Fundamentos teóricos y descripción del proceso

El término plasma se refiere a un estado en que las partículas subatómicas negativas (electrones) quedan liberadas de la atracción de los núcleos, generando un mar de electrones lo que se conoce como el cuarto estado de la materia -plasma-, ya que sus propiedades son diferentes a las de los gases, líquidos o sólidos comunes. Para lograr este estado, el método más común consiste en generar descargas eléctricas sobre un gas, el cual absorbe la energía activando sus moléculas y formando iones que liberan electrones que son los que forman el mar de electrones (Freeman, *op cit*).

Bajo estas condiciones, los enlaces de las sustancias que forman los residuos se rompen, convirtiéndose a elementos y recombinándose en moléculas de bajo peso molecular, como H₂, CO, CO₂ y HCl.

Descripción del proceso

Se han diseñado equipos de arco de plasma para la destrucción de residuo líquidos (Figura 5.7). Estos constan de un sistema de alimentación de residuo líquidos, el arco de plasma, reactor, un scrubber, línea de control y monitoreo, y posquemador. El proceso lleva las siguientes pasos (Rotech, 1992).

- El gas (generalmente argón o neón) es introducido al horno y bombardeado con descargas eléctricas generadas por los dos electrodos, logrando el estado de plasma (en el reactor centrífugo solo emplea un electrodo)
- El residuo es alimentado al reactor en una relación adecuada, por ejemplo de 4 kg./min. o 211.2 l/min.
- En el plasma, la energía de los electrones es transferida a los residuos que han sido introducidos al reactor.

- Bajo estas condiciones los residuos son pirolizados
- De acuerdo a su naturaleza química los compuestos orgánicos de bajo peso molecular forman gases que pasan a un filtro donde son retenidos los vestigios de sólidos particulados que han sido arrastrados
- Posteriormente, los gases se envían a una segunda cámara donde se completa la oxidación formando principalmente vapor de H_2O y CO_2
- Las emisiones pasan a una cámara de limpieza antes de ser emitidos a la atmósfera.
- Los materiales que no se volatilizaron son colectados en una cámara, donde al enfriarse se forman sólidos.

Los hornos de arco de plasma han sido desarrollados, principalmente, para la recuperación de los metales contenidos en los desechos de las fundidoras.

Los hornos de arco eléctrico pueden tener dos electrodos independientes o ser de los conocidos como de arco transferido, en los cuales el metal fundido funciona como electrodo. Existen una variedad relativa, de las capacidades de los hornos, las cuales van desde 60 kg. a 45 ton/hora, este último, con un consumo de energía de 500-750 KW (Ondrey, 1991).

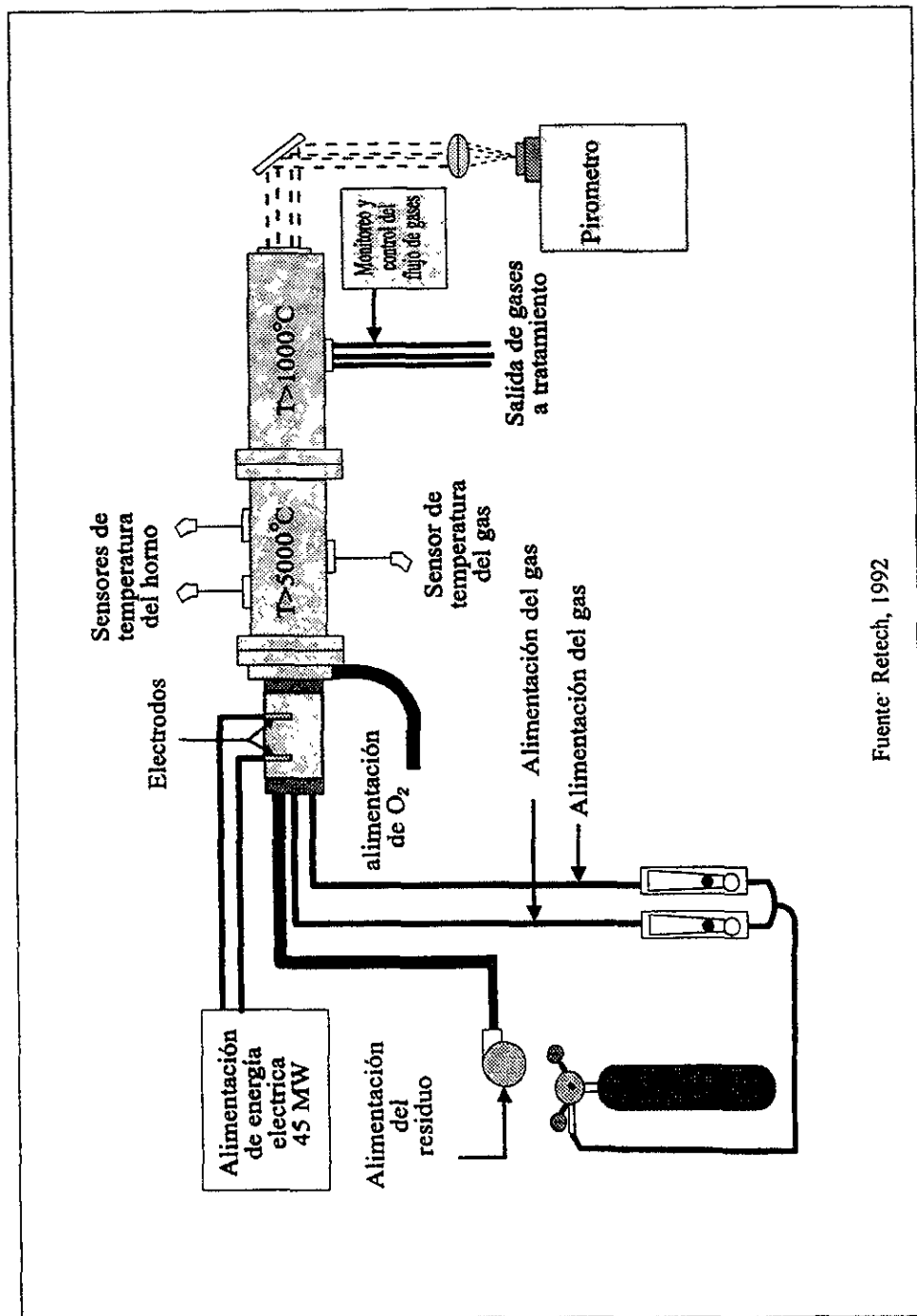
Tipos de residuos posibles de tratar

- Esta tecnología ha sido aplicada para tratar con gran éxito a desechos hospitalarios, sólidos mezclados, líquidos orgánicos, bifenilos policlorados, suelos contaminados con aceites y asfaltenos. La eficiencia de la destrucción reportada de los bifenilos y CCl_4 es de hasta el 99.999999 % (Ondrey, *op. cit.*)

5.8.2 Consideraciones

Los procesos de arco de plasma también pueden ser aplicados para la destrucción de compuestos procedentes de tratamientos físicos y químicos, como la hidrólisis. Los hornos empleados en este tipo de proceso, pueden a su vez manejar desechos que se encuentran en estado sólido. Los gases producidos se encuentran a una temperatura menor que el plasma, debido a que la reacción que ocurre es endotérmica. Para cumplir con las legislaciones vigentes en varios países como E.U.A., los gases obtenidos del proceso pirolítico (reducción) deben ser oxidados en un segundo quemador rico en aire. Si los residuos contenían cloro se forma HCl por la recombinación del hidrógeno y el cloro (como los bifenilos), los gases procedentes de la combustión son tratados (Ondrey, *ibidem*).

Figura 5.7 Diagrama del proceso de plasma



Fuente: Retech, 1992

Ventajas del arco de plasma

- Puede tratar con éxito una gran variedad de residuos sólidos y líquidos
- Altas eficiencia de *destrucción* que alcanzan hasta 99.999999 %
- La materia inorgánica queda vitrificada y estabilizada
- Debido a que el arco de plasma, es un proceso de destrucción térmico en ausencia de oxígeno (pirólisis), no genera dioxinas y furanos como en los procesos de incineración común.
- El equipo y proceso completo es compacto, por lo que potencialmente puede ser un sistema de tratamiento móvil.

Limitantes del horno de plasma

- Los hornos son muy complejos y su operación requiere de un estricto control, así como de un mantenimiento eficaz. Por ejemplo, los electrodos y material refractario tienen que ser cambiados regularmente en periodos cortos
- Los costos son altos
- Requiere de grandes cantidades de energía para generar el plasma
- Debido a que el proceso es muy sensible a muchos factores (repentinos cambios de voltaje, materia y energía) requiere de sistemas de control muy complejos.

6. LIMITANTES DE LAS POLÍTICAS E INSTRUMENTOS PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS

6.1 Políticas e instrumentos

No existe un plan nacional para el manejo de los desechos, pero respecto a los residuos peligrosos (R.P.) se han publicado los siguientes documentos

1. Bases para una política nacional de residuos peligrosos
2. Programa de medio ambiente 1995-2000
3. Programa para la minimización y manejo integral de residuos peligrosos en México 1996-2000

En 1994, el Instituto Nacional de Ecología (INE) convocó a los especialistas de la industria, gobierno y academia, para que participaran en un taller donde se discutiría la política nacional en materia de residuos peligrosos. De este trabajo interdisciplinario surgió el documento denominado "Bases para una Política Nacional de Residuos Peligrosos" (BPNRP, 1994).

En este documento, contiene y describe el inventario de residuos, efectos ambientales del manejo de R.P, marco jurídico y normativo vigente, aspectos institucionales, e infraestructura instalada. Así mismo expone los instrumentos económicos, las perspectivas jurídicas e institucionales, los movimientos transfronterizos y sus consideraciones políticas.

Del BPNRP destacan los elementos de política planteados para el manejo de los residuos peligrosos;

Se propone un sistema de información geográfica (SIG) para localizar la infraestructura de manejo de RP y se señala claramente que deben considerarse aspectos políticos y sociales:

"Un sistema de información geográfica (SIG) para la localización de infraestructura de manejo de residuos peligrosos, proponiendo tomar en cuenta los aspectos del medio físico (geología, edafología, climatología, meteorología hidrogeología y sismología); los asentamientos humanos, tendencias del desarrollo urbano y aspectos políticos y sociales; capacidad de asimilación de los sistemas biofísicos y presiones ambientales preexistentes y cercanía a fuentes generadoras y costos de transporte" (pág. 13)

Asimismo, se indica la necesidad de establecer :

1. Centros de información y seguimiento tecnológico
2. Procedimientos de certificación tecnológica
3. Marco legal
4. Programas de educación y capacitación de recursos humanos
5. Sistema de inventario de generación de RP
6. Evaluación del efecto ambiental del manejo de RP

7. Organización institucional para aspectos de vigilancia, control, sanciones, regulación, autorizaciones, seguros, garantías financieras, instrumentos económicos, importación de RP, etc.
8. Sistemas para el mantenimiento del inventario, validación y cumplimiento

Posteriormente, la Semarnap publicó el Programa de Medio Ambiente 1995-2000 (PMA), p derivado de la *Ley de Planeación* y del *Plan de Nacional de Desarrollo 1995-2000*, y cuyo objetivo principal es (pág. 77):

“Frenar las tendencias del deterioro del medio ambiente, los ecosistemas y los recursos naturales y sentar las bases para un proceso de restauración y recuperación ecológica que permita promover el desarrollo económico y social de México, con criterio de sustentabilidad”

Los aspectos más relevantes relacionados en materia de R.P del PMA se establecen en los instrumentos para la política ambiental en su punto 7 “Reducción y manejo seguro de residuos peligrosos que establece como metas (pág. 121):

- “Promover la minimización de la cantidad de residuos peligrosos y los riesgos inherentes a su manejo, incentivando cambio hacia procesos y tecnologías cada vez más *limpios*.
- Reducir el impacto ambiental atribuible a los residuos peligrosos, en lo que respecta a los acuíferos, suelos, riesgo, salud y cadenas tróficas.
- Fomentar la recuperación de materiales secundarios así como de insumos y energéticos que eviten agotamiento de recursos naturales.
- Incrementar la oferta de sistemas e infraestructura de manejo adecuado de residuos peligrosos.
- Controlar y regular eficientemente el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos.
- Lograr una concurrencia ordenada entre federación estados y municipios en el manejo de residuos peligrosos
- Atención y cumplimiento de compromisos internacionales.”

El mismo documento establece las prioridades en el manejo de residuos de acuerdo a la siguiente estructura (pág. 122):

- ◆ Prevención
- ◆ Reducción
- ◆ Reciclaje
- ◆ Tratamiento
- ◆ Disposición

y retoma los elementos de política expuestos por en el BPNRP (1994), denominadas como las estrategias proyectos y acciones prioritarias (PMA 1995, pág. 123-127), sin embargo adiciona la estrategia de “Promoción de infraestructura y servicios integrales para el control de residuos peligrosos.”

Este último punto tiene como acciones prioritarias (PMA, *ibidem*):

- “Promoción para la creación de Centros Integrales para el Tratamiento y Confinamiento de Residuos Peligrosos con el objeto de controlar alrededor del 50 % de los R.P generados en el país para el año 2000.”
- “Promoción para la creación de infraestructura y servicios para el Control de Residuos Biológicos-Infeciosos...”
- “Exportación de bifenilos policlorados par su tratamiento y disposición final, con la expectativa de logra su eliminación para el año 2000.”

y para complementar la Promoción de la infraestructura y servicios integrales para el control de residuos peligrosos, el PMA establece en su punto 8 Promoción de infraestructura ambiental y diversificación productiva (pág. 128), como meta relacionada a los R.P:

“Promoción de la inversión privada y pública en infraestructura y bins de capital para la gestión ambiental en materia de residuos, descargas y emisiones.”

El Programa para la minimización para el manejo integral de residuos industriales en México 1996-2000 (PROMI), es una derivación del Programa de Medio Ambiente 1995-2000 y señala que su objetivos son (pág. 103):

- ◆ “Asegurar el manejo adecuado de más de la mitad de los de los residuos Industriales Peligrosos al año 2,000 y sentar las bases para una ampliación progresiva de esta cobertura.
- ◆ Promover la minimización ene la generación de los Residuos Industriales Peligrosos y en los riesgos inherentes a su manejo, incentivando cambios hacia procesos y tecnologías cada vez más limpias.
- ◆ Fomentar la recuperación de materiales e insumos secundarios en contexto de eficiencia económica y ambiental, así como de conservación de los recursos naturales
- ◆ Promover la valorización y el manejo de los residuos como componente fundamental del sector ambiental de la economía.
- ◆ Inducir la integración de nuevas cadenas productivas tanto para residuos con alto valor comercial en el mercado, como para materiales secundarios producto del tratamiento de aquéllos.”

De acuerdo al mismo documento los instrumentos para lograr alcanzar estos objetivos son (págs. 108-111):

1. “La regulación directa de materiales y residuos peligrosos y riesgo
2. Evaluación de impacto ambiental
3. Estudios de riesgo
4. Normatividad
5. Información
6. Concertación y concurrencia
7. Instrumentos económicos
8. Inspección y vigilancia”

y las estrategias, proyectos y acciones del programa son (115-165) :

- ◆ “Minimización de residuos en empresas industriales
- ◆ Fortalecimiento del marco jurídico y normativo
- ◆ Atención a zonas, ramas industriales y corrientes críticas
- ◆ Cumplimiento de la ley y vigilancia eficiente
- ◆ Modernización de la regulación directa
- ◆ Desarrollo de sistemas de información y rastreo de residuos peligrosos
- ◆ Promoción de la inversiones en servicios de infraestructura
- ◆ Capacitación y comunicación
- ◆ Capacitación internacional
- ◆ Cooperación internacional”

En 1996, como consecuencia del PROMI, se modificó la Ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, para transferir la responsabilidad del manejo de los residuos sólidos (municipales e industriales) no peligrosos fue conferida a los municipios mientras que el control de los residuos industriales clasificados como peligrosos; junto con el tratamiento de los biológicos-infecciosos quedó a cargo de las autoridades ambientales federales. El artículo 8, fracción IV de la LGEEPA indica lo siguiente:

“Corresponde a los municipios de conformidad en lo dispuesto en esta ley y las leyes locales” ...”la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.”

Sin embargo, el PMA y la LGEEPA no contemplan ningún instrumento para proveer a los municipios de la recursos materiales y humanos necesarios.

A pesar de que el BPNRP, el PMA y PROMI detectan una falta de un inventario de R.P a nivel nacional, no se ha hecho este instrumento, ya que las cantidades reportadas por los documentos antes citados, corresponden a estudios parciales en la medida en la aplican a sectores o regiones específicos. Y ninguno de estos documentos proponen los mecanismos para crear un modelo para generar este inventario.

El PMA (pág. 122), establece que la mayor prioridad en el manejo de R.P es prevenir la generación, pero considera que es más viable establecer en la industria nueva. Sin embargo el PROMI (pág. 98), cambia las prioridades en el manejo de R.P. (ver capítulo 3).

El marco legal de México, aparte de ser limitado se basa en experiencias de los países desarrollados en donde las normas se establecieron tomando en cuenta las condiciones propias de cada país, especialmente se consideró el desarrollo científico-técnico y los factores físicos, biológicos y socio-económicos (condiciones geográficas regionales). Por lo tanto, su validez es temporal y su uso no puede generalizarse (globalización), sin antes modificarlo y adaptarlo. Especialmente, es difícil aplicar normas importadas de países que presentan condiciones geográficas muy diferentes; o considerar sus mismas prioridades ambientales.

Las normas actuales se restringen a la definición de los propios residuos, a pruebas para determinar su toxicidad e incompatibilidad y a ciertos requisitos para el diseño y operación del confinamiento". (Cuadro 6.1) . "La política de manejo de residuos peligrosos significa reorientar procesos industriales, crear nuevas actividades y mercados, lo cual se da en una interfase entre la política ambiental y la política industrial, lo que exige un requisito de coordinación estrecha entre ambas, que aún no se satisface plenamente. ." (BPNRP 1994, pág. 5). Además, estas normas no establecen criterios y procedimientos para la restauración de sitios contaminados, tampoco se han definido criterios que establezcan niveles óptimos... "la frontera entre lo que es un residuo peligroso y otro que no lo es, puede ser bastante difusa" (BPNRP, *ibidem*).

Cuadro 6.1 Normas relacionadas con el manejo y disposición de residuos

Norma	Objetivo	Aspecto esenciales
NOM-052-ECOL-1993, establece las características, el listado y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	Determinar cuales residuos deben considerarse peligrosos. dar a conocer un listado de los mismos y un listado de los componentes tóxicos y de sus concentraciones máximas permitidas	Se tomará como base para determinar la peligrosidad o no peligrosidad de los residuos que éstos se encuentren comprendidos en los listados de la NOM Las características CRETIB del residuo se obtiene al hacer un análisis físico, químico, biológico con forme al inciso 5.5 de la norma
NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	Dar a conocer el procedimiento oficial para preparar las muestras de los residuos que se someterán al análisis para determinar los constituyentes que hacen a un R.P. por su toxicidad	Se toman dos muestras representativas del residuo, en los términos que marca la NOM aplicable. La primera muestra se emplea para las pruebas preliminares; la segunda se utiliza para la prueba de extracción

Continúa Cuadro 6.1

Norma	Objetivo	Aspecto esenciales
NOM-054-ECOL-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993	Esta norma pretende un mecanismo que permita identificar fácilmente cuándo dos o más residuos no deben mezclarse, ya que pueden ocasionar daños a la salud y al ambiente.	Para determinar la incompatibilidad entre los R.P. se incluyó a estos en diversos grupos reactivos en listados en los anexos de la norma y se elaboró un código de reactividad que describe la consecuencias de que dichos grupos de residuos reaccionan entre sí. Con base en esa información se construyeron tablas de incompatibilidad en las que se puede consultar el comportamiento de pares de grupos reactivos en las casillas en la que éstos se interceptan
NOM-055-ECOL-1993, establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos excepto los radioactivos	Sentar las bases para una elección adecuada de los sitios que serán destinadas a confinamientos controlados de R.P. (excepto los radioactivos). Con el fin de reducir los riesgos al ambiente	Los requisitos que deben reunir el sitio destinado a confinamiento controlados son: geohidrológicos, hidrología superficial, ecológicos, climáticos, sísmicos topográficos
NOM-056-ECOL-1993, establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos	Identificar las instalaciones, áreas, servicios, y otros elementos con los que deben contar los confinamientos controlados de R.P. para su operación adecuada y dar a conocer los requisitos para su diseño y construcción	Áreas de acceso, y espera, Cerca perimetral y de seguridad, caseta de vigilancia, caseta de pesaje y báscula, laboratorio, caminos, área de mantenimiento temporal, área de emergencia temporal, área de limpieza, drenaje, etc.
NOM-057-ECOL-1993, establece los requisitos que deben observar en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos	Determinar los requisitos para el adecuado diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para R.P., con el fin de evitar en lo posible contaminación de los mantos freáticos, así como del ambiente en general	Celdas, sólo se depositan los R.P., en listados en la NOM-052-ECOL-1993, sistemas de captación de lixiviados, sistemas de venteo, cubierta, operación, equipo de protección.
NOM-058-ECOL-1993, establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado para residuos peligrosos	Determinar los requisitos para operar un confinamientos controlado de R.P. con fin de contar con un adecuado sistema de control y registro, así como con las especificaciones necesarias par su disposición en dicho sitio	Registro, operación, pesaje, análisis, tratamiento, asignación del área y celdas de confinamiento, cierre de celdas, monitores obras complementarias.

6.2 Tecnológicas

Hasta 1996, las únicas opciones técnicas que se consideraban viables para el manejo de RP eran su incineración o confinamiento. Sin embargo tanto el PMA (1995) como el PROMI (1996), han establecido los lineamientos para fomentar la infraestructura para la implantación los "Centros Integrales para el Manejo de Residuos Industriales" (Cimari); en donde se estima que únicamente se confinarán el 15% de los desechos que se reciban. En la práctica, los inversionistas están considerando a los Cimari como confinamientos controlados análogos a los que funcionan en E.U.A. y México desde hace varios años, en los cuales la valorización de los residuos es muy limitada (PROMI, 102). Por ejemplo se preparan combustibles alternos, y se emplean las operaciones unitarias tradicionales para recuperar y tratar estas sustancias, y se lleva la recuperación de materiales tradicionalmente reciclables.

A pesar de que BPNPR (1994), ha detectado la carencia de un instrumento que permita realizar certificación tecnológica de los tratamientos y tecnologías ha emplearse en nuestro país. Se sigue empleando tecnologías que se utilizan otros países, a pesar de una diferencia geográfica tecnológica y cultural. Por ejemplo, en estos momentos se quiere tratar a todos a los suelos con métodos biológicos sin importar la naturaleza del residuo ni las reacciones que han ocurrido. Esta situación crea un mercado distorsionado que aunado a la falta de difusión ha limitado el uso de tecnologías "limpias" en México. En cuadro 6.2 se presentan los costos aproximados de los procesos descritos en los capítulos 4 y 5 ; en el cual se observa que las tecnologías limpias, como la pirólisis, son más baratas que la incineración o confinamiento, por lo que no ha sido el factor económico el que ha limitado su establecimiento en México.

Cuadro 6.1. Comparación en los costos de tecnologías y procesos para el manejo de residuos peligrosos

Tecnología	Costos aproximados (dólares/tonelada)		Observaciones
	México	E.U.A	
Reciclaje de energéticos (líquidos en general incluyen disolventes)	25- 40 ¹	84-350 ¹	Operan 6 cementeras en el país
Tratamientos físicos y químicos: neutralización ácidos y bases cianuros y metales pesados	15-50 ¹ 200-250 ¹	35-140 ¹ 105-1,120 ¹	Operan 22 empresas en el país
Tratamientos biológicos	N.D.	80-1,000 ²	Operan plantas en E.U.A y Canadá
Incineración	N.D	560-1,190 ¹	Los incineradores en México, pertenecen a compañías privadas
Confinamiento: 1. tambor 2. granel	70-100 ¹ 45-60 ¹	245-350 ¹ 84-140 ¹	Operan 2 confinamientos en el país
Pirólisis	*	40-80 ³	Algunas plantas operan en E.U.A
Oxidación con aire húmedo	*	150-200 ⁴	Algunas plantas operan en Europa y E.U.A
Oxidación con agua a condiciones supercríticas	*	250-1280 ⁵	Algunas plantas operan en E.U.A

Continua Cuadro 6.1

Tecnología	Costos aproximados (dólares/tonelada)		Observaciones
	México	E.U.A	
Reducción en fase gas aplicado exclusivamente a bifenilos policlorados	*	400 ⁶	Plantas operan en Canadá, E.U.A., Australia y Japón
Molten Glass process	*	160-330 ⁷	Plantas operan en E.U.A.
Molten Metal Process	*	N.D	Algunas plantas operaban en E.U.A.
Arco de plasma	*	300 ⁸	Plantas operan en E.U.A., Alemania, Francia, Suiza, Brasil

N.D : no disponible

* No existe comercialmente en México

1. Semarnap. 1996. "Programa de minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México 1996-2000". pag 70.
2. Ear Corp. Environmental. 1996. Canadá
3. Union Nature Company. 1997. E.U.A
4. Baillod, C.R. 1985. E.U A.
5. More. 1994. E.U.A
6. Eli Eco Logic International Inc 1996 Canadá
7. Buelt. 1985. E.U.A.
8. Ondrey. 1991. E U.A.

6.3 Propuesta de solución

1. Establecer un plan nacional para el manejo de desechos
2. Los sistemas de manejo integrales planteados por tanto por el PMA(1995) y el PROMI (1996), deben planearse con base en las consideraciones siguientes :
 - Un desecho no es más que un material que perdió su valor por condiciones temporales de carácter técnico, económico, cultural, o de cualquier otra índole; pero que puede recuperar su valor cuando las condiciones iniciales cambian;
 - la peligrosidad es un concepto relativo, ya que los desechos únicamente son peligrosos cuando alteran un equilibrio de la biota o de ésta con el medio abiótico, superando la capacidad amortiguadora del sistema y disminuyendo su potencial para sustentar la vida (Gutiérrez, 1996),

- todos los desechos industriales, hospitalarios y de servicios cuya composición no corresponde a la basura doméstica deben llamarse especiales
- los tres parámetros que determinan la peligrosidad son: naturaleza química, cantidad y disposición-manejo. El primer parámetro es de carácter intrínseco y los otros dos extrínsecos;
- la naturaleza química⁴ de una especie determina su estado la disponibilidad en el medio natural y su interacción con el medio abiótico o especies vivas, pero el riesgo depende también de la cantidad del contaminante y su manejo y disposición. Se debe considerar que una prueba de laboratorio (CRETIB) no es suficiente para clasificar un desecho como peligroso;
- los cambios culturales son más lentos que los económicos. En México la cultura que impera es la agrícola y solamente en algunas regiones la población responde a patrones industriales, por lo que se deben tomar en cuenta los factores sociales y económicos involucrados.
- Los sistemas de manejo no deben basar su viabilidad económica en el cubro de cuotas (la población y los municipios tienen ingresos muy limitados) o en la comercialización de los desechos que tradicionalmente han sido recolectados por los trabajadores informales de la basura (pepenadores), pues se afecta la economía de la población marginal que vive de ellos; sino en la valorización de aquellos residuos que hasta ahora se confinaban utilizando nuevas tecnologías (limpias);
- Los sistemas no deben plantear como esencial la separación previa (por parte del generador) ya que en los países donde se ha impuesto, ha demostrado ser una actividad ineficiente y de alto costo, y las tecnologías actuales de valorización no lo requieren. En las nuevas instalaciones se debe mantener la separación manual y organizar la recolecta acorde con las necesidades de las tecnologías y del mercado.

⁴ Pueden ocurrir reacciones dentro de los organismos (toxicidad) o con el ambiente (ácido-base, hidrólisis, oxido-reducción, etc cuyos efectos pueden deberse a cambios físicos (ondas de choque, aumentos de temperatura, acumulaciones en órganos, etc.) o cambios químicos en las biomoléculas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las tecnologías recomendadas para manejar los residuos peligrosos en los centros integrales son las siguientes

Procesos reductores

- Pirólisis para hidrocarburos y derivados (plásticos, pinturas, disolventes, residuos de petróleo, etc.), basura municipal con excepción de la proveniente de jardines y mercados. También puede aplicarse a caucho, llantas, materiales que contienen sales y metales, desechos que contienen metales que se volatilizan a bajas temperaturas.
- Reducción en fase gas (proceso Eco logic) para bifenilos policlorados y compuestos clorados, suelos contaminados con hidrocarburos o plaguicidas etc.

Procesos oxidantes

- Oxidación con aire húmedo, para residuos que tienen altos contenidos de agua y elementos abrasivos, sales solubles.
- Oxidación con agua a condiciones supercríticas a residuos que contienen elementos como flúor, fósforo, cloro, azufre. Se emplea en aguas contaminados con hidrocarburos, mezclas de residuos inorgánicos y orgánicos como sales y metales pesados, desechos farmacéuticos caducos.
- Para metales no reactivos su recuperación por procesos térmicos o hidrometalurgicos que cuenten con equipos ambientales de alta calidad. Tecnologías como el metal fundido (Molten Metal Process) y arco de plasma, pueden ser aplicados a contenedores metálicos de bifenilos policlorados, residuos con altos contenidos de metales.

Tratamientos fisicoquímicos

- Para materiales inorgánicos que no sean sales solubles, se recomiendan procesos físicos y químicos, como reducciones, oxidaciones, hidrólisis, neutralización, etc. para transformarlos a especies termodinámicamente estables o reutilizables. Para sales solubles es necesario prever su recuperación, mediante el uso de las operaciones unitarias como la evaporación, secado, cristalización, etc.
- Para materiales con propiedades radiactivas es necesario lograr su dilución y encapsulamiento a través de procesos de vitrificación (Molten Glass Process).

Para metales reactivos es necesario estabilizarlos y posteriormente procesarlos como materiales inorgánicos. El proceso de vidrio fundido, es uno de los tratamientos mas recomendados para que se traten estos residuos

Tratamientos biológicos.

- Materiales que contienen sustancias orgánicas oxidadas (alcoholes, aminas, ácidos) y que estén libres de otros contaminantes se recomiendan procesos biológicos, especialmente para materiales sólidos, el composteo. Debe contarse con los recursos materiales y humanos que permitan aplicar la composta a suelos agrícolas, en caso contrario no es una técnica adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). 1995. Anuario Estadístico de la Industria Química. 18 pp. México.
2. Becerril, A. J.; Navarrete, R. M. E. 1993. Recopilación, aplicación y evaluación de las tecnologías de estabilización/solidificación para el tratamiento de residuos peligrosos. Ed. CENAPRED. 2-21, 89-93 pp. México.
3. Berglund, R.L., Lawson, C.T. 1991. Preventing pollution in chemical process industries. Chemical Engineering. september. 120-127 pp. E.U.A.
4. Brunner, C. R. 1994. Hazardous waste incineration. Second Ed. McGraw Hill Internacional Editions. 69-72, 81-90, 95-105, 106-109, 159-160 pp. E.U.A.
5. Buelt, J.L., FitzPatrick, V.F., Timmerman, C.L. 1985. "Electrical technique for In-place stabilization of contaminated soils" An innovative thermoelectrical process known as *in situ* vitrification may be useful in treating soils contaminated with hazardous wastes. Chemical Engineering Progress. March. 43-48 pp. E.U.A.
6. Canadian Environmental Protection Act. (CEPA). 1988. Acta Canadiense de Protección al Ambiente. parte II: Disposiciones para el control de sustancias tóxicas. Canadá.
7. Ondrey, G., Fouhy, K. 1991. "Plasma arcs sputter new wastes treatment" Chemical Engineering, march. 32-24 pp. E.U.A.
8. Cheresmisinoff, N., Graffia, M. 1996. Safety management practices for hazardous materials. Marcel Dekker, Inc. 237-242 pp. E.U.A.
9. Code Federal Regulations (CFR). 1992. Código de Regulaciones Federales. vol. 40, parte 260, 1992. E.U.A.
10. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. 1996. Resumen Ambiental en Canadá. Leyes y Políticas Generales sobre el Ambiente: Desechos domésticos y desechos sólidos, residuos peligrosos México.
11. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. 1996. Resumen Ambiental en E.U.A. Manejo de desechos: Desechos peligrosos. México.
12. Copa, W. M.; Momot, J. A.; Beula, D.A. 1991 "The application of the wet air oxidation to the treatment of spent caustic liquor" Chemical Oxidation Technologies for the Nineties. Technomic. Publishing Co., Inc. Ed. Eckenfelder, W.W; Bowers, A. R.; Roth, J. A. 299-310 pp. E.U.A.
13. Corbit, R. A. 1990. Standart handbook of environmental engineering. Second edition McGraw Hill Inc. 8.45-8.172, 9.34-9.37 pp E.U.A
14. Cortinas, N. C.; Vega, G. S. Ed. 1993 Residuos peligrosos en el mundo y en México. Serie Monografía No. 3, SEDESOL-INE. 3-7, 30, 239 pp México.
15. Diccionario de la Lengua Española 1992 Vigésima primera edición. Editado por la Real Academia Española España.

16. Documento de la Organización de las Naciones Unidas, UNEP/CHW.2/10/Add.1. 1994 E.U.A.
17. Drobny, N.L. ; Hull, M. E. ; Testin, R.F.(1980). "Recovery and Utilization of Municipal Solid Waste" U.S.P.H.S. Publication No. 1908. E.U.A.
18. Ear Corp. Environmental. 1996. "Alternativas de rehabilitación de sitios contaminados" Centro canadiense de negocios. México.
19. EPA-SEMARNAP. 1995. "Seminario sobre el diseño la operación, y la clausura de verterederos municipales de residuos sólidos". 14-31, 46-55, 132-147 pp. México.
20. EPA. 1994-a. Glossary the terms of environmental. E.U.A.
21. EPA. 1994-b. Review of Industrial Waste. 1-5, 25-30, 38, 45, 57-58 pp. E.U.A.
22. EPA. 1994-c. Site program demonstration Eco logic international gas-phase chemical reduction process Bay city Michigan. Tecnology evaluation report. Ed. Evans, M. G. 1.1-1.4, 3.1-3.45 pp. E.U.A.
23. EPA. 1992. Guides to Pollution Prevention: The Metal Finishing Industry. 1-4 pp. E.U.A.
24. Eyer, C. V. 1994 "Experiencias en el manejo de residuos peligrosos aplicables a condiciones de países en vías de desarrollo". Apuntes curso-taller: Manejo y disposición de residuos peligrosos. UNAM-I.G-PUMA-AMCRESPEC. México.
25. Fernández, V. G. 1994. "Reducción y minimización y tratamientos fisicoquímicos y biológicos". Diplomado en tecnología y administración ambiental, ITESM. México.
26. Freeman, H. M. 1989. Standar handbook of hazardous waste treatment and disposal. McGraw Hill Book. 5.12-5.17, 7.21-7.30, 7.40-7.50, 7.85-7.100, 8.121-8.135, 10.3-10.4, 10.21-10.22, 10.31, 10.45 pp. E.U.A.
27. Fuller, W. H.; Warrick, A W. 1985. Soils in waste treatment an utilization Vol I. CRC Press. 195-221 pp. E.U.A.
28. Funck, D. 1995. "Combustión de residuos orientados al futuro por medio de la utilización de la parrilla de rodillos de combustión de co-corriente". Cuarto congreso de ingeniería ambiental. Bilbao, España.
29. Gaceta Ecológica, número 40, 1996. 40-128 pp. Editado por Semarnap-INE.
30. Galindo, R. 1996. "Proceso Molten Metal". 1er Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos UNAM-F.I-AMCERSPEC. México
31. García, V. C. 1996. "Destrucción térmica de residuos en hornos de cemento". 1er. Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos. UNAM-F.I-AMCERSPEC. México.
32. Gutiérrez, R. M. 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.

33. Gutiérrez, R. M. 1995. "Taller de discusión sobre la NOM -052-ECOL-1993", México.
34. Gutiérrez, R.M. 1996. "Una visión alternativa del manejo de residuos peligrosos". 1er Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos. UNAM-F.I-AMCERSPAC. México.
35. Houser, T. S.; Tsao, C. C. 1991. "Reactions of organic compounds with supercritical water involving". Chemical Oxidation Thecnologies for the Nineties. Technomic. Publishing Co., Inc. Ed. EcKenfelder, W.W.; Bowers, A R.; Roth, J. A. 292-298 pp. E.U.A.
36. Huising, D. 1989. "Cleaner thechnolgy throug process modifications, material substitutions and ecologically based ethical values". Industry and environmental publishep by United Nations Environmental Programme. 12 (1). 4-5 pp. E.U.A.
37. Informe sobre utilización de residuos sólidos y líquidos aplicados como combustibles alternos en hornos de cemento Portland a nivel nacional. 1993. México.
38. Kaiser, E. R.; Friedman, S.B. (1968) "The Pyrolysis of Refuse Components". Combustion, May.,31 E.U.A
39. Kreiner, I. 1994. "Residuos peligrosos caso Alemania". Apuntes curso-taller: Manejo y disposición de residuos peligrosos. UNAM-I.G-PUMA-AMCRESPEC. México.
40. Kye, R. 1996. "Proceso Eco Logic". 1er Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos. UNAM-F.I-AMCERSPAC. México
41. Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (Lafqa), del IGG, UNAM. 1996. Seminario interno de discusión sobre reducción y minimización de residuos peligrosos. México
42. Librizzi, W.J.; Catherine, N.L. Ed. Hazardous Waste Treatment Processes. Manual Practice of Water Pollution Control Federation. 229-235, 257-260, 267-270 pp. E.U.A.
43. Lopez, D. 1994 "Legislación estadounidense sobre residuos peligrosos". Apuntes curso-taller: Manejo y disposición de residuos peligrosos. UNAM-I.G-PUMA-AMCRESPEC. México.
44. López, O. I. J 1995. "Movimientos transfronterizos" Residuos Peligrosos en México. Garfias. A. F.; Barojas, W. L. Ed. INE-SEMARNAP 79-82 pp México.
45. Molten Metal Technology, Inc-EPA. 1996. Technology evaluation report E.U.A.
46. Morales, M. L. M. 1994. "Identificación y selección de sitios para la ubicación de confinamientos de residuos peligrosos". Apuntes curso-taller: Manejo y disposición de residuos peligrosos. UNAM-I.G-PUMA-AMCRESPEC México
47. More, S. ; Samdani, S. ; Ondrey, G. ; Parkinson, G 1994. "New roles for supercritical fluids". Chemical Engineering, march pp. 32-35. E U A
48. Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado del mismo y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad en el ambiente.

49. Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL-1993, que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radioactivos.
50. Norma Oficial Mexicana NOM-056-ECOL-1993, que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
51. Norma Oficial Mexicana NOM-057-ECOL-1993, que establece los requisitos que debe observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
52. Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-ECOL/95, que regula las instalaciones destinadas al tratamiento térmico de materiales y residuos, provenientes de cualquier actividad y sus emisiones al ambiente (anteproyecto).
53. Noyola, A. 1992. "Reporte de análisis de aguas residuales proveniente de tratamiento anaerobio". México.
54. Organisation for Economic Co-operation and Development (OCED). 1995. International Workshop on Waste Minimization: Measurement and Evaluation of Waste Stream. E.U.A.
55. Passos, J. A. L.; Neves, N. M. S.; Ferreira, M. Q. 1991. Handling and processing of hazardous solid from petrochemical industries -Cetrel's Experience-. Waste Science Technology. 24 (12). 93-101 pp. E.U.A
56. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). "Clean Production Programme". 1992. E.U.A.
57. Programa del Medio Ambiente 1995 - 2000 1996. Ed. Semarnap. México
58. Programa para la minimización y manejo de residuos peligrosos en México 1996-200. 1996 Ed. Semarnap. 43-46, 97-100 pp. México.
59. Residuos. 1993. Revista técnica III (6). 60-63 pp. España.
60. Retech. 1994. "Plasma afterburner for treatment of effluents from solid-wastes processing". E.U.A.
61. Reyes, M. C. 1994 "Identificación, caracterización y cuantificación de residuos especiales". Diplomado en tecnología y administración ambiental. ITESM-AMCRESPEC. México
62. Richard, N. L. A 1995. Reform or Reaction. EPA-at a Crossroads Environmental Science & Technology. 29 (11). 504A-510A pp E U.A.
63. Rittmeyer, R. 1991. Waste minization part 1 "Prepare an effective pollution-prevention program". Chemical Engineering Progress. May, 56-62 pp E U A
64. Rodríguez, C. R.; Armienta, H. M. A 1991. "Reciclado de residuos, optimización de materia prima y minimización de su potencial contaminante". 1er Congreso de residuos sólidos y peligrosos ¿recurso o desperdicio?. 30-36 pp. México.

65. Rofer, C. L. K. 1991. "Supercritical Water Oxidation". Chemical Oxidation Thecnologies for the nineties. Technomic. Publishing Co., Inc. Ed. EcKenfelder, W.W.; Bowers, A R.; Roth, J. A. 278-288 pp. E.U.A.
66. Romero, A. M.; Vicente, C. R. 1993. "Estrategia para la caracterización de residuos industriales". II Symposium internacional de metodologías analíticas en el campo del medio ambiente. 19-20 pp. España.
67. Roy, C.H., Darmstadt, B., Benalla, Chaala, A., Swerdtfeger, A.E. 1995. Vacuum pyrolysis of used tires. Département de génie chimique, Université Laval- Institut Pyrovac, Québec, Canadá.
68. Sánchez, G. J. 1994. "Introducción al módulo de control de residuos sólidos y peligrosos". Diplomado en tecnología y administración ambiental. ITESM-AMCRESPEC. México.
69. Sánchez, G. J. 1996. "Los sistemas integrales y su relación con la política nacional para el manejo de residuos peligrosos". 1er. Diplomado Nacional a Distancia en Sistemas de Control de Residuos Sólidos y Peligrosos. UNAM-F.I-AMCRESPEC. México.
70. Sedesol-INE-EPA-PUMA-CEMEX. 1994. Workshop of technology for energy recovery in cement klins using alternative fuels. México.
71. Sedesol-INE. 1994. Bases para un política nacional de residuos peligrosos. 2-6, 28-33 pp. México.
72. Sedesol-INE. 1994. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Proteccción al Ambiente 1993-1994. 240 pp. México
73. Sedesol-INE. 1994. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Proteccción al Ambiente 1993-1994. Cap.24: Tratado de Libre Comercio de América del Norte.; Cap. 25: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico . México
74. SEDUE. 1983. Breviario Jurídico Ecológico. 5,-10, 18, 47 pp. México
75. Semarnap-INE. 1995. Lo que a usted le conviene saber sobre residuos peligrosos y su legislación ambiental. 6-12 pp. México.
76. Simon and Schuster's. 1973. Simon and Schuster's International Dictionary English/Spanish, Spanish/English. Simon & Schuster's, Inc. 475 pp. E.U A
77. Tchobanogluos, G.; Theisen, H.; Vigil, S. 1993. Integred Solid Waste Management. McGraw Hill, Inc 360-362 pp. E.U.A.
78. Turman, C. E. 1986. Hazardous waste control throug reduction. McGraw Hill, Inc 35 pp.
79. Villaseñor, M. 1994. "Recuperación de energía en hornos cementeros". Apuntes curso-taller: Manejo y disposición de residuos peligrosos. UNAM-I G-PUMA-AMCRESPEC. México.
80. Ward, J. V.; Warlow, S. J. 1993. "Minimización de residuos peligrosos en países en vias de desarrollo". Hazardous Waste Managenment in Economically Developing Countries. Turkish National Committe on Solid Waste e ISWA Estambul, Turquia.

81. Union Nature Company, Inc. 1997. "UNCI makes pyrolysis of scrap tires/solid wastes economically viable". E.U.A.
82. Weismatel, G.E. 1973. "Sluge pyrolysis schemes no haed for trouts". Chemical Engineering, 90 pp. E.U.A.
83. XIV Censo Industrial (INEGI). 1994. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México