

**CURSO**  
**MANEJO SEGURO DE RESIDUOS**  
**TÓXICOS O PELIGROSOS**

Universidad de Concepción  
Sistema de Gestión para el Manejo de Sustancias  
Químicas y Residuos Tóxicos - S.Q.R.T

# Indice

## **CAP I DEFINICION Y CLASIFICACION DE RESIDUOS PELIGROSOS**

1.1 Introducción

1.2 Definición y clasificación

- \* Identificación de Residuos Peligrosos
- \* Análisis de Toxicidad

## **CAP II SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS TOXICOS**

2.1 Introducción

2.2 Tratamiento de Residuos Orgánicos

2.3 Tratamiento de Residuos Líquidos Inorgánicos

## **CAP III TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS**

3.1 Aplicaciones y Limitaciones

3.2 Consideraciones de Diseño

- \* Tecnologías, Selección y Evaluación
- \* Consideraciones del Diseño de Desnatado
- \* Caso Histórico

## **CAP IV NEUTRALIZACION**

## **CAP V EXTRACCION POR SOLVENTES**

## **CAP VI TRATAMIENTO POR OXIDACION QUIMICA**

## **CAP VII ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION**

## **CAP VIII PROCESAMIENTO DE LODOS**

## **CAP IX EFECTOS EN LA SALUD Y EL AMBIENTE DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS Y PRODUCTOS TÓXICOS**

9.1 Rutas Potenciales de los Residuos al ambiente

9.2 Factores que Afectan la Contaminación Ambiental

9.3 Efectos en la Salud y en el Ambiente

9.4 La Contaminación del Aire y los Problemas de Salud Asociados.

9.5 Grados del Concepto de Peligro

9.6 Efectos Ambientales de los Residuos

9.7 Reactividad Química de Sustancias Peligrosas

## **CAP X PLANIFICACIÓN PARA EL MANEJO SEGURO DE SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS**

10.1 Localización y Edificios

- 10.2 Manejo del Almacenamiento de Sustancias Peligrosas
- 10.3 Planificación del Almacenamientos de Sustancias Peligrosas
- 10.4 Procedimientos de Emergencia Generales
- 10.5 Planificación del Manejo de Residuos

## **CAP XI MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS**

- 11.1 Introducción
- 11.2 Programa de Minimización de Residuos
- 11.3 Incentivos y Desincentivos en Países en Desarrollo
- 11.4 Auditoría de Minimización de Residuos
- 11.5 Evaluación de Costos y Beneficios en la Minimización de Residuos

## **CAP XII INFRAESTRUCTURA DE SISTEMAS DE MANEJO**

- 12.1 Introducción
- 12.2 Almacenamiento de Residuos
- 12.3 Recolección y Transporte
- 12.4 Planes de Manejo y Programas
- 12.5 Centrales de Tratamiento de Residuos
- 12.6 Análisis de Seguridad

## CAPITULO I

### DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

#### 1. Introducción

Los Residuos Peligrosos se generan a partir de un amplio rango de actividades industriales, de la agricultura, y aún de las actividades domésticas.

**Tabla 1.1 Ejemplos de Residuos Peligrosos**

<u>Sector</u>	<u>Fuente</u>	<u>Residuo Peligroso</u>
Comercio & Agricultura	Servicio Autos	Aceites Residuales
	Aeropuertos	Aceites, Fluidos, etc.
	Secado al Vacío	Solventes Halogenados
	Transformadores	Bifenilos Policlorados( PCB )
	Hospitales	Residuos Patógenos e Infecciosos
	Zonas Rurales	Pesticidas, Residuos Agrícolas
Mediana y Pequeña Industria	Tratamiento de Metales( Electro- Plateado, Galvanizado, Cromado, Anodizado, etc.	Ácidos, Metales Pesados
	Industria Fotográfica	Solventes, ácidos, plata
	Textiles	Cadmio, ácidos minerales
	Impresión	Solventes, tintas, etc.
	Curtiembres	Solventes, Cromo, Sulfuros
Industria de Gran Escala	Refinerías	Catalizadores
	Petroquímica	Residuos de Aceites
	Química y Farmacéutica	Solventes, Residuos Tóxicos
	Celulosa y Papel	Mercurio, Organoclorados

Los Residuos Peligrosos pueden estar en la forma de sólidos, líquidos o borras. En la mayoría de las definiciones se excluyen los Residuos Domésticos y los Efluentes Líquidos. Sin embargo una importante fuente de residuos peligrosos se obtiene del pretratamiento de efluentes líquidos para cumplir con los controles de contaminación de aguas, teniendo como ejemplos las borras con metales pesados del electrotratamiento de metales, borras del tratamiento de efluentes de curtiembres, etc.

El grado de peligro de los residuos peligrosos varía ampliamente. Una distinción útil es entre aquellos residuos que poseen un riesgo potencialmente alto para la salud humana, y aquellos donde el riesgo es menor, pero las cantidades son mucho mayores. Un ejemplo de la primera categoría incluyen solventes inflamables de bajo punto de inflamación, pesticidas altamente tóxicos o materiales persistentes clorinados como los PCB, mientras que en la última categoría se incluyen grandes volúmenes de actividades mineras (relaves) y borras de caliza u otros minerales.

## **1.2 Los Problemas con Los Residuos Peligrosos**

Solamente en los últimos 20-25 años se ha reconocido como un problema prioritario el manejo de los residuos peligrosos. Las acciones para controlar los residuos peligrosos ha menudo se han precipitado por efecto de un algún desastre ambiental.

o Japón fue una de los primeros países en introducir el control de residuos peligrosos, después del accidente de Bahía Minamata en los años 60 , cuando muchas personas murieron por intoxicación al consumir pescados y mariscos contaminados con Mercurio que había sido descargado al mar por una planta química.

o En Inglaterra después de años en que un alto comité había investigado los problemas de residuos peligrosos, cuando en Febrero de 1972 se produjo indignación pública al descubrirse tambores con Sales de Cianuro en un sitio desocupado donde jugaban niños. Diez días después se estableció la legislación pertinente.

o En los Estados Unidos se ha desarrollado un rígido sistema de control sobre residuos peligrosos desde 1976, provocado especialmente por la indignación ciudadana por el descubrimiento de la contaminación causada por el vaciamiento descontrolado de residuos peligrosos (Love Canal, Three Mile Island, etc.)

A pesar de que la definición de Residuos Peligrosos excluye los Residuos Domésticos, puede ser difícil hacer una separación total de residuos industriales y domésticos. Los países en desarrollo necesitan algún tipo de estrategia para identificar y cuantificar los riesgos planteados por los residuos peligrosos en orden de lograr una lista de prioridades para tomar acción con los recursos limitados con que se cuentan. Algunos factores que afectan el grado de riesgo son :

- o Reactividad ( fuego, explosión, lixiviación );
- o Efecto biológico ( toxicidad, largo o corto plazo, ecotoxicidad);
- o Persistencia ( efecto en el ambiente, potencial destoxificación, factores múltiples) ;
- o Riesgos indirectos a la salud ( patógenos, vectores ); y
- o Cantidades Reales y Condiciones Locales (temperatura, suelo, agua, humedad, luz, sistemas receptores, formas de usos, etc. ).

### **1.3 Aspectos de un Sistema de Control para Residuos Peligrosos.**

Cada país necesita un Sistema de Control Nacional para los residuos peligrosos. Ese sistema debe contener cuatro componentes vitales para ser exitoso.

1. Legislación y regulaciones;
2. Implementación y procedimientos de control apropiados;
3. Adoptar servicios adecuados para el reciclaje, tratamiento y disposición de residuos peligrosos.
4. La introducción de la capacitación adecuada para los empleados del gobierno que fiscalizan, así como también para los operadores de plantas y para el público en general a través de programas educativos.

No importa cuán perfecto pueda aparecer un Programa Nacional de Control en el papel, si no es fiscalizado no tiene ningún valor. En forma similar, un programa de control no puede ser implementado si no existen los laboratorios, servicios y la capacitación adecuados. Por lo tanto la legislación y la provisión de los servicios adecuados deben proceder en paralelo, debiéndose tener en cuenta los siguientes aspectos:

- o Buena información sobre cantidades actuales de residuos y sobre procesos industriales para identificar las prioridades.
- o Desarrollar una estrategia nacional para el manejo de residuos peligrosos, que incluya las necesidades de instalaciones (Incineradores, Vertederos, plantas de reciclaje, etc.)
- o Un sistema de control que incluya todos los aspectos del manejo de residuos peligrosos, desde la generación, almacenamiento, transporte y tratamiento y disposición.
- o Todos los actores involucrados, generadores, transportistas, recicladores, gobierno, público, etc., tienen sus roles y responsabilidades.

### **1.4 Esfuerzos Internacionales en el Manejo de Residuos Peligrosos.**

Existen diversas organizaciones internacionales que han mostrado interés en el manejo de los residuos peligrosos.

- o En 1985 la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA (UNEP) publican guías sobre políticas y códigos de prácticas, que sientan las bases y principios de la formulación e implementación de las políticas de manejo de residuos peligrosos (Suess y Huismans, 1983).
- o A fines de 1985 un grupo de expertos que trabajan en el manejo ambientalmente seguro de residuos peligrosos bajo el auspicio del PNUMA, adoptan las "Guías del Cairo", sobre políticas y legislación (UNEP, 1985).

o En 1985 se publica un Archivo de Manejo de Residuos, por el “Registro Internacional de Químicos Potencialmente Tóxicos “ ( RIQPT ), que contiene información sobre tratamiento y opciones de disposición de residuos conteniendo productos químicos específicos.

o Un Seminario organizado por ASEAN , UNEP ( PNUMA ) y CDG desarrolla guías para establecer políticas y estrategias para el manejo de residuos peligrosos en Asia y el Pacífico ( UNEP, 1986 )

o La Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo ( OECD) y la Comisión de las Comunidades Europeas ( CEC) han preparado una Convención Internacional sobre los movimientos transfronteros de residuos peligrosos. La mayor parte del trabajo se ha focalizado en la lista de residuos peligrosos ( OECD , 1988 ).

o La Comisión Económica para Europa (ECE) y el Consejo para la Asistencia Mutua ( CMEA) se han preocupado especialmente en tecnologías de baja producción de residuos o sin-residuos ( Tecnologías Limpias o Producción Limpia ) , ( ECE, 1979-1987).

### **1.5 Cuantificación de Residuos Peligrosos.**

El obtener una información confiable sobre las cantidades de Residuos Peligrosos producidos por cualquier país es muy difícil. El efectuar una comparación internacional también es casi imposible debido a las diferencias en la clasificación y definición de residuos peligrosos de país en país.

### **1.6 Progresos en el Control de Residuos Peligrosos.**

Se ha echo un considerable esfuerzo en los últimos diez años en el control de residuos peligrosos en los países en desarrollo. El progreso varía de país en país pero en algunos países :

o Existe una legislación efectiva;

o Se han introducido sistemas de control efectivos en el transporte de residuos;

o Se han entregado licencias a un número creciente de operadores para el tratamiento y disposición de residuos peligrosos.

o En algunos casos , se han implementado servicios adecuados para el tratamiento de residuos peligrosos, para incineración y para vertederos controlados;

o En unos pocos casos, buenos sistemas de recolección y de transferencia se han implementado.

La disposición de Residuos Peligrosos es un problema dinámico, y actualmente se está trabajando fuertemente en los países en desarrollo tanto en procedimientos estándares como en licencias.

### **1.7 Problemas en Países en Desarrollo**

Los principales problemas que deben enfrentar los países en desarrollo con respecto a enfrentar los problemas de los residuos peligrosos son:

a. Control Pobre sobre la Contaminación y la Disposición de Residuos

En muchos países predominan los vertederos abiertos, y ante la ausencia de control, los residuos peligrosos encuentran fácilmente su camino a estos lugares. Existen personas que viven y trabajan entre estos residuos, y muchos de estos vertederos están causando problemas de contaminación. El manejo de estos depósitos es de alta prioridad en los países en desarrollo.

Los controles sobre la contaminación del agua y del aire son a menudo muy deficientes, y cuando estos controles se implementan, los lodos y polvos obtenidos en los tratamientos a menudo generan residuos peligrosos.

Esfuerzos aislados para controlar algunos residuos peligrosos específicos son a menudo inefectivos sin una práctica eficiente del manejo de residuos. Debe existir una buena coordinación entre los controles de la contaminación del aire y del agua y de los residuos peligrosos.

#### b. Los Generadores de Residuos pueden ignorar el peligro de sus residuos

La ignorancia del potencial daño de los residuos peligrosos es normal en todos los países, pero es un problema particular en el caso de generadores pequeños en los países en desarrollo. Aunque las cantidades que ellos producen pueden ser pequeñas, los potenciales problemas pueden no ser insignificantes. Como ejemplo podemos citar la eliminación de contenedores con residuos de pesticidas que pueden envenenar seres humanos o contaminar fuentes sensibles de aguas potable y de riego.

#### c. Acumulaciones de Residuos en espera de tratamiento o eliminación

En algunos países, las industrias nuevas pueden acumular sus residuos en sus propias plantas en espera de instalaciones de tratamiento o disposición. Después de 5, 10 ó 15 años comienzan a aparecer los problemas de contaminación, y de repente el problema se transforma en urgente. Estos tipos de residuos se pueden reprocesar o se deben mantener controlados por las posibles fugas de sustancias tóxicas como a sucedido en numerosas ocasiones.

#### d. Fuentes de Recursos Limitadas

Algunos países en desarrollo no tienen los recursos financieros ni humanos especializados para manejar adecuadamente los residuos peligrosos. Ciertas restricciones al acceso a financiamientos externos hace difícil financiar estas actividades. Una carencia de personal especializado puede impedir la planificación, el manejo, y la operación y mantención de estas instalaciones, y la fiscalización de las regulaciones y leyes.

#### e. Razones Socio-Políticas

Sin una educación pública en el tema y con un desconocimiento de los peligros de la disposición impropia de los residuos va a existir una insuficiente demanda pública por acciones. En los países en desarrollo en general la focalización se acentúa en otros problemas también reales y más urgentes y no se ve la disposición de residuos peligrosos como una meta política inmediata y necesaria.

En estos países se debe priorizar el control de los residuos peligrosos, y se deben focalizar los recursos disponibles en los problemas más significantes, aunque se debe tener en cuenta también las soluciones a largo plazo, que pueden significar el establecimiento de instalaciones centralizadas de tratamiento o disposición. Aún en el largo plazo se deben desarrollar soluciones que sean compatibles con los recursos limitados disponibles.

## **1.6. Definición y Clasificación de Residuos Peligrosos**

En los últimos años se ha puesto especial atención a la definición de “residuos”, desechos” o desperdicios” peligrosos. Cada país tiene un método diferente de definir este concepto, así como una diferente lista de compuestos.

Algunas organizaciones Internacionales europeas (OECD, CEC) está tratando de establecer listas cruzadas de residuos peligrosos, como un primer paso para armonizar las definiciones. La mayor preocupación actualmente es implementar un control estricto sobre los movimientos transfronteras de los residuos peligrosos.

También es importante entender los posibles efectos sobre la salud y el medio ambiente de los residuos. Para esto se debe entender claramente las propiedades químicas y físicas de los residuos así como el camino potencial a través del ecosistema hacia el hombre.

### **Definición de Residuo**

Típicamente , el concepto de “residuo” se refiere a algo que no tiene valor o que no puede ser utilizado. Esta definición se complica cuando se trata de definir lo que son propiamente residuos y subproductos; en otras palabras, si un residuo puede ser reciclado o usado de alguna manera, adquiere de inmediato un cierto valor y no se considera un residuo. Lo anterior requiere por lo tanto una definición de que es reciclable. Existe evidencia de que la relajación en los controles de residuos reciclables puede aumentar el riesgo de daño ambiental como resultado del mal manejo de los residuos reciclables. Como ejemplos de este mal manejo se pueden citar el uso de residuos de aceites contaminados para el control de polvos; el almacenamiento a largo plazo y sin control de materiales que se consideran reciclables; la utilización de residuos metalíferos para construcción de edificios y carreteras; o la utilización de residuos como combustibles sustitutos, cuya combustión se efectúa en condiciones no adecuadas.

Por lo tanto definiremos un residuo como un material movable que no tiene un uso directo y que es descargado continuamente.

Todos los residuos deben recibir un tratamiento y disposición de modo de proteger el ambiente y aumentar la calidad de vida. Los residuos peligrosos son una categoría especial de residuos las cuales debido a su toxicidad, persistencia, movilidad, inflamabilidad, etc., requieren de una regulación y controles más exigentes comparados con los residuos comunes como los municipales.

La siguiente definición de Residuo Peligroso fue preparada bajo el auspicio del PNUMA ( UNEP ) por un grupo de trabajo de expertos en el Manejo Ambientalmente Adecuado de Residuos Peligrosos en Diciembre de 1985.

“ Residuos Peligrosos son aquellos Residuos diferentes a los Radioactivos que por razones de su reactividad química, toxicidad, explosividad, corrosividad u otras características provocan un peligro o pueden causar peligro para la salud o el ambiente, ya sea por si solos o cuando se ponen en contacto con otros residuos, y se definen legalmente como peligrosos en el estado en el cual son generados o en el cual son eliminados o de la forma como son transportados”.

### **1.7 Inclusiones y Exclusiones de la Definición**

De acuerdo a la definición, los residuos peligrosos pueden incluir sólidos, líquidos, gases, borras, gases contenidos o contenedores contaminados, y se pueden originar de un amplio rango de fuentes comerciales, agrícolas, e industriales. En general los residuos peligrosos no pueden ser manejados en forma segura por medio de los sistemas de tratamientos de aguas servidas o por medio de los vertederos de residuos domésticos.

Se excluyen específicamente de la definición de residuos peligrosos:

o Los Residuos Radioactivos que son considerados peligrosos, pero se excluyen debido a que la mayoría de los países controlan y manejan estos materiales en una forma separada.

o Los Residuos Domésticos que pueden causar una significativa contaminación ambiental y que pueden incluir incluso pequeñas cantidades de materiales peligrosos ( mercurio de pilas secas o termómetros, solventes de residuos de pinturas, etc. ). De la misma manera estos residuos son manejados y controlados por organizaciones separadas, aunque interrelacionadas con las de residuos peligrosos. Algunos países con buenos sistemas de control están preocupándose de separar y/o eliminar los componentes peligrosos de los residuos domésticos.

El Grupo de Trabajo del PNUMA también a considerado la definición de cantidad de residuos peligroso.

o Para pequeñas cantidades , todos los países han escogido excluir los residuos domésticos de los “ residuos peligrosos “. Al mismo tiempo, algunos países también excluyen a los generadores menores de residuos peligrosos. El punto de corte es muy importante para las normas de regulación. En los Estados Unidos por ejemplo, recientemente el valor máximo de control se ha reducido de 1000 kg./mes a 100 kg./mes, aumentando de esta manera el número de generadores de residuos peligrosos por un factor de diez.

o Para grandes cantidades , los reguladores desearían controlar los residuos que contienen bajas concentraciones de contaminantes, puesto que el volumen hace que aún sean peligrosos para el medio ambiente. Sin embargo, debido a los problemas prácticos que presenta el control de este

tipo de residuos, algunos países excluyen los grandes volúmenes de residuos producidos por actividades mineras o agrícolas del control bajo la legislación de residuos peligrosos.

Desde el punto de vista económico se puede definir residuo como aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado en el contexto en el que son producidos ningún valor comercial. La carencia de dicho valor puede ser debida tanto a la imposibilidad de ser reutilizado, por no existir la tecnología adecuada de recuperación, como por no ser posible la comercialización de los productos recuperados y/o en ellos contenidos.

Según la Comunidad Europea se entiende por residuo a cualquier sustancia u objeto perteneciente a una de las categorías que se describe en la tabla a continuación (1,2,3,4).

**Tabla 1.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE RESIDUOS**

1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
– Domiciliarios.
– Voluminosos
– Comerciales.
– Sanitarios.
– De construcciones y demolición.
– Asimilables a urbanos
2. RESIDUOS INDUSTRIALES
– Inertes.
– Asimilables a urbanos.
– Residuos tóxicos y peligrosos.
3. RESIDUOS HOSPITALARIOS
4. RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS
5. RESIDUOS FORESTALES
6. RESIDUOS AGRÍCOLAS
7. RESIDUOS GANADEROS
8. RESIDUOS RADIATIVOS

Los residuos industriales son materiales resultantes de un proceso de fabricación, de transformación, utilización, consumo o limpieza cuyo productor o poseedor los destine al abandono(1).

Dependiendo de sus características se pueden subdividir en:

**a) Residuos inertes:**

Escorias, escombros, fangos digeridos o desecados, arcillas, arenas, etc. y en general, todos aquellos que no necesitan de un tratamiento previo a su disposición en un vertedero controlado. Por regla general, este tipo de residuos no implica riesgos para el medio ambiente, excepto los derivados de las cantidades en las que se generan. Pueden ser utilizados como material de relleno en movimiento de tierras.

**b) Residuos asimilables a urbanos:**

Generados fuera del ambiente urbano en actividades auxiliares de la industria como oficinas, limpieza, sanitarios, comedores, embalajes, etc. Sus características, semejantes a las de los urbanos, les permiten ser tratados conjuntamente.

**c) Residuos tóxicos y peligrosos:**

Los materiales sólidos, pastosos, líquidos y gaseosos contenidos en recipientes, que siendo resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor los destine al abandono y contengan en su composición algunas de las sustancias y materias que figuran en la siguiente tabla, extraída de la Ley Básica de Gestión de Residuos Tóxicos y Peligrosos de España (1). Estas sustancias se considerarán peligrosas si existen en concentraciones tales que representen un riesgo para la salud humana, recursos naturales y medio ambiente. Esta ley también se aplica a los recipientes y a los envases vacíos que hayan contenido los residuos tóxicos y peligrosos.

**Tabla 1.3 SUSTANCIAS O MATERIAS TÓXICAS Y PELIGROSAS**

1.	Arsénico y compuestos del arsénico
2.	Mercurio y compuestos del mercurio
3.	Cadmio y compuestos del cadmio
4.	Talio y compuestos de talio
5.	Berilio y compuestos del berilio
6.	Compuestos de cromo hexavalente
7.	Plomo y compuestos del plomo
8.	Antimonio y compuestos del antimonio
9.	Fenoles y los compuestos fenólicos
10.	Cianuros orgánicos e inorgánicos
11.	Isocianatos
12.	Compuestos organohalogenados con exclusión de los polímeros inertes y otras sustancias mencionadas en la lista
13.	Disolventes clorados
14.	Disolventes orgánicos
15.	Biocidas y las sustancias fitosanitarias
16.	Productos a base de alquitrán procedentes de operaciones de refino y los residuos alquitranados procedentes de operaciones de destilación
17.	Compuestos farmacéuticos
18.	Peróxidos, cloratos, percloratos y nitruros
19.	Éteres
20.	Sustancias químicas de laboratorio no identificables o nuevas cuyos efectos sobre el medio ambiente no sean conocidos
21.	Aminato (polvo y fibras)
22.	Selenio y compuestos de selenio
23.	Teluro y compuestos de teluro
24.	Residuos procedentes de la industria de dióxido de titanio.
25.	Compuestos aromáticos policíclicos (con efectos cancerígenos)
26.	Carbonilos metálicos
27.	Compuestos solubles de cobre
28.	Sustancias ácidas y/o básicas utilizadas en los tratamientos de superficie de los metales
29.	Aceites usados, minerales o sintéticos, incluyendo las mezclas agua-aceite y las emulsiones.

La Agencia de Protección al Medio Ambiente Americana (EPA) define un residuo peligroso como cualquier desecho, o combinación de desechos, que a causa de su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas puedan:

- i) causar o contribuir significativamente a un incremento en la mortalidad, o a un incremento en enfermedades serias irreversibles o,
- ii) presentar un potencial peligro para la salud humana o el ambiente cuando son impropriamente tratados, almacenados, transportados, o desechados.

El término residuo peligroso incluye el de residuo extremadamente peligroso, el cual es cualquier residuo tal que si ocurre una exposición humana, probablemente resulte en muerte, daño personal incapacitante o seria enfermedad causada por el residuo peligroso o una mezcla de residuos peligrosos (7).

**1.8 Clasificación Específica de Residuos Peligrosos**

La clasificación de un residuo peligroso se puede realizar de distintas maneras, considerando los siguientes factores (4):

- Tipos particulares de residuos peligrosos,
- Procesos industriales a partir de los cuales los residuos se definen como peligrosos,
- Sustancias, ya sea específicas o por clases, cuya presencia es indicativa de un potencial peligro a la salud humana y/o al medio ambiente.
- La capacidad de ignición o la inflamabilidad del residuo,
- La corrosividad del residuo,
- La reactividad del residuo.

Teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo se detalla a continuación la clasificación según tipos de residuo, debido a que este sistema se utilizará para definir el tipo de operación o proceso necesario para un tratamiento adecuado. Además se relaciona el tipo de residuo con el proceso industrial que los genera. Esta relación es útil en la realización del catastro industrial de residuos tóxicos que definirá tanto el esquema como la capacidad de la planta tratamiento de residuos tóxicos que se estudia en este trabajo.

En la tabla a continuación se muestra la clasificación y los tipos de residuos peligrosos de cada clasificación (1):

**Tabla 1.4**  
**CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS**

RESIDUOS INORGÁNICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ácidos y álcalis.</li> <li>– residuos de cianuro</li> <li>– borras y soluciones de metales pesados.</li> <li>– residuos de asbesto.</li> <li>– otros tipos de residuos sólidos</li> </ul>
RESIDUOS ACEITOSOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– aceites lubricantes y fluidos hidráulicos.</li> <li>– sedimentos del fondo de estanques de almacenamiento de aceites.</li> </ul>
RESIDUOS ORGÁNICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– solventes halogenados</li> <li>– residuos de solventes no-halogenados (tolueno, etanol, etc.)</li> <li>– residuos de bifenilos policlorados (BPCs).</li> <li>– residuos de resinas y pinturas.</li> <li>– residuos de biocidas</li> <li>– otros tipos de residuos químicos orgánicos.</li> </ul>
RESIDUOS ORGÁNICOS PUTREFACTOS	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aceites comestibles</li> <li>- residuos de mataderos, curtiembres, y otras industrias alimenticias.</li> </ul>
RESIDUOS DE ALTO VOLUMEN - BAJA PELIGROSIDAD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cenizas de la quema de combustibles fósiles, relaves de faenas mineras, barros de perforaciones de la extracción del petróleo, etc.</li> </ul>
RESIDUOS VARIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- residuos infecciosos</li> <li>- residuos de laboratorios</li> <li>- residuos explosivos</li> </ul>

## 1.9. Identificación de Residuos Peligrosos

Para desarrollar un sistema organizado para la cuantificación y manejo de residuos peligrosos, se debe formular un sistema de identificación y clasificación de los residuos ( ver Tabla 2-1 ). En muchos países , este sistema es una parte integral de una definición legal de residuos peligrosos. La mayoría de los países han usado una definición basada en una lista inclusiva de los siguientes factores:

- o tipos particulares de residuos peligrosos;
- o procesos industriales a partir de los cuales los residuos se definen como peligrosos.
- o sustancias, ya sea específicas o por clases, cuya presencia es indicativa de una potencial peligro a la salud humana y/o al medio ambiente.

En algunos casos, un listado de uno o más de estos criterios es usado como definición. En otros casos, se hace referencia a un nivel particular de concentración para cada sustancia peligrosa.

Otro criterio puede incluir la toxicidad de un extracto del residuo, obtenido usualmente por medio de un test específico del lixiviado. La toxicidad se define generalmente por referencia a las concentraciones de sustancias específicas en el extracto :

- o la posibilidad de ignición o la inflamabilidad del residuo;
- o la corrosividad del residuo;
- o la reactividad del residuo.

Dependiendo de tipo de actividad industrial se generan diferentes tipos de residuos peligrosos:

**Tabla 1.5**  
**TIPO DE RESIDUO GENERADO POR DIFERENTES INDUSTRIAS**

Industria	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>Grupo de Residuo</b>											
<b>1. Residuos Inorgánicos</b>											
Ácidos y álcalis.	•		•	•		•	•	•	•		
Residuos de cianuro				•		•					
Borras y soluciones de metales pesados.				•	•	•		•			
Residuos de asbesto.				•	•	•					
Otros residuos sólidos				•		•					
<b>2. Residuos Aceitosos</b>								•			



- o industria del petróleo y gas natural, extracción de petróleo y gas, producción de productos refinados;
- o producción de electricidad;
- o producción de agua potable;
- o distribución de energía.

**D Manufactura de Metales**

- o metalurgia ferrosa;
- o metalurgia no-ferrosa;
- o fundición y operaciones de trabajo de metales.

**E Manufactura de Productos Minerales No-Metálicos**

- o materiales de construcción, cerámicas y vidrios;
- o refinación de sal;
- o productos de asbestos;
- o productos abrasivos.

**Tabla 1.6 ( Continuación )**

**Grupos Industriales**

**F Industria Química y Relacionadas**

- o petroquímica;
- o producción de químicos primarios y productos intermedios;
- o producción de tintas, barnices, pinturas y pegamentos;
- o fabricación de productos fotográficos;
- o industria del perfume, de jabones y detergentes;
- o materiales plásticos y gomas;
- o producción de explosivos y pólvora;
- o producción de biocidas.

**G Industria de Repuestos, Vehículos e Ingeniería**

- o ingeniería mecánica;
- o manufactura de máquinas de oficina y de equipos de procesamiento de datos;
- o ingeniería eléctrica y electrónica;

- o **manufactura de motores y partes de vehiculos;**
- o **manufactura de equipos de transporte;**
- o **ingeniería de instrumentos;**
- o **otras industrias de manufacturas metálicas( n.e.).**

**7H Industrias Textiles, del Cuero, de Madera y Troncos**

- o **industria textile, de calzado, de ropas;**
- o **industria del cuero y calzado;**
- o **aserraderos, maderas y muebles;**
- o **otras n.e.**

**J Manufactura de Papel y Productos, Impresión y Publicación**

- o **papel y cartones;**
- o **impresión, publicación y laboratorios fotográficos.**

**K Servicios Médicos, Sanitarios y de Salud**

- o **salud; hospitales, centros médicos y laboratorios;**
- o **servicios veterinarios.**

**L Servicios Comerciales y Personales**

- o **lavanderías, secado y secado en seco;**
- o **servicios domésticos;**
- o **instituciones de cosméticos ( i.e., peluquerías );**
- o **otros servicios personales n.e..**

Cada uno de estos criterios tiene sus ventajas y desventajas. El uso de una lista inclusiva entrega una forma simple de control, y no requiere de análisis y entrega una cierta flexibilidad para el control de los residuos a las autoridades para efectuar juicios cualitativos con respecto a la opción de disposición de cada residuo en particular.

Tiene la desventaja sin embargo de colocar un gran número de decisiones en las autoridades que controlan , sobre cuales son los procesos industriales que deben ser controlados.

Suplementando o reemplazando estos listados por procedimientos de análisis y/o limites de concentraciones tiene la ventaja de presentar una descripción clara y exacta de los residuos, no dejando ninguna duda en cuanto a si el residuo debería ser clasificado como peligroso o no. Esta definición precisa, sin embargo requiere de protocolos de análisis detallados y un sistema de vigilancia que en la práctica puede traer muchos problemas en lo relacionado a recursos humanos, servicios de laboratorios ,etc., tanto para los generadores de residuos como para las autoridades que controlan.

**1.10. Procedimiento de Análisis de Toxicidad de los Residuos Peligrosos**

Esta diseñado para identificar los residuos que probablemente lixivien peligrosas concentraciones de productos tóxicos en las aguas subterráneas como resultado de un manejo inadecuado. Durante este procedimiento , los constituyentes son extraídos del residuo de una manera tal de simular las condiciones de lixiviación que pueden ocurrir en el vertedero. El extracto es analizado y se determina si posee cualquiera de los contaminantes que aparecen en la lista de la Tabla 1.7. Si la concentración de un constituyente en particular excede los niveles de la Tabla 1.7 , el residuo se considera como peligroso.

En el test TCLP ( Registro Federal 1986 ) , se emplea una muestra de 100 gramos . Para residuos que contienen menos de un 0.5 % de sólidos, y se define como extracto TCLP , el residuo después de la filtración por un filtro de fibra de vidrio de 0.6-0.8  $\mu\text{m}$ . La separación se efectúa con presiones hasta de 50 psi. El tamaño de partícula se reduce si es necesario hasta cerca de 9.5 mm. La muestra es entonces pesada y extraída con una cantidad de fluido extractante igual a 20 veces el peso de la fase sólida. El fluido extractante empleado es una función de la alcalinidad de la fase sólida del residuo. Si la muestra después de mezclada con agua destilada deionizada tiene un pH menor a 5.0, el fluido extractante se produce agregando 5.7 ml de ácido acético glacial 1.0 N., a 500 ml de agua destilada deionizada, y agregando 64.3 ml de NaOH 1.0 N y diluyendo a un litro. Si la muestra después de mezclada con agua destilada deionizada tiene un pH mayor a 5.0, se agregan 3.5 ml de HCl 1.0 N, se agita por 30 segundos, se cubre con un vidrio reloj, se calienta a 50 ° C y se mantiene por 10 minutos. Si la muestra después de enfriada tiene un pH menor a 5.0, se utiliza el fluido extractante antes mencionado. Si el pH es mayor a 5.0, el fluido se fabrica diluyendo 5.7 ml de ácido acético glacial con agua destilada deionizada y llevando a 1 litro.

**Tabla 1.7 Criterio de Toxicidad**

<b><u>Contaminante</u></b>	<b><u>MCL ( ppm )</u></b>
<b>Arsénico</b>	<b>5.0</b>
<b>Bario</b>	<b>100.0</b>
<b>Cadmio</b>	<b>1.0</b>
<b>Cromo ( total )</b>	<b>5.0</b>
<b>Plomo</b>	<b>5.0</b>
<b>Mercurio</b>	<b>0.2</b>
<b>Selenio</b>	<b>1.0</b>
<b>Plata</b>	<b>5.0</b>
<b>Endrin</b>	<b>0.02</b>
<b>Lindano</b>	<b>0.4</b>
<b>Metoxicloro</b>	<b>10.0</b>
<b>Toxafeno</b>	<b>0.5</b>
<b>2 , 4-D</b>	<b>10.0</b>
<b>2 , 4 , 5-TP Silvex</b>	<b>1.0</b>

Se utiliza un aparato extractor especial cuando se analizan volátiles. Seguida la extracción, el líquido extracto se separa de la fase sólida por filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 0.6-0.8  $\mu\text{m}$ .

Las características de ignición/inflamabilidad es de preocupación debido a que estos residuos pueden causar incendios durante su transporte, su almacenamiento o disposición. Ejemplos típicos son los residuos de aceites y solventes . Estos residuos tienen las siguientes propiedades :

- a. ) Són líquidos , excepto por soluciones acuosas que contienen menos de 24 por ciento de alcohol, que tiene un punto flash menor a 60 ° C;
- b. ) Un no-líquido capaz bajo condiciones normales, de una combustión espontanea y sostenida.:
- c.) Un gas comprimido de facil ignición; o
- d.) Un Oxidante.

Los materiales que pueden considerarse peligrosos por su corrosividad son : un material acuoso con un pH menor a 2.0 o mayor a 12.5 ; o un líquido que corroe al acero a una velocidad mayor a un cuarto de pulgada ( 6mm) por año a una temperatura de 55 °C. Los residuos con alto o bajo Ph pueden reaccionar violentamente con otros residuos o provocar

contaminantes tóxicos que migran desde ciertos residuos. Los residuos que son capaces de corroer el acero pueden escapar de sus contenedores y liberar otros residuos. Ejemplos de estos residuos corrosivos son los residuos ácidos y los licores de piquelado.

Un residuo reactivo puede esperarse que tenga una o más de las siguientes propiedades :

- a.) ser normalmente inestable y reaccionar violentamente sin detonación;
- b.) reaccionar violentamente con el agua;
- c.) formar una mezcla explosiva con el agua;
- d.) generar gases tóxicos, vapores o humos cuando se mezcla con agua;
- e.) contener cianuros o sulfuros y generar gases tóxicos, vapores o humos a un pH entre 2 y 12.5.
- f.) ser capaz de detonación si es calentado bajo condiciones de confinamiento o sujeto a fuerzas iniciales potentes; y
- g.) capaz de detonación a temperatura y presión estándar. Ejemplos de residuos reactivos incluyen el agua producto de la producción de TNT y solventes usados con cianuro.

La elección del sistema más apropiado depende del uso para el cual el sistema de clasificación será utilizado. Hay tres objetivos para el cual puede ser de particular importancia :

- o permitir a las autoridades que controlan los residuos utilizar su conocimiento de la industria para entregar una lista de los residuos más importantes;
- o para identificar los residuos de una manera que sea consistente con las tecnologías existentes para recuperar, tratar o disponer los residuos;
- o para proveer a las autoridades que controlan los residuos peligrosos con un marco apropiado para establecer su propio sistema de control de residuos peligrosos.

para cumplir con estos objetivos , el esquema de clasificación propuesto es una lista cualitativa, que usa una combinación de algunos tipos específicos de residuos con clases de sustancias específicas y con procesos industriales, para identificar los tipos de residuos.

## **1.11 Esquema de Clasificación-- Notación de Tipo Salud/Ecológica**

Una clasificación de los residuos que relaciona las categorías de industrias se indicó anteriormente. El propósito de esta clasificación es permitir al planificador identificar el principal tipo de residuos asociados con un amplio grupo industrial. Los distintos grupos industriales utilizados para el esquema de clasificación de residuos se presentan en la Tabla 1.6.

A continuación se dará una descripción breve de cada tipo de residuo incluyendo su fuente de generación.

### **I. Residuos Inorgánicos**

Ácidos y Alcalis están entre los mayores componentes de la totalidad de los residuos peligrosos generados. Aparecen en muchos sectores de la Industria, aunque en término de cantidad , los

residuos ácidos provienen fundamentalmente de la industria de preparación y terminado de metales.

El mayor peligro con los ácidos y los álcalis es su acción corrosiva, complicada a veces por la presencia de componentes tóxicos.

Los residuos de Cianuros son generados principalmente en la industria de terminado de metales y en el tratamiento térmico de ciertos aceros. El principal riesgo asociado con los cianuros es su aguda toxicidad.

Las borras y soluciones de metales pesados de mayor preocupación son aquellas que contienen metales tóxicos, arsénico, cadmio, cromo hexavalente, plomo, mercurio, níquel, zinc, y cobre. Estos residuos son generados por un amplio rango de procesos de manufactura que incluyen la producción de Cloro, Textiles, Plateado de Metales y Curtiembres.

Los Residuos de Asbestos normalmente se encuentran de edificios antiguos, centrales eléctricas, plantas industriales, hospitales, establecimientos educacionales, muelles, etc. Materiales que contiene asbestos aparecen como residuos de locomotoras y carros de ferrocarril, y en demoliciones de edificios.

Los riesgos a la salud asociados con la inhalación de fibras y polvo de asbesto se acrecientan por el potencial cancerígeno de este material. Los problemas producidos por las cañerías de cemento-asbesto y las planchas de asbesto son menores comparados con los relacionados con fibras o polvos.

Otros residuos sólidos son generados de una variedad de fuentes de las cuales las más importantes son la fundición y refinado de metales. Los polvos y borras producidos por estos procesos contienen típicamente metales tóxicos que incluyen níquel, arsénico, zinc, mercurio, cadmio y plomo.

## **II. Residuos Aceitosos**

Los Residuos Aceitosos se generan principalmente a partir del procesamiento, uso y almacenamiento de aceites minerales. Como ejemplos podemos citar los residuos de aceites lubricantes y de líquidos de frenos o hidráulicos, borras de los estanques de almacenamiento. En algunos casos, estos materiales pueden estar contaminados con metales tóxicos ( e.g., borras de estanques de gasolina con plomo ).

## **III. Residuos Orgánicos**

Los Solventes Halogenados son generados principalmente por operaciones de secado en seco, limpieza de metales y en menor extensión por desengrado y eliminación de aceites en la industria

textil y del cuero. Los peligros de estos residuos consisten en su gran toxicidad, movilidad y relativamente alta persistencia en el ambiente.

Los residuos de **Solventes no-halogenados** incluyen un gran número de hidrocarburos ( algunos oxigenados ), de los cuales los más comunes son el tolueno, metanol, isopropanol y etanol. Estos solventes se utilizan amplia aplicación en la producción de pinturas, tintas, adhesivos, resinas, preservantes de madera en base a solventes, artículos de tocador, saborizantes de alimentos, cosméticos y también para la limpieza de equipos. También son utilizados como desgrasantes en la industria de ingeniería y de vehículos , así como se usan como extractantes de productos naturales de fuentes animales y vegetales. La toxicidad de estos productos varía grandemente, y en muchos casos el mayor peligro es la inflamabilidad.

Los **Residuos de Bifenilos Policlorinados, PCBs**, son generados en la producción de PCBs y en el desarme de equipos en los cuales se utilizan, tales como fluidos dieléctricos en transformadores y capacitadores, y también como fluidos hidráulicos y fluidos de transferencia de calor. La mayor preocupación con los PCBs esta asociada con su alta persistencia y su potencial bioacumulación.

Los **Residuos de Pinturas y Resinas** son generados de una gran variedad de procesos químicos terciarios, y también en la aplicación de pinturas y resinas a productos terminados. En general son una combinación típica de solventes y compuestos poliméricos y en algunos casos metales tóxicos.

Los **Residuos de Biocidas** son generados tanto en la manufactura como en la formulación de biocidas y en el uso de estos compuestos en agricultura, horticultura y una variedad de otras industrias. El rango de biocidas utilizados es de varios miles de compuestos ( ver Anexo 2 ).

Además de los residuos orgánicos concentrados descritos , **otros residuos químicos orgánicos** son también generados a partir de la gasificación de carbón y de la manufactura de productos químicos primarios , secundarios y terciarios. Los residuos de la destilación y de material filtrado son típicos residuos. Estos residuos incluyen tanto productos químicos halogenados como no-halogenados, y son generados por un amplio rango de industrias tales como la refinación de petróleo , la industria química, de tinturas , farmacéutica, plásticos, gomas, y resinas.

Los **Residuos de Pesticidas** se pueden encontrar en, - “containers” o contenedores ya utilizados, o en materiales contaminados, sustancias químicas deterioradas o fuera de uso, pesticidas sobrantes, etc.

Para evitar acumular excesos de pesticidas o pesticidas obsoletos y además reducir las posibilidades que los pesticidas sufran algún daño:

Para hacer esto se sugieren los siguientes métodos:

- 1.- Comprar pequeñas cantidades de pesticidas y evitar el apilamiento de estos.
- 2.- Evaluar anticipadamente las necesidades que se tengan de pesticidas.
- 3.- No aceptar contenedores de pesticidas dañados.
- 4.- Mantener registros exactos de los pesticidas almacenados y utilizados.
- 5.- Guardar los pesticidas en condiciones adecuadas.
- 6.- Utilizar el método de inventario FIFO.

Métodos para disponer de los pesticidas y sus residuos.

Tratamiento de los suelos.

Incineración.

Métodos Químicos.

Almacenamiento temporal.

Disposición de los contenedores ya utilizados.

Se recomienda que el contenedor que haya contenido algún pesticida, sea aplastado o destruido evitando así su posterior uso. Esto ya que se pueden producir enfermedades serias al re-usar contenedores para almacenar agua y comida.

Los contenedores combustibles (hechos de papel, plástico o madera) se eliminan preferencialmente por incineración. Los de vidrio o metal pueden ser devueltos a los fabricantes, como ya se mencionó, o pueden ser derretidos.

#### **IV. Residuos Orgánicos Putrefactos**

Los Residuos Orgánicos Putrefactos incluyen los residuos de la producción de aceites comestibles, así como también los residuos de mataderos, curtiembres y otras industrias basadas en animales. El manejo apropiado de residuos putrecibles es de particular importancia en países en desarrollo donde las condiciones climáticas extremas pueden exacerbar los peligros a la salud asociados con estos residuos.

#### **V. Residuos de Alto Volumen/Baja Peligrosidad**

Los residuos de alto volumen/baja peligrosidad incluyen aquellos residuos que basados en sus propiedades intrínsecas, presentan peligros relativamente bajos, pero pueden presentar problemas debido a su alto volumen. Como ejemplos se incluyen: barros de perforaciones de la extracción de petróleo y gas natural, cenizas de plantas de fuerza a petróleo, relaves de faenas mineras, o residuos metalíferos.

#### **VI Residuos Misceláneos**

Además de los residuos nombrados existen un gran número de otros residuos que incluyen, residuos infecciosos asociados con tejidos humanos o animales; productos químicos redundantes que se han deteriorado o excedido su período de vida y provienen de tiendas comerciales, almacenes fiscales, etc.; residuos de laboratorios de investigación o de empresas; residuos de

explosivos y de la manufactura de miniciones. Aunque estos residuos no representan una gran proporción de la generación de residuos peligrosos, se deben tomar en cuenta para asegurar su seguridad y su adecuada disposición.

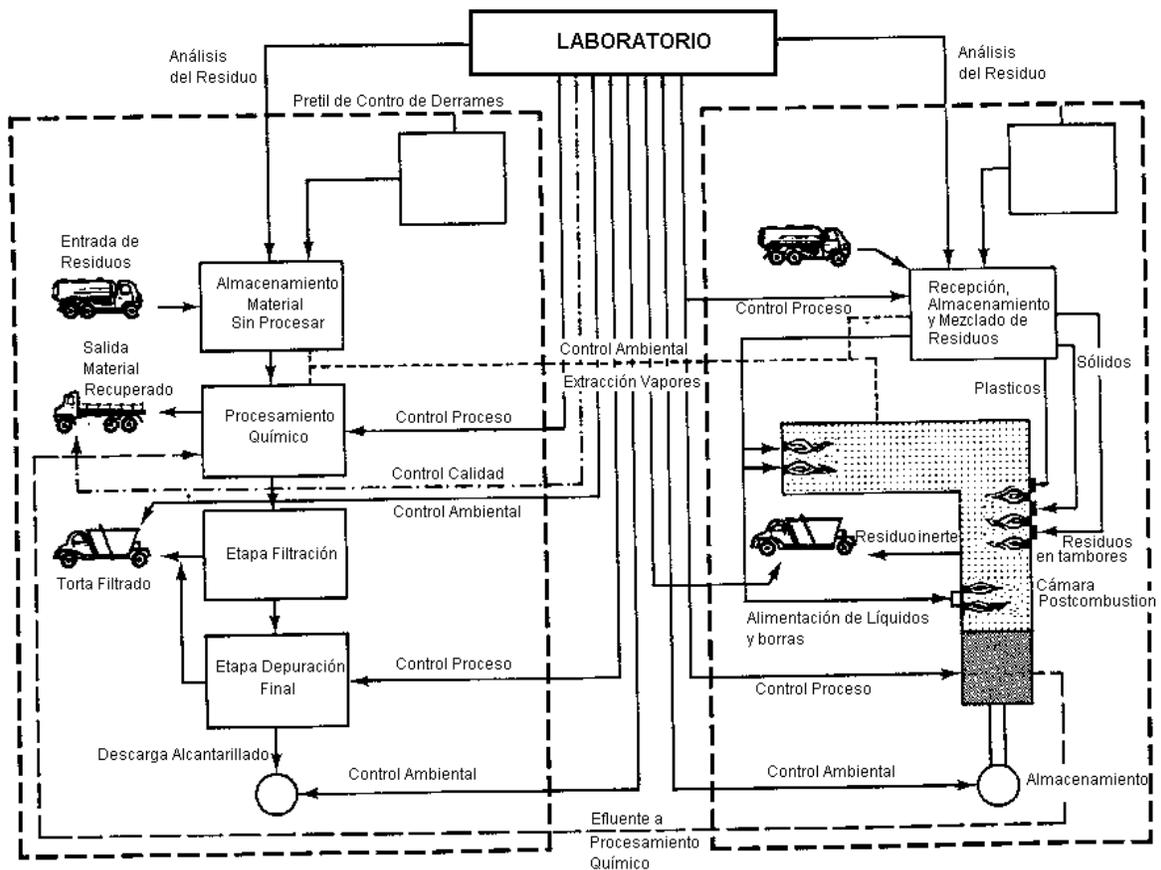
## CAPITULO II

### METODOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS TÓXICOS.

**2.1 Introducción.** Una planta de tratamiento de residuos tóxicos está diseñada para manejar residuos cuyas características sean sólidos y/o líquidos orgánicos y líquidos inorgánicos.

Estas plantas de tratamiento tienen por objetivo principal el disminuir tanto el volumen como la toxicidad del material peligroso.

Una planta de tratamiento se puede describir utilizando el siguiente esquema:



**Figura 2.1: Esquema de una Planta de Tratamiento. (6)**

Un residuo procesado en una planta de tratamiento debe pasar por las siguientes etapas:

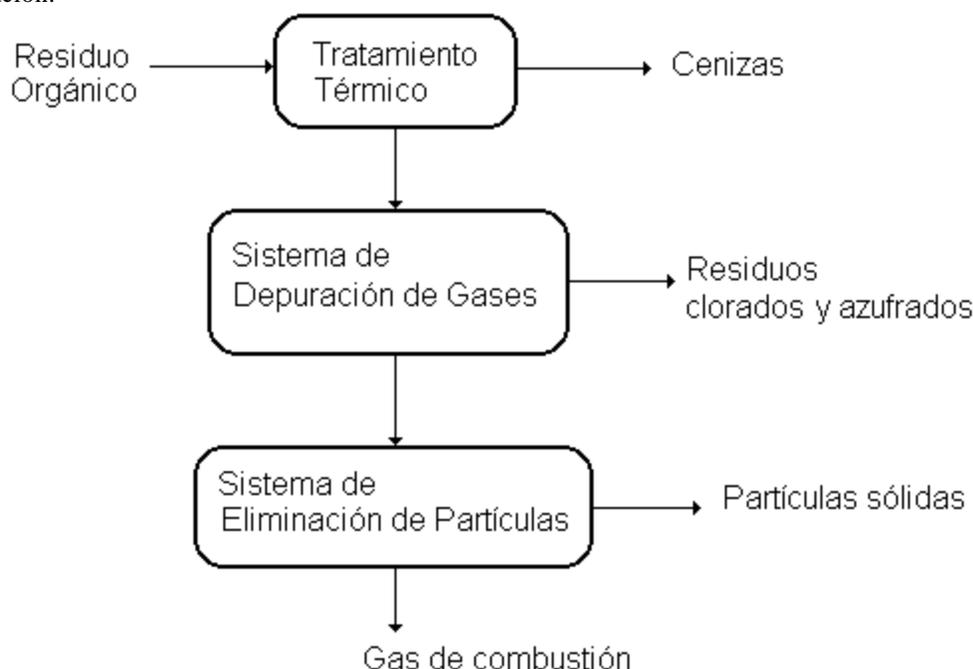
Recepción	Separación sólido/líquido
Análisis	Incineración
Test de Tratabilidad	Tratamiento Químico
Almacenamiento/Mezclado	Disposición de Residuos

La necesidad de control estrictas en todas las etapas de operación enfatiza el uso del laboratorio tanto en la caracterización del residuo como en la programación del proceso y los controles ambientales. Se puede observar del diagrama que ambas formas de tratamiento están localizadas en la misma área, pero son esencialmente procesos independientes. Los únicos puntos en común son el laboratorio, el área de mantenimiento y el edificio de administración.

Las operaciones de tratamiento químico y de incineración son independientes, y cada una tiene sus estanques de almacenamiento, área de tambores, de ácidos, álcalis, combustibles, y área general de residuos orgánicos. El tratamiento químico se efectúa en forma discontinua, en reactores de acero inoxidable.

## 2.2 Tratamiento de Residuos Orgánicos

El esquema típico para tratamiento de residuos orgánicos peligrosos es el que se presenta a continuación:



**Figura 2.2: Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de residuos orgánicos peligrosos.**

La primera etapa de tratamiento consiste en la destrucción térmica del residuo utilizando incineradores con una o dos cámaras de combustión para alcanzar tiempos de retención de 2 segundos y trabajar a temperaturas entre los 900 y 1.200 °C. De este proceso salen dos corrientes; una sólida que contiene cenizas de combustión y metales pesados, y otra corriente gaseosa que contiene junto con los gases de combustión, gases clorados, óxidos de azufre, metales pesados como el mercurio y orgánicos volátiles (1,7,8).

Los residuos sólidos son estabilizados mediante mecanismos de compactación con cemento o vitrificación con compuestos silícicos como la puzolana.

La corriente gaseosa recibe tratamientos para remover partículas sólidas, que han sido arrastradas por la corriente, en equipos como ciclones, precipitadores electrostáticos,

filtros de mangas, etc. Los gases ácidos se remueven neutralizando la corriente en procesos húmedos con hidróxido de sodio o calcio, o procesos secos con hidróxido de calcio. Los orgánicos se pueden remover en procesos de adsorción con carbón activo (1,8).

### 2.3 Tratamiento de Residuos Líquidos Inorgánicos.

Los **residuos líquidos** se someten a diferentes procesos dependiendo del contaminante que se desea tratar. Por esto la planta de tratamiento posee líneas independientes para tratar en forma segregada residuos con diferentes componentes peligrosos. La planta de tratamiento físico-químico se divide en cuatro líneas principales:

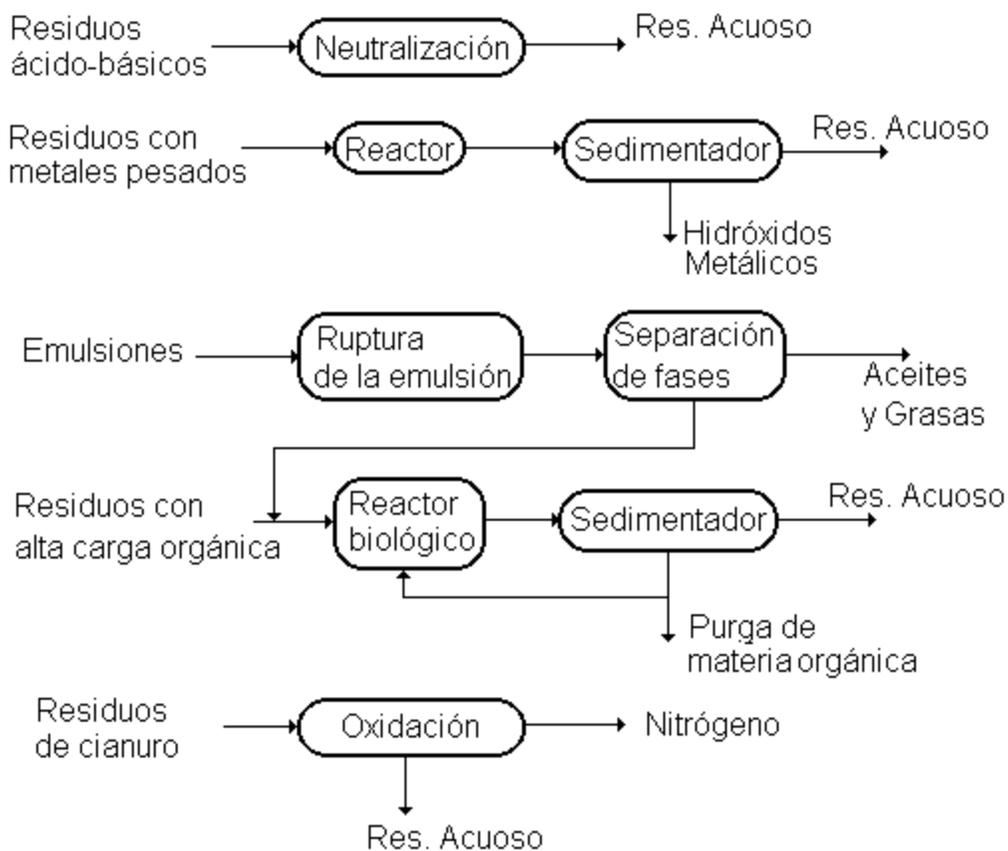
Línea de tratamiento de residuos ácidos-básicos.

Línea de tratamiento de residuos con metales pesados.

Línea de tratamiento de residuos cianurados.

Línea de tratamiento de emulsiones.

Además está la planta de tratamiento biológico que permite reducir la carga orgánica de soluciones acuosas orgánicas, además de la corriente acuosa resultante del tratamiento de emulsiones. La planta de tratamiento de líquidos se esquematiza a continuación:



**Figura 2.3 : Planta de tratamiento de líquidos.**

Si el residuo contiene iones de metales como aluminio, mercurio, cromo hexavalente y plomo, estos compuestos se eliminan precipitándolos como hidróxidos o bien utilizando floculantes como el cloruro férrico. Si la corriente está contaminada con cianuro se utilizan oxidantes fuertes para transformar el ion tóxico en dióxido de carbono y nitrógeno (1,6).

Si la corriente es una emulsión, ésta se rompe acidificando la corriente a aproximadamente 80°C o bien utilizando floculantes (1).

Luego de estos tratamientos primarios se disminuye la carga orgánica, especialmente si el agua proveniente de una separación de una emulsión. Estos tratamientos llamados secundarios o biológicos pueden ser tanto aeróbicos como anaeróbicos (5).

## **2.4 Tecnologías De Tratamiento de Residuos Tóxicos**

### **2.4.1. Introducción**

Existen muchas tecnologías diferentes de tratamiento de residuos peligrosos que pueden ser utilizadas antes de la disposición de estos residuos. Su propósito es el de modificar las propiedades físicas o químicas de los residuos, además de reducir el volumen, inmovilizar componentes tóxicos o detoxificar estos compuestos.

El escoger el mejor medio de tratamiento de un residuo dado depende de muchos factores, que incluyen la disponibilidad de instalaciones, normas de seguridad, costos, etc. No existe un sistema absolutamente seguro y cualquier sistema de tratamiento tiene asociado un grado de riesgo.

Los posibles sistemas de tratamiento son numerosos, pero en general se pueden clasificar en cuatro categorías:

- 1. Procesos de Separación de Fases:** Son potencialmente útiles en la reducción de volumen o recuperación de productos.
- 2. Procesos de Separación de Componentes:** Son capaces de segregar físicamente especies iónicas o moleculares de sistemas de residuos unifásicos y multicomponentes.
- 3. Procesos de Transformación Química:** Promueven las reacciones químicas para detoxificar, recuperar o reducir el volumen de componentes específicos en los residuos.
- 4. Métodos de Tratamiento Biológico:** Envuelven transformaciones químicas por medio de la acción de organismos vivos.

La selección de un proceso de tratamiento para un residuo en particular no es fácil, y se deben considerar: la naturaleza del residuo, la característica deseada del efluente, aspectos técnicos, consideraciones financieras y económicas, ambientales, energéticas, de operaciones y de mantención, y otro tipo de consideraciones globales.

Considerando la situación de Europa y EE.UU. se encontró que las soluciones y residuos sólidos de metales pesados son los residuos predominantes y que las tecnologías predominantes serían: neutralización, oxidación, reducción, precipitación, separación aceite-agua, recuperación de solventes y combustibles, lodos activados e incineración.

## 2.4.2. Clasificación de Sistemas de Tratamientos

El tratamiento de los residuos peligrosos puede producirse a tres niveles: primario, secundario y terciario o tratamiento final de forma análoga al tratamiento de aguas servidas o residuales. El tratamiento primario es similar a una preparación del residuo para otros tratamientos, aunque se pueden separar subproductos y reducir la toxicidad y la cantidad del residuo; el tratamiento secundario detoxifica, destruye y elimina los constituyentes peligrosos. El tratamiento final o terciario está encaminado al tratamiento de las agua previamente al vertido final.

Los tratamientos de los residuos peligrosos mas importantes se se pueden clasificar como:

- ◆ Tratamientos Físicos
- ◆ Tratamientos Químicos
- ◆ Tratamientos Térmicos
- ◆ Tratamientos Biológicos
- ◆ Estabilización / Solidificación

Cada una de estas técnicas, a su vez presenta una grán cantidad de variantes, pero en general muy pocos son exclusivos del tratamiento de residuos tóxicos, perteneciendo el resto a las operaciones tradicionales de la ingeniería química.

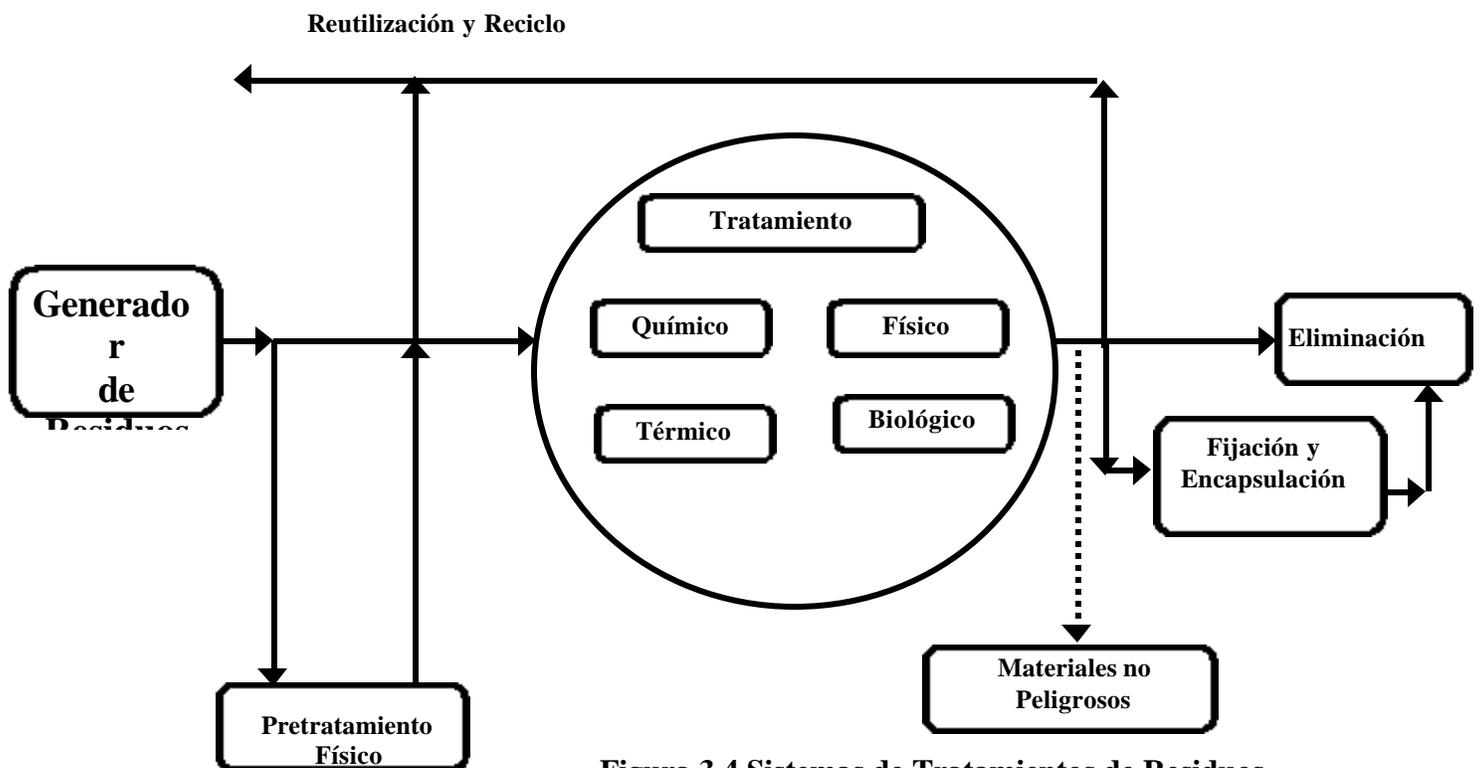


Figura 3.4 Sistemas de Tratamientos de Residuos

## **Procesamiento de los residuos**

Antes de desechar los residuos, hay varias oportunidades de alterar su forma, reducir su volumen y reciclar sus componentes. La incineración, por ejemplo, es sólo un paso en esa dirección. Hay fundamentalmente tres enfoques para procesar los residuos:

### **Tratamiento físico**

Incluye procesos de compactación, separación, destilación y evaporación., todos ellos tendientes a reducir el volumen de los desechos. Luego viene una etapa de separación para recuperar aquellos materiales reciclables.

### **Tratamiento químico**

Puede ser la neutralización de materiales ácidos o alcalinos, precipitación de sustancias disueltas, dechlorinación química e incineración. Merece especial atención la incineración, que es quizá la técnica más controversial en el tratamiento de los residuos. Consiste en alimentar los desechos sólidos municipales a cámaras de combustión, produciéndose a veces energía eléctrica como subproducto. Sin embargo existe oposición por parte de la comunidad por posibles daños a la salud y al medio ambiente. La incineración cambia la forma del desecho, reduce su volumen y peso, pero no destruye muchos compuestos peligrosos. De hecho, libera peligrosas sustancias que estaban en el material sólido y se generan dos nuevas formas de residuos: emisiones gaseosas y cenizas sólidas. Los gases, conteniendo pequeñas partículas de ceniza, salen por las chimeneas con o sin tratamiento. Los más importantes tóxicos generados son las dioxinas, los furanos y metales tóxicos (plomo, cadmio, arsénico, mercurio, selenio y berilio). Otros metales identificados son níquel, aluminio, zinc, cobre y manganeso. Muchos de ellos causan cáncer y producen enfermedades al sistema nervioso, riñón, hígado, sangre y otros órganos. Las dioxinas y los furanos son potenciales causas de cáncer y otras enfermedades. Hay que saber que cuando una basura se quema, la forma física o química de los metales puede ser cambiada, haciéndose incluso más peligrosos. Por ejemplo, el mercurio es convertido a vapor, el que es más difícil de atrapar y es liberado al aire. Muchos metales se dividen en pequeñísimas partículas que no pueden ser filtradas, y que son inhaladas o tragadas incrementando su peligrosidad. Investigaciones recientes indican que el plomo y el cadmio, que se disuelven desde las cenizas por efecto de lluvias, logran niveles definidos como peligrosos, por lo tanto requieren de un tratamiento especial ya que serán depositados en rellenos. Otra crítica a la incineración es que reduce el incentivo de reciclar. Muchos ambientalistas creen que hay un lugar para la incineración en la variedad de procesos de tratamiento, pero sólo después de separar potenciales productos peligrosos y sólo si las emisiones gaseosas son controladas en forma apropiada y los residuos sólidos enterrados correctamente.

### **Tratamiento biológico**

Muchos residuos industriales son tratados por métodos biológicos similares a los usados para el tratamiento de efluentes. Los residuos peligrosos a menudo pueden usar este tipo de tratamiento a pesar de que las concentraciones de materiales tóxicos son letales a los microorganismos.

El co-tratamiento de residuos industriales y domésticos con la adición de nutrientes en sistemas biológicos es a menudo un sistema práctico y que ha sido probado en India como un método económico y efectivo comparándolo con los tratamientos químicos.

Consiste en la introducción de microorganismos que consumen, alteran y detoxifican los desechos. Esto es lo que se llama procesamiento secundario.

### 2.4.3 Métodos de Tratamiento de Residuos Peligrosos

#### a). Tratamientos Físicos, Químicos y Biológicos

Existe un gran número de tratamientos físicos, químicos y biológicos a los que se pueden someter los residuos tóxicos y peligrosos, cuya finalidad se dirige básicamente a la recuperación de recursos ( materiales y energéticos ), la detoxificación, y la reducción de volumen previa a su disposición en tierra. La tabla siguiente entrega una lista de estos tratamientos.

**Tabla 2.1. Métodos de Tratamientos de Residuos**

#### **Tratamientos Físicos**

Desorción con Aire  
Congelamiento por Suspensión  
Adsorción con Carbón  
Centrifugación  
Diálisis  
Destilación  
Electrodiálisis  
Electroforesis  
Evaporación  
Filtración  
Floculación  
Flotación  
Cristalización  
Secado por Frío  
Separación Magnética  
Intercambio Iónico  
Destilación con Vapor  
Adsorción con Resinas  
Osmosis Reversa  
Sedimentación  
Extracción L-L de Orgánicos  
Desorción con Vapor  
Ultrafiltración

#### **Tratamientos Químicos**

Calcinación  
Catálisis  
Clorinólisis  
Electrólisis  
Hidrólisis  
Descarga por Microondas  
Neutralización  
Oxidación  
Ozonólisis  
Fotólisis  
Precipitación  
Reducción

#### **Tratamientos Biológicos**

Lodos Activados  
Lagunas Aireadas  
Digestión Anaeróbica  
Compostamiento  
Tratamiento Enzimático  
Filtros de Chorro  
Piscinas de Estabilización

#### **Pre-Tratamientos de Sólidos**

Disgregación y Molienda  
Criogenia  
Disolución

## **b). Tecnologías de tratamiento tradicionales**

Los sistemas de tratamiento físicos, químicos y biológicos son los más utilizados para el tratamiento de residuos peligrosos. A continuación se discuten las propiedades de cada uno de ellos.

### **Sistemas de tratamientos físicos**

Estos procesos incluyen diferentes métodos de separación de fases y solidificación. En el nivel más básico, la separación de fases incluye el uso de lagunas de decantación, secado de borras en lechos, y el almacenamiento prolongado en estanques de proceso. Todos los anteriores dependen de la decantación gravitacional, y los dos primeros permiten la remoción del líquido por decantación, drenaje y evaporación. El uso de lagunas y estanques es ampliamente utilizado para separar aceites de agua en residuos húmedos, después de un tratamiento preliminar con agentes rompedores de emulsiones y ocasionalmente en el caso de estanques, combinados con calentamiento.

### **Solidificación o procesos de fijación**

Estos procesos convierten al residuo en un material insoluble y de características de roca-dura, y se efectúan generalmente previo a la disposición de vertederos. La conversión se logra mezclando el residuo con diferentes reactivos que producen un producto tipo cemento.

El Asbesto que forma una clase de las fibras naturales hidratadas de silicatos, y que aún es utilizado y que provoca enfermedades ocupacionales como asbestosis y cáncer al pulmón, se debe disponer con mucha precaución en bolsas selladas de polietileno o en bloques de cemento

### **Procesamientos de borras**

Una gran cantidad de residuos industriales contienen importantes cantidades de agua. Por lo tanto la masa de residuo que requiere una disposición última puede reducirse sustancialmente eliminando agua en forma eficiente. A menudo esto se puede lograr en lagunas, lechos de secado, filtros al vacío o filtros prensa, centrifugas, etc. También se puede proceder previo a la extracción del agua a un proceso de espesamiento, que se logra en forma gravitacional o también a través de procesos biológicos o por medio del uso de productos químicos como cal.

### **Tratamientos químicos**

Los métodos de tratamiento químicos se usan tanto para facilitar la completa transformación de los residuos peligrosos en gases no tóxicos, así como también para modificar las propiedades químicas del residuo (por ejemplo para reducir la solubilidad en agua o neutralizar acidez o alcalinidad).

**Tabla 2.2 Métodos de Tratamiento Químico**

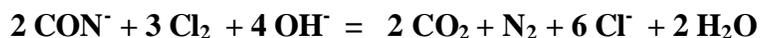
<b>Proceso</b>	<b>Sistema</b>	<b>Efluente</b>
Neutralización	Acido Sulfúrico Cenizas alcalinas Barros de caliza Gases de caldera	Acidos, cáusticos, aguas residuales
Precipitación	Caliza; NaOH ; sulfuros	Metales Pesados, compuestos solubles
Oxidación	Oxígeno , Cloro , Ozono , Peróxidos	Residuos orgánicos o inorgánicos que contienen agentes reductores fuertes ( Ej.: Cianuros )
Reducción	Dióxido de Azufre Sulfitos	Residuos orgánicos o inorgánicos que contienen agentes oxidantes fuertes ( Ej.: Cianuros )
Intercambio Iónico	Lecho fijo de resinas	Eliminación de productos específicos de aguas residuales( Ej. ácido crómico)
Fijación Química	Catalizadores , compuestos inorgánicos	Lodos

**a) Oxidación química**

Como ejemplo de oxidación química se puede mencionar el caso del **Cianuro** el cual es un residuo venenoso que se puede presentar en soluciones líquidas o en forma sólida. Debido a que los residuos con cianuro se pueden transformar fácilmente en productos no tóxicos, existe poca necesidad de verterlos en depósitos o vertederos. Los residuos acuosos de cianuros que se producen en tratamiento de metales, incluyendo borras, se pueden tratar por oxidación química con una solución alcalina con cloro o hipoclorito.



El cianato puede ser oxidado aún más con un exceso de cloro.



Las cantidades de residuos producidos por este proceso son variables, y el mayor factor controlante de la cantidad de residuo generado es la concentración de metales que precipitan a un pH de 8,5 del proceso.

Cuando existen residuos con cromatos, estos pueden ser utilizados como agentes oxidantes y también sirven para el propósito de reducir el cromo hexavalente a la forma menos tóxica de cromo trivalente.

### **b) Precipitación de metales pesados**

Los efluentes del tratamiento de metales, a menudo contienen soluciones con distintos metales pesados tales como **cobre, níquel o zinc**. Estos pueden ser removidos con un exceso de una solución de cal o hidróxido de sodio para precipitarlos como compuestos insolubles en agua. Precipitantes alternativos para metales pesados incluyen sulfuro de sodio, tiourea y ditiocarbonatos todos los cuales producen precipitados insolubles de sulfuro.

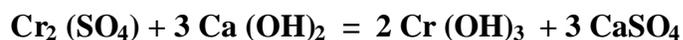
Usualmente la precipitación con sulfuros se usa como proceso final después de una precipitación inicial con cal o soda cáustica.

### **c) Reducción química**

El **ácido crómico** es un material corrosivo y altamente tóxico usado profusamente en el tratamiento de superficies de metales y en el cromado de metales. Se puede reducir químicamente a un estado relativamente no tóxico de cromo(III). Diferentes productos químicos pueden servir como agentes reductores, incluyendo; dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), sales de sulfito (SO<sub>3</sub><sup>-2</sup>), sales de bisulfito (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y sales ferrosas (Fe<sup>+2</sup>). Un proceso típico es el siguiente:



Este proceso se conduce a un pH de 2,5 a 3,0. El cromo soluble (Cr<sup>+3</sup>) es entonces removido por precipitación alcalina:



La reducción de Cr<sup>+6</sup> seguida de una precipitación alcalina produce cantidades significantes de residuo. La estequiometría de la producción de Cr(OH)<sub>3</sub> predice 2 kg. de borra por kg de Cr<sup>+6</sup> tratados. El Cr<sup>+3</sup> también puede ser tratado con NaOH en vez de cal para producir menos borra..

### **d) Neutralización**

Las soluciones acuosas de ácidos minerales se producen en grandes cantidades a partir de industrias químicas. Muchas provienen del tratamiento de metales y contienen metales tales como **hierro, zinc, cobre, bario, níquel, cromo, cadmio, estaño y plomo**. Estos ácidos son extremadamente corrosivos pero pueden ser neutralizados, y usualmente se utiliza cal como el álcali menos costoso en operaciones a gran escala.

Las soluciones alcalinas también se producen en la industria química, pero su composición varía más que en el caso de los ácidos y esto hace su recuperación más difícil. Los residuos alcalinos también vienen de la refinación del petróleo, fabricación de pinturas y limpieza especiales. Aparte de sólidos como arcillas, catalizadores, hidróxidos metálicos, también pueden estar presentes fenolatos, naftenatos, sulfonatos, cianuros, metales pesados, grasas, aceites, resinas naturales y sintéticas, etc. De estos residuos actualmente solo se pueden recuperar los metales. Como soluciones ácidas se pueden usar ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. El ácido sulfúrico forma precipitados más insolubles y genera más residuos que el ácido clorhídrico.

#### **e) Separación de aceites y agua**

Una gran cantidad de residuos de este tipo se descargan constantemente. Algunos residuos que contienen productos orgánicos, pueden ser eliminados por incineración después de separarlos del agua, otros contienen productos cancerígenos (aceites lubricantes) y pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo el tratamiento de residuos de aceites y petróleos no es fácil, especialmente si se forman emulsiones las que necesitan bastante tratamiento para ser separadas (Ej: tratamiento de emulsiones con sulfato de aluminio, con una borra de cal para formar los flóculos que absorben el aceite que puede ser posteriormente quemado). En muchos casos es posible la recuperación de los aceites, como en el caso de emulsiones de grasas en la industria de alimentos, donde se liberan las grasas y se pueden quemar o reutilizar.

También es posible que algunos suelos descompongan materiales aceitosos en sustancias no dañinas, así como también el tratamiento biológico es un método adecuado siempre que no contenga metales pesados.

#### **f) Recuperación de Solventes y Combustibles**

Los solventes combustibles orgánicos son frecuentemente tóxicos y sus vapores cuando se mezclan con aire pueden ser explosivos. Este tipo de residuos es generalmente recuperable y si no es así, se usa la combustión como el mejor método de disposición.

Solventes orgánicos no-combustible incluyen las borras aceitosas, borras con grasas de agentes desengrasantes y removedores de pinturas del tipo hidrocarburos clorinados, los cuales son altamente tóxicos. Aunque sean incombustibles, se pueden incinerar a altas temperaturas usando petróleo diesel u otro combustible auxiliar con la precaución de usar absorbedores para remover el ácido clorhídrico formado.

**Tabla 2.3 Métodos de Tratamiento Oxidativo**

Oxidante	Efluente
Ozono	Varios
Aire ( oxígeno )	Sulfitos ( SO <sub>3</sub> ) Sulfuros S <sup>=</sup> Ion Ferroso
Gas Cloro	Sulfuros Mercaptanos
Gas Cloro ( + cáusticos )	Cianuros ( CN )
Dióxido de Cloro	Cianatos, Pesticidas ( Diquat, Paraquat )
Hipoclorito de Sodio	Cianuros , Plomo
Hipoclorito de Calcio	Cianuros
Permanganato de Potasio	Trazas de Plomo, Fenol , Pesticidas, Organosulfurados , Formaldehído , Manganeso
Peróxido de Hidrógeno	Fenol, Cianuros, Compuestos de Azufre, Plomo

## 2.5 Nuevas Tecnologías para el procesamiento de residuos peligrosos

Los ingenieros están continuamente trabajando y desarrollando nuevos métodos para el tratamiento de los residuos tóxicos con el fin de eliminar o hacerlos menos dañinos. Algunas direcciones creativas involucran a la energía solar y las antorchas de plasma.

En el Instituto de Investigación de la Energía Solar, se están usando tecnologías solares para destruir químicos tóxicos en desechos industriales y en aguas contaminadas. El agua contaminada conteniendo un catalizador se bombea a través de cañerías en colectores solares que enfocan los rayos ultravioleta sobre la mezcla. En un paso a través del colector, un tercio de los contaminantes son convertidos a productos menos dañinos, y en varias pasadas el 90% es destruido.

En otra técnica, el calor del sol es enfocado sobre los colectores que contienen químicos orgánicos en una cámara especial con un catalizador. A temperaturas cercanas a los 1000°C, estos compuestos son convertidos a monóxido de carbono y a hidrógeno, los que pueden ser usados para producir metanol. Un tercer proceso enfoca la luz a una intensidad de 300 soles sobre un estanque de cuarzo que contiene dioxina. La luz rápidamente rompe los enlaces y un 99.9999% de la dioxina es convertida a compuestos menos peligrosos.

La Compañía Eléctrica Westinghouse está desarrollando una “antorcha de plasma”, la que genera temperaturas sobre 5500°C y que puede ser usada para convertir químicos orgánicos difíciles, tales como los PCB líquidos, en gases que pueden ser vendidos como combustible. Incluso se planea usarla para destruir armas químicas viejas.

## **El Reciclaje y otros enfoques para la reducción en las fuentes**

Nuestra sociedad está basada en la fabricación de productos químicos. Como seres inteligentes podemos reducir nuestra dependencia en los tóxicos o “dirigir” a los tóxicos. La reducción del uso de los tóxicos se debe enfrentar en la industria (reduciendo su uso en la fabricación de productos) y en la población (reduciendo su consumo), es decir, mediante un cambio en el estilo de vida y en las actitudes. Así las industrias pueden reducir su uso de tóxicos mejorando sus técnicas de fabricación y los consumidores pueden hacerlo simplemente consumiendo menos. La reducción del consumo se puede lograr de muchas maneras, incluyendo la conservación, el reciclaje y la elaboración de productos sustitutos para los tóxicos.

### **Opciones de la industria**

La visión tradicional de que la industria es una especie de gigantesca máquina que consume materias primas y descarga productos terminados está comenzando a ser reemplazada por otra más comprensiva: la del ecosistema industrial. Mientras la primera enfatizaba la productividad, la última destaca el reciclaje eficiente de los recursos para alcanzar dicha productividad. Las industrias ya han comenzado a reducir su dependencia de muchas sustancias tóxicas usadas en la fabricación de bienes que pueden o no ser peligrosos. Muchos desechos tóxicos y no tóxicos generados se reciclan o al menos se desechan separadamente en vertederos designados. Por ejemplo, en la producción de PVC el ingrediente tóxico es el cloruro de vinilo, el que es fuertemente controlado. Éste puede ser convertido en producto, recuperado para usarlo más o destruido en otros compuestos menos dañinos. Hay dos ejemplos de procesos industriales que ilustran los beneficios de técnicas de reciclaje que han sido recientemente descubiertas:

- Se encontró un uso para los neumáticos usados de los vehículos produciendo una gran gama de nuevos productos, inclusive de nuevos neumáticos. El sistema se usa en Minnesota y en Michigan, no utiliza agua (por lo que no produce efluentes) y no tiene chimenea (porque no produce gases contaminantes). Hay 2 billones de neumáticos en vertederos de neumáticos oficiales y otros 240 millones desechados cada año sólo en USA. El proceso es económico, cuesta la mitad de la goma virgen y produce bienes más baratos que el plástico.
- Una compañía suiza utiliza mezclas de plásticos para hacer bienes durables, como mallas o guías para los parrones. Como los diferentes plásticos no son compatibles porque tienen composiciones diferentes, antes se inhibía el reciclaje del plástico mezclado por la necesidad de separar los diferentes tipos. La principal desventaja es que el plástico reciclado de esta forma no tiene una fibra uniforme por lo que no se puede usar en materiales de construcción o en aquellos sometidos a fuerza.

Incluso existen industrias que usan los desechos tóxicos producidos por otras, lo que evita que estos residuos sean botados en rellenos o en otros sitios. Todavía hay otras vías para que las industrias reduzcan la contaminación con tóxicos mediante el reciclado. El Grupo de Investigación del Interés Público de California (CALPIRG) han señalado tres enfoques pioneros que muchas industrias han tomado:

1. Encontrar sustitutos no tóxicos para los tóxicos.
2. Rediseñar los métodos de producción para eliminar la necesidad de tóxicos.
3. Hacer la producción de manera más eficiente para reducir el uso de tóxicos.

Pero también hay formas de que los consumidores reduzcan su consumo de tóxicos: conservación de la energía, el reciclaje y la compra de productos sustitutos.

## Opciones de los consumidores

1. Conservación de la energía. Es una de las formas más fáciles de reducir el monto de tóxicos porque los sistemas tradicionales de generación de energía crean muchas sustancias peligrosas, como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y CO. Se puede conservar la energía no sólo apagando los artefactos que no se están usando sino también minimizando nuestro uso de ellos o comprando aparatos que sean eficientes (refrigeradores etiquetados con su eficiencia, ampolletas fluorescentes, etc.).
2. Reciclaje. Es cada vez más común encontrar centros de reciclaje en las comunidades. Estos centros reciclan papel, vidrio, estaño, aluminio y algunos plásticos, incluso con contenedores de diferentes colores y con días específicos de recolección. De esta forma, más de la mitad de la basura familiar se puede reciclar. Un ejemplo ilustrativo lo constituye el reciclaje del papel. La producción de este bien contamina una gran proporción de agua y aire, destruye extensas zonas de plantaciones y bosques contribuyendo a la erosión del suelo y al embancamiento de los ríos. Los papeles y cartones constituyen cerca de la mitad del volumen y las dos quintas partes de los desechos municipales, pudiéndose reciclar totalmente. Cada tonelada de papel reciclado salva en promedio a 17 árboles, 25 barriles de aceite, 7000 galones de agua y 3 yardas cúbicas de superficie de relleno. Indudablemente que un aliciente para el reciclaje del papel lo constituye la demanda de productos hechos con papel reciclado.
3. Sustituir los productos tóxicos por aquellos menos dañinos: Mientras que la conservación de la energía y el reciclaje pueden ayudar a reducir el uso de los tóxicos, encontrar sustitutos menos tóxicos es la manera más directa de detener el flujo de estos residuos. Por ejemplo, algunos pesticidas de jardín como el pyrethrum y algunos preservativos de la comida como el ácido acético son menos nocivos que otros. Otros candidatos a sustituirse son el plástico y la espuma plástica ya que la fabricación de ambos requiere de tóxicos, y ninguno es biodegradable (el plástico biodegradable sólo tiene de ello el nombre). Es mejor usar papel u otros productos degradables. También se debe reducir la compra de productos que vengan excesivamente empacados, son mejores aquellos concentrados y en grandes envases.

## Conclusiones

Reducir el uso de los tóxicos por cualquiera de los métodos señalados es un paso muy importante, inclusive si se trata de una decisión individual, ya que se envía un mensaje a la industria de que los productos tóxicos (o aquellos que en su fabricación requieren de tóxicos) no son necesarios. Con ello se incentiva a la empresa a hacer productos menos tóxicos o a desarrollar sustitutos para ellos. En nuestra economía, las acciones individuales del consumidor pueden sumarse y hacerse una gran fuerza. Pero hay otros métodos que se han ido olvidando, y que consisten en evitar comprar productos desechables, eligiendo aquellos que duren más o que sean biodegradables. Antes de desechar un producto usado o gastado, primero se debe reparar, ya que la compra de uno nuevo incluso involucra cierto riesgo (por ejemplo, los sofás vienen rellenos con espuma que libera formaldehído). Además hay que tener cuidado con productos químicos nuevos que parecen seguros sólo porque se conoce poco de ellos.

## **CAPITULO III**

### **TRATAMIENTOS DE RESIDUOS ACEITOSOS**

Las técnicas comúnmente usadas para remover aceites incluyen coalescencia, destrucción de la emulsión, flotación, centrifugación y remoción por contratistas. La remoción del aceite también puede resultar en una remoción adicional de tóxicos orgánicos.

Posteriormente se entrega información acerca del proceso de oxidación química profundizándose en la oxidación con cloro, ozono, peróxido de hidrógeno, etc. y especificándose los equipos y valores relacionados con la oxidación de cianuros, fenoles y otros.

#### **3.1. Aplicaciones y limitaciones**

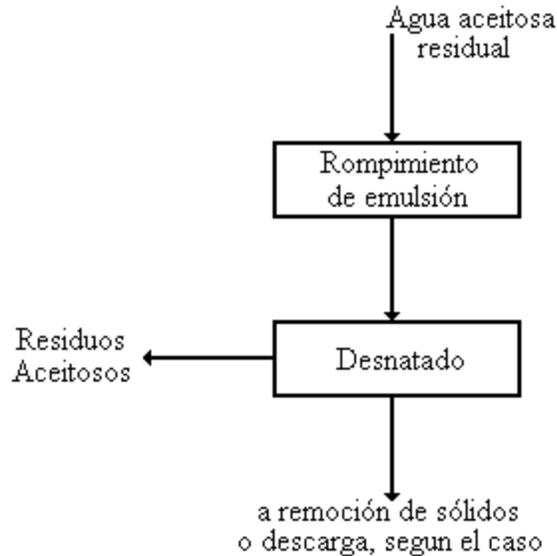
Los residuos aceitosos incluyen líquidos refrigerantes, lubricantes, y desechos de las operaciones de limpieza de muchos equipos, desechos de procesos de pintado y lubricantes de maquinaria. Los residuos aceitosos son, generalmente, de tres tipos: aceites libres, emulsificados o grasas y aceites solubles en agua. La separación del aceite es un proceso ampliamente usado en las siguientes industrias: manufactura de hierro y acero, lavado de autos y otros, acabados metálicos, estructuras de aluminio, manufactura de baterías, químicos de goma y madera, procesamiento de aceite de palma y goma, recubrimiento de alambres y manufactura de jabones y detergentes.

Los residuos aceitosos segregados que se originan en las áreas de manufactura son recolectados en tanques de almacenamiento, estos residuos pueden tener concentraciones de grasas y aceites de hasta 400000 mg/l. Los desechos aceitosos combinados son aquellos generados del lavado de áreas aceitosas, derrames y fugas. Estos generalmente tienen concentraciones de grasas y aceites menores en varios ordenes de magnitud que los residuos aceitosos. Es más, los residuos aceitosos combinados, requieren tratamientos para la remoción de grasas más grandes y más costosos que aquellos sistemas de tratamiento para aguas residuales segregadas porque la combinación de las líneas residuales tienen flujos significativamente mayores.

El tratamiento de residuos aceitosos segregados consiste en su separación del agua asociada. Esta separación puede requerir varias etapas diferentes dependiendo de las características de las aguas aceitosas. Si los aceites son todos del tipo libres o flotantes, medios físicos tales como la decantación o el uso de un separador de aceites por gravedad debería ser usado para remover los aceites. Si los residuos aceitosos son emulsionados, técnicas tales como romper la emulsión o flotación con aire disuelto con la adición de químicos son necesarias para lograr la separación de las grasas. Una vez que la emulsión agua-aceite se rompe, el residuo aceitoso se separa físicamente del agua por decantación o por desnatado (skimming en inglés). Luego que la separación aceite-agua se ha logrado, el agua puede ser llevada a una unidad de precipitación o sedimentación para remover los sólidos suspendidos u otro tipo de tratamiento.

### **3.2. Consideraciones de diseño - rompimiento de la emulsión**

El tratamiento de un agua aceitosa normalmente consiste en romper la emulsión y luego se separa el aceite por desnatado, como se muestra en la siguiente figura:



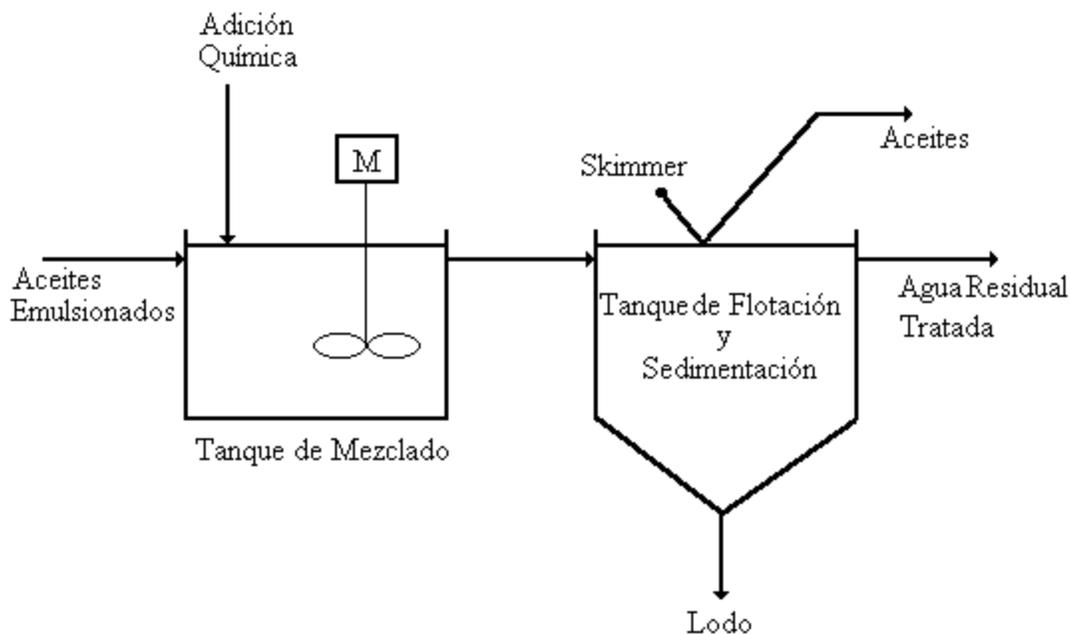
**Figura 3.1 Tratamiento de residuos aceitosos segregados**

El rompimiento de la emulsión se efectúa por adición de químicos (tales como alumbre o polímeros) para lograr la coagulación y floculación de los aceites. Estos aceites que flotan se remueven vía desnatado. Alternativas para esto último incluyen ultrafiltración, flotación con aire disuelto, separadores gravitacionales por coalición, rompimiento térmico de la emulsión y el uso de la centrifugación. La preocupación acerca del precio del aceite ha hecho que algunas industrias manufactureras tiendan hacia técnicas de tratamiento tales como ultrafiltración, osmosis reversa, o centrifugación para recuperar los aceites y reutilizarlos directamente.

El rompimiento de la emulsión es un proceso por el cual los aceites emulsionados son removidos de las mezclas aceite-agua. Los aceites emulsionados son comúnmente utilizados como refrigerantes, lubricantes, y antioxidantes para muchas operaciones. Métodos para el rompimiento de la emulsión incluyen una variedad de procesos químicos, procesos térmicos, y combinaciones de los dos procesos.

El rompimiento químico de la emulsión se puede lograr por un proceso batch o por un proceso continuo.

Un sistema típico (con desnatado incorporado) es el ilustrado en la siguiente figura:



**Figura 3.2 Sistema típico de rompimiento de la emulsión/desnatado**

La mezcla de aceites emulsionados y agua es tratada inicialmente por la adición de químicos al residuo líquido. Se provee de un sistema de agitación (ya sea mecánico o por aumento de la turbulencia de la corriente residual) para asegurar que el químico añadido y el aceite emulsionado sean adecuadamente mezclados para poder así romper el vínculo entre el agua y el aceite.

Finalmente el residuo aceitoso que resulta sube a la superficie y es separado del agua residual remanente por un sistema de desnatado o de decantación. El proceso de desnatado puede ser hecho por cualquiera de los muchos tipos de desnatadores mecánicos que se usan en este momento. Los métodos de decantación incluyen la remoción de la superficie aceitosa por una técnica como el rebalse controlado o por remoción del agua demulsificada por el fondo del estanque. La decantación puede ser llevada a cabo por una serie de líneas tap-off en varios niveles, lo que permite que los aceites puedan ser retirados por el tope o el agua residual por el fondo hasta que el aceite aparezca en la interfase de los dos líquidos. Con cualquiera de estos arreglos, el aceite es normalmente llevado a tanques de almacenamiento para procesamiento o para transporte por algún contratista licenciado.

El rompimiento de la emulsión química se puede lograr con una gran variedad de químicos que incluyen ácidos, sales, o polímeros. Algunas veces estos químicos son usados en forma separada, pero se requiere una combinación de ellos para romper las variadas emulsiones que son comunes en el agua residual. Los ácidos son usados para bajar el pH a 3 o 4 y así pueden partir el enlace iónico entre el aceite y el agua, pero pueden ser muy caros de utilizar, este método es apropiado si existe otra corriente residual ácida que se pueda usar para bajar el pH. Los ácidos son más comúnmente usados en sistemas de recuperación de aceites que en sistemas de remoción de aceites. Las sales de hierro o

aluminio como sulfato ferroso, cloruro férrico, o sulfato de aluminio son comúnmente usadas porque son menos costosas.

Estas sales se combinan con el agua residual para formar ácidos que en consecuencia bajan el pH de la corriente y rompen el enlace agua-aceite. Las sales tienen el beneficio adicional que ayudan en la aglomeración de las gotas de aceite. Sin embargo, el uso de estas sales produce más lodos debido a la adición de fierro y aluminio. Los polímeros, como las poliaminas o los poliacrilatos y sus copolímeros, han demostrado ser efectivos rompedores de emulsiones y generan menos lodos que las sales metálicas.

Después de la adición química, la mezcla se agita para asegurar un buen contacto entre los aceites emulsionados y el agente demulsificante. Con la adición de la cantidad apropiada de químicos y una buena agitación, emulsiones de un 5 a 10% en aceite pueden ser reducidas a una emulsión del 0.01% de aceite. La tercera etapa del proceso de rompimiento de la emulsión es la de permitir un tiempo suficiente para la separación de la mezcla aceite-agua. La diferencia de gravedades específicas permiten que el aceite ascienda a la superficie en aproximadamente dos horas. Se puede incorporar calor para disminuir el tiempo de separación. Luego de la separación, el procedimiento normal incluye un desnatado o una decantación del aceite del estanque.

### **3.3. Tecnología, selección y evaluación**

La tecnología de rompimiento de la emulsión puede ser aplicada al tratamiento de mezclas emulsionadas de aceite y agua de industrias de acabado de metales o donde sea necesario separar aceites, grasas, jabones, etc. de aguas residuales. Ciertas emulsiones refrigerantes de maquinaria no pueden ser química o térmicamente rotas y deben ser tratadas con ultrafiltración.

La mayor ventaja del rompimiento de emulsiones con químicos es la alta eficiencia del proceso de remoción de aceites. Para una aplicación apropiada y económica de este proceso, las aguas aceitosas deben ser corrientes segregadas de otras aguas residuales, esto se puede hacer ya sea por almacenamiento en acumuladores previos al sistema de tratamiento o por alimentación directa al sistema de remoción de aceites residuales. Si una cantidad significativa de aceites libres está presente, es económicamente ventajoso anteponer al rompimiento de la emulsión un separador gravitacional. Los costos de químicos y energía pueden ser altos, especialmente si se utiliza calor para acelerar el proceso.

El rompimiento químico de la emulsión puede ser altamente confiable si se hace un análisis adecuado previo a la selección de los químicos, y un entrenamiento apropiado del operador para asegurar que los procedimientos establecidos se están siguiendo. Para el rompimiento químico de la emulsión se requieren mantenciones rutinarias de las bombas, motores y válvulas así como también una limpieza periódica del tanque de tratamiento para remover cualquier sedimento que se pueda estar acumulando. El uso de ácido o condiciones ácidas requerirá de un tanque recubierto, y este recubrimiento debe ser revisado periódicamente. El proceso de rompimiento de la emulsión genera lodos, los cuales requieren de una disposición apropiada.

### **3.4. Desempeño**

El funcionamiento logrado por un proceso de rompimiento de la emulsión depende de la adición de la cantidad apropiada de agente demulsificador, una buena agitación para un mezclado adecuado, un tiempo de retención suficiente para completar el rompimiento de la emulsión. Como existen varios tipos de aceites emulsionados, se debe conducir un estudio detallado para determinar las técnicas de tratamiento más efectivas y los químicos para una aplicación en particular.

### **3.5. Consideraciones de diseño - desnatado**

El desnatado es usado para remover los desechos que flotan y normalmente se lleva a cabo en un estanque que permita que el residuo (con una gravedad específica menor que la del agua) suba y permanezca en la superficie. Los equipos de desnatado son entonces apropiados para la remoción de los residuos aceitosos de residuos líquidos crudos después de cualquier demulsificación que sea necesaria. Mecanismos comunes de desnatado incluyen al tipo tambor rotatorio, que recoge el aceite flotante mientras rota. Un borde afilado raspa el aceite del tambor y lo acumula para disposición o rehuso. A la porción acuosa se le permite que fluya bajo el tambor rotatorio. Ocasionalmente se instala una pantalla luego del tambor rotatorio, esto tiene la ventaja de retener cualquier aceite flotante que se escape al tambor desnatador. El desnatador de correa vertical es empujado verticalmente a través del agua, recogiendo aceite desde la superficie el cual es nuevamente raspado y recolectado en un acumulador. Los sistemas de diseño y control son importantes, en desnatadores de tambor rotatorio y de correa, para asegurar un flujo uniforme a través del sistema y evitar que el aceite bypasee el mecanismo de desnatado.

Los separadores gravitacionales, como el tipo del Instituto Americano de Petróleo (API), utiliza pantallas sobre y bajo el flujo para desnatar la superficie del agua residual. Una pantalla sobre y bajo el flujo permite que una pequeña cantidad de agua se pierda en la porción aceitosa la cual va hacia un acumulador para su disposición o rehuso, mientras que la mayoría del agua residual fluye bajo la pantalla. Esto es seguido por una pantalla de sobreflujo, que es colocada a una altura relativa a la primera pantalla tal que solo la porción aceitosa pase sobre el primer baffle durante la operación normal de la planta. Un sistema de entrada por difusión, como un baffle de corte vertical, ayuda en la creación de un flujo uniforme a través del sistema y aumenta la eficiencia de remoción del aceite.

La tendencia moderna es mantener el diseño del separador pequeño y simple para reducir costos. Las configuraciones típicas de diseño incluyen: decantadores cilíndricos horizontales, decantadores cilíndricos verticales, decantadores con fondo cónico además del tipo API clásico. Las pantallas ayudan a proveer de mayor área superficial, lo que promueve la coalescencia de las gotas de aceite. El diseño de fondo cónico es particularmente útil si sólidos pesados van a estar sedimentando mientras la separación del aceite se lleva a cabo.

### 3.6. Criterios de diseño

En el diseño de un separador como el API, que es el separador de aceites gravitacional más común; es de mucha ayuda tener datos sobre la influencia de la variación de temperatura, la gravedad específica del agua en el separador, la gravedad específica del aceite en el separador y el flujo de entrada al separador. El diseño básico es una piscina rectangular larga que provee de un tiempo de residencia suficiente para que la mayoría del aceite flote a la superficie y sea removido. Se ha encontrado que son necesarios dos o más canales paralelos para llegar a las siguientes limitaciones prácticas:

- Los canales de un separador equipados con raspadores aéreos normalmente están limitados a un ancho de 6.1 m.
- El efecto perturbador en la operación de raspadores aéreos en aguas poco profundas lleva a la recomendación que la profundidad mínima del agua debe ser 0.9 m.
- Se recomienda que se provea un mínimo de dos canales paralelos para que uno esté disponible para usar mientras el otro sea sacado fuera de servicio para limpieza o reparación.

Otros criterios de diseño son:

- La velocidad horizontal sea de 15 mm/s máximo.
- La profundidad este entre 0.9 y 2 m.
- La razón de profundidad a ancho este entre 0.3 y 0.5 m.
- El ancho esté entre 2 y 6.1 m.

A continuación se entrega una tabla con las áreas superficiales mínimas para separadores rectangulares API.

**Tabla 3.2. Áreas superficiales mínimas para separadores rectangulares (Agua fresca)**

Temperatura del efluente	50 °F			70 °F			105 °F		
Gravedad específica del aceite (grados API)	19.70	26.00	31.00	19.70	26.00	31.00	19.70	26.00	31.00
Gravedad específica	0.94	0.90	0.87	0.94	0.90	0.87	0.94	0.90	0.87
Velocidad de ascenso de gota de aceite $v_t$ (fmp)	0.11	0.18	0.23	0.16	0.25	0.32	0.28	0.41	0.50
Velocidad de flujo Horizontal, $v_H$ (fmp)	1.70	2.70	3.00	2.40	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
$v_H/v_t$ (fmp)	15.00	15.00	13.00	15.00	11.80	9.40	10.50	7.40	6.00
Factor de Turbulencia, F	1.64	1.64	1.59	1.64	1.56	1.50	1.52	1.44	1.38
Razón de sobreflujo (gpm/ft <sup>2</sup> /área)	0.50	0.80	1.07	0.73	1.21	1.60	1.39	2.15	2.75
(gpd/ft <sup>2</sup> /área)	724	1154	1540	1056	1744	2314	2000	3100	3960
Área/1000 gpm (ft <sup>2</sup> )	1985	1246	934	1362	824	624	720	465	346

**Notas:**  
 $1 \text{ gal/d/ft}^2 = 4.715 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$   
 $1 \text{ fmp} = 5.1 \text{ mm/s}$   
 $^{\circ}\text{C} = 1.8 \cdot (^{\circ}\text{F} - 32)$

### **3.7. Selección técnica y evaluación**

El desnatado de aceite es utilizado en industrias como las de acabado de metales para remover aceites de aguas residuales de muchos procesos diferentes. El desnatado es aplicable a cualquier corriente residual que contenga contaminantes que floten hacia la superficie. Es usado en conjunto con sistemas de rompimiento de emulsiones, flotación con aire disuelto, clarificadores, y otros equipos de Sedimentación.

Los separadores API u otro tipo de separadores gravitacionales son más apropiados cuando la cantidad de aceite superficial que fluye a través del sistema es significativa en conjunto con los aceites libres. Desnatadores tipo tambor, correa o rotatorios son aplicables cuando las corrientes residuales traen pequeñas cantidades de residuos aceitosos flotantes. El uso de un separador gravitacional antes del sistema de rompimiento de emulsiones es un método muy efectivo para remover aceites libres de corrientes de aguas residuales aceitosas.

El desnatado como un pretratamiento es efectivo para la remoción de sustancias que flotan naturalmente, como los aceites libres, y mejora la eficiencia de los tratamientos aguas abajo. Muchos contaminantes, particularmente aceite emulsionado disperso, no flotarían naturalmente pero requieren de tratamientos adicionales. Por ello el desnatado solo no removerá todos los contaminantes que son removibles por tecnologías más sofisticadas.

Por su simplicidad, el desnatado es una técnica bastante confiable, pero un sistema mecánico de desnatado requiere de lubricación periódica, ajustes, y reemplazo de partes desgastadas. La capa de residuo recolectado debe ser dispuesta en una forma apropiada. Debido a que grandes cantidades de agua están presentes en los residuos recolectados, una combustión directa o incineración no son siempre posibles.

### **3.8. Desempeño**

El desempeño alcanzable por el desnatado depende de la operación mecánica apropiada del desnatador y de la razón de separación de la mezcla aceite-agua que es afectada por factores como el tamaño y gravedad específica de las gotas de aceite. En la siguiente tabla se muestran ejemplos de desempeño de desnatadores de grasa y aceites.

**Tabla 6. Datos de desempeño del desnatado para aceite y grasa (mg/l)**

Identificación de la planta	Entrada de aceite y grasa (mg/l)	Salida de aceite y grasa (mg/l)	Tipo de Desnatador
6058-14-0	395538	13.3	API
6058-15-5	583800	16	API
6058-14-0	19.4	8.3	Correa
11477	61	14	Correa

### **3.9. Costos**

La separación de residuos aceitosos con rompimiento químico de la emulsión se puede hacer en sistema batch o continuo. Cada modo de operación, el equipo asociado a cada modo, y la incorporación de suposiciones de diseño y operación se discuten a continuación.

Los costos de inversión asociados con los modos de operación continua y batch para el rompimiento químico se muestran en la figura 6-11 el apéndice como una función del flujo de la corriente residual. Para la operación continua, la curva de costos se basa en la compra e instalación de los siguientes equipos:

- 2 estanques de dilución de alumbre de 946 litros.
- 2 estanques de mezclado para la dilución de alumbre.
- 2 bombas de velocidad variable para la alimentación de alumbre.
- 2 estanques de dilución de polímeros de 946 litros.
- 2 estanques de mezclado para la dilución de polímeros.
- 2 bombas de velocidad variable para la alimentación de polímeros.
- 1 estanque de mezclado con entrada para alimentación de químicos ( $t_r=15$  min.)
- 1 estanque de separación gravitacional de acero de 1 hora de tiempo de residencia.
- 1 mecanismo de desnatado por aceite superficial.
- 1 bomba de transferencia del aceite separado.
- 1 estanque de almacenamiento del aceite residual recuperado (20 días tpo. retención)
- 1 bomba de transferencia del efluente del tanque de separación.

Para la operación batch, la curva de costos se basa en la compra e instalación de los siguientes equipos:

- 1 estanque de dilución de alumbre de 946 litros.
- 1 estanque de mezclado para la dilución de alumbre.
- 1 bomba para la alimentación de alumbre.
- 1 estanque de dilución de polímeros de 946 litros.
- 1 estanque de mezclado para la dilución de polímeros.
- 1 bomba para la alimentación de polímeros.
- 2 estanques de separación gravitacional de acero.
- 2 mezcladores
- 1 bomba de transferencia del efluente del tanque de separación.

Los sistemas de rompimiento químico de la emulsión han sido dimensionados con una capacidad un 20% de exceso. La selección del modo de operación está basada en una base de menor costo.

Los costos de operación y mantención asociados a la unidad de rompimiento químico de la emulsión consisten en costos de mano de obra y materiales. los costos de mano de obra anualizados para ambos modos de operación se muestran en la figura 6-12 del apéndice.

Para ambos modos, los costos de mano de obra están basados en la cantidad de horas hombre requeridas para diluir y mezclar las soluciones de polímero y alúmina y la operación de la unidad. Se estimó que la mano de obra general requerida era de 0.75 horas hombre por turno de 8 horas o proceso batch de 8 horas. Se estimó la mantención general del sistema completo en 2 horas hombre por semana.

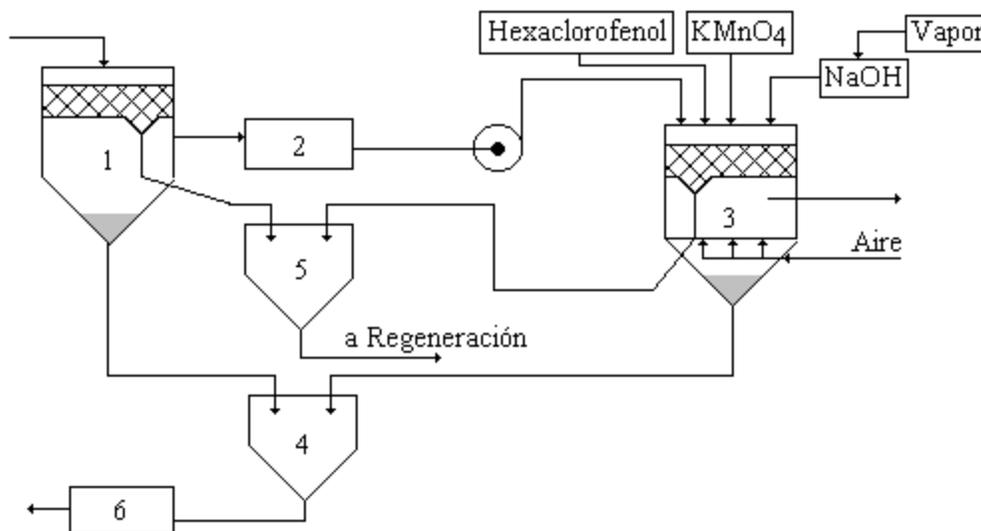
Se calculó los costos de mano de obra usando una tarifa de US\$ 6.71 por hora hombre más un 15% adicional para cubrir gastos indirectos. Los costos asociados al material son los costos los requerimientos de adición química de alumbre y de polímero. El polímero se le añade al agua residual hasta que se llega a una concentración de 150 mg/l. La alúmina se añade al agua residual hasta llegar a una concentración de 25 mg/l. Los costos de químicos se han calculado según los siguientes precios:

US\$ 0.38 por kg de alumbre  
 US\$ 1.55 por kg de polímero.

Se supone que la unidad trabaja 24 horas al día, 5 días por semana y 52 semanas al año.

### **3.10. Caso histórico**

En 1975 Ponamarev y Zakharina describieron una instalación Rusa de regeneración de una emulsión residual, la cual es mostrada en la siguiente figura.



**Figura 3.3 Esquema de regeneración de la emulsión**

De acuerdo a este esquema el agua residual aceitosa es alimentada a un separador gravitacional (1), donde la materia suspendida y el aceite son separados. El aceite flotante es alimentado a un recolector de aceites (5), y el material suspendido, recolectado en la

parte cónica, es colocado en un tanque de almacenamiento de lodos (4). Se utilizan filtros para remover la emulsión de sólidos suspendidos finos (2). Luego de la filtración, la emulsión se bombea a un proceso de flotación (3) al que, si es necesario y si hay olor a hidrógeno sulfurado, se le añaden 15 mg/l de  $\text{KMnO}_4$ , 1 g/l de nitrato de sodio y 0.2 g/l de hexaclorofenol en solución alcalina. Para renovar las propiedades de la emulsión se le añade una emulsión de corte y agua. Después que todos los compuestos se le han añadido a la emulsión, ésta se mezcla con aire comprimido y el aceite no emulsificado se remueve por flotación. El aceite se aísla en el estanque de flotación-reacción y se bombea al colector (5) luego se alimenta a la regeneración. El lodo del tanque de almacenamiento de lodos se deshidrata con filtros prensa.

Si las emulsiones residuales no pueden ser regeneradas, éstas deben ser rotas. Debido a la alta estabilidad de las emulsiones, se deben tratar por métodos como coagulación, flotación y/o centrifugación.

En la coagulación se usan como reactivos sales férricas, de aluminio, de calcio o magnesio, las cuales en la hidrólisis producen coloides con carga positiva. En su interacción de los micelos cargados negativamente se produce una coagulación mutua además de la formación de suspensiones, que contienen partículas de hidróxidos metálicos pegadas a la superficie de las gotas de aceite y de los agentes emulsificantes.

La aplicación de sulfato férrico con limo, cloruro férrico con ácido sulfúrico y sulfato de aluminio con limo o hidróxido de sodio, han sido las más efectivas para el rompimiento de la emulsión. La dosificación óptima del coagulante varía entre 3 y 7 mg/l dependiendo del contenido de aceite emulsionado.

Un análisis indica que el volumen de lodo separado promedia entre 17-20% del efluente total. Dependiendo del tipo y concentración del aceite, el lodo puede sedimentar o bien flotar. En un sinnúmero de casos el residuo está en la forma de flóculos en todo el volumen de estanque decantados. Es por esto que la determinación del método de separación de la emulsión residual es un problema importante.

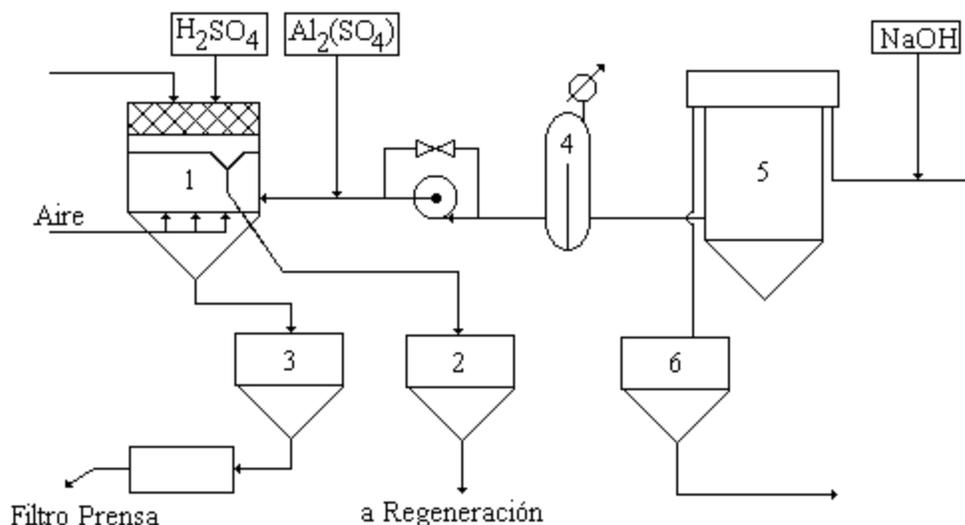
El método de flotación se investigó en una planta piloto, y se mostró que la saturación con aire de la emulsión se debe producir a una presión de 3 atm; el tiempo de saturación debe ser de 5 min. y el período de flotación debería ser de 15-20 minutos. Los reactivos deben ser añadidos a la emulsión inmediatamente antes del saturador. Las dosis óptimas de los agentes coagulantes para una emulsión con 30 g/l de aceite son: sulfato de aluminio - 6 g/l; sulfato de hierro - 7 g/l; cloruro férrico - 4 g/l; con la adición de 6 g/l de ácido sulfúrico. El volumen de la espuma formada es igual a un 20-25% del volumen del efluente que está siendo tratado.

El contenido de material soluble con éter en el residuo tratado es de 0.15-0.3 g/l. El análisis mostró que la concentración de aceite mineral es igual a 50-70 g/l, y que el material soluble con éter son agentes emulsificantes.

Con el propósito de disminuir el volumen de espuma, se llevaron a cabo pruebas con agentes floculantes como el "komet" y poliacrilamida. Se estableció que con estos

agentes floculantes con dosis de 10-100 m/l se podía disminuir el volumen de espuma en un 30-50%.

En base a la investigación realizada, se diseñó una instalación para la degradación de emulsión de aceite y se construyó en varias plantas industriales, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.4. Esquema de rompimiento de la emulsión por flotación**

De acuerdo a este esquema, la emulsión residual es dirigida desde la planta hasta el tanque decantador (1), donde se añade el ácido sulfúrico. El mezclado del ácido se hace con aire comprimido. Con este proceso se reduce el pH de la emulsión a 6-7. Después que la emulsión residual se retiene en un decantador por una hora, y se le permite al aceite subir a la superficie, se alimenta el aceite flotante al recolector (2), y el lodo se introduce al estanque almacenador de lodos (3). La emulsión que no se rompió en el sedimentador se alimenta a la unidad de flotación donde ocurre la segunda etapa del tratamiento. El agente coagulante se alimenta al efluente antes del saturador (4). El saturador debe diseñarse de forma que toda la descarga del efluente emulsionado pase por él. La emulsión saturada con aire se introduce al compartimento de flotación (5). La espuma condensada se retira de la superficie del compartimento de flotación y se alimenta al recolector de espuma (6). El líquido clarificado se neutraliza hasta pH=7 con NaOH, agua o limo, y luego se descarga al sistema de alcantarillado donde se mezcla con las aguas residuales de otras empresas y se va a las facilidades de tratamiento completo para procesarlo. La espuma de la unidad de floculación se alimenta directamente a un incinerador o se mezcla con los lodos y se tratan juntos.

## CAPITULO IV

### NEUTRALIZACIÓN

#### 4.1. Descripción

La neutralización es un proceso que modifica una corriente de residuo, ácido o básico a un pH cercano a la neutralidad. La neutralización es necesaria en una variedad de situaciones.

- Precipitación de metales pesados disueltos.
- La prevención de corrosión de metales y/o daños de materiales de construcción.
- Tratamiento preliminar, permitiendo la operación efectiva de procesos de tratamiento biológico.
- Proveer de un pH neutro al agua para uso de recicló y reducir los efectos perjudiciales en el agua recibida.

La neutralización se usa también en la ruptura de emulsión aceitosas y en el control de velocidad de reacción química.

Simplemente, el proceso de neutralización es la interacción de un ácido con una base. La propiedad típica expuesta por un ácido en solución es el resultado de la concentración del ion hidrógeno, ( $H^+$ ). Similarmente la propiedad alcalina (o básica) son el resultado de la concentración del ion hidroxilo, ( $OH^-$ ). En soluciones acuosas la acidez y la alcalinidad, se define con respecto al pH, donde el  $pH = -\log(H^+)$ , y  $pH = 14 - \log(OH^-)$  (a temperatura ambiente), respectivamente.

En el sentido estricto, la neutralización es el ajuste de pH a 7, el nivel en que la concentraciones de del ion hidroxilo y ion hidrógeno son iguales. Soluciones con excedente de concentración del ion hidroxilo ( $pH > 7$ ) son llamadas básicas; soluciones con excesivo ion hidrógeno ( $pH < 7$ ) son ácidas.

El ajuste de pH a 7 no es práctico o no es deseable en el tratamiento de residuo, el termino “neutralización” es usado algunas veces para describir el ajuste de pH a valores cercano a la neutralidad, usualmente en un rango de pH de 6 a 9. Una sistema típico de neutralización se muestra en la figura 1.

#### 4.2. Tipos representativos y modificaciones

Hay muchos métodos aceptables de neutralización sobre acidez o sobre alcalinidad de agua de residuo, tal como:

- La mezcla de residuo ácido y alcalino dan efecto cercano a pH neutro.
- Pasar residuo ácido a través del lecho de piedra caliza.
- Mezcla de residuo ácido con caliza.

- Adición de soluciones alcalina concentrada (p.e., soda cáustica [NaOH(o ceniza de soda [Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>() de residuo ácidos.
- Soplado de gas de venteo de caldera a través de residuo alcalino.
- Adición de dióxido de carbono comprimido (CO<sub>2</sub>) a residuo alcalino.
- Adición ácida (p.e., sulfúrico o clorhídrico) a residuo alcalino.

El método elegido depende de la característica del agua de residuo y su subsiguiente manejo o uso. Por ejemplo, la mezcla de diversas corrientes es insuficiente como un paso preliminar de un tratamiento biológico o descarga sanitaria de alcantarillado. En este caso, la adición química como complemento se requiere para obtener un pH apropiado.

Los químicos más usados son la cal (para levantar el pH) y el ácido sulfúrico (para bajar el pH). La piedra caliza es el reactivo más barato para residuo ácido y fácil de usar, pero ineficiente en la neutralización de residuo que contengan sulfato porque el sulfato de calcio puede precipitar, cubriendo la piedra caliza y inactivándola. La soda cáustica o ceniza de oda son las más caras para el uso pero puede cambiarse por la cal en el tratamiento de residuo que contiene sulfatos.

Si la corriente de residuo es deficiente en nitrógeno o fosfato, la adición de amoniaco o trisodio de fosfato, sirve como un doble propósito, de proveer de alcalinidad y deficiencia de nutrientes.

La mezcla de corriente de residuo puede ser realizada en un estanque colector, estanque de mezcla rápida (donde el tratamiento químico también puede ser agregado), o en un estanque de nivelación. Los químicos pueden ser agregados en el estanque de mezclado o directamente a un clarificador. El ajuste de pH final en la descarga puede hacerse en un estanque de neutralización pequeño o al final del proceso de tratamiento.

### **4.3. Rango tecnológico**

La neutralización es considerada como una tecnología demostrada y se usa ampliamente en el tratamiento de residuo industrial.

### **4.4. Aplicaciones**

La neutralización es usado como un tratamiento primario o en la preparación para la descarga en las industrias siguientes:

- Fabricación de batería.
- Formación de aluminio.
- Minería del carbón.
- Fabricación de químicos inorgánico.
- Fabricación del Hierro y el Acero.
- Equipos Fotográficos.
- Fabricación de explosivos.
- Fabricación de jabón y detergente.

- Corrientes de planta de energía eléctrica.

Se usa también sobre una base limitada en la industrias siguientes:

- Autos.
- Procesamiento de gomas.
- Maderas y gomas químicos.
- Pinturas.

En la categoría de fabricación del acero en la industria del Acero y Hierro, el ácido es agregado al sistema de reciclo desde el horno de oxígeno básico (BOF) con sistema de control de polución de aire húmedo para neutralizar el pH de los tipos de residuo de agua alcalina. En esta etapa también es posible agregar cal para neutralizar aguas de residuo ácido en la operación del horno. Si el tratamiento principal (central) es practicado, la neutralización a veces es lograda por la mezcla de residuos ácidos con residuos alcalinos con otras fuentes que son compatible con el tratamiento.

En la industria química de goma y madera, la neutralización es requerido para ajustar el pH de una corriente de residuo antes del tratamiento biológico o otro tratamiento que pueda llevarse a cabo. El rango de pH del efluente está entre 3 a 9 y debe bajarse a menos de 3 para ruptura de emulsión aceitosas y, levantado a aproximadamente a un pH 9 para la precipitación de metales.

#### **4.5. Ventajas y limitaciones**

La neutralización es una tecnología con eficiencia comprobada. Las otras ventajas incluyen control automático del proceso y operación en condiciones ambientales (15 - 32 °C o 60-90 °F).

La mayor limitación de la neutralización es que está sujeto a la influencia de la temperatura y el efecto del calor resultante en la mayoría de las reacciones químicas. En la neutralización la reacción entre el ácido y el álcali normalmente es exotérmica (libera calor), que levanta la temperatura de la corriente del agua de residuo y puede crear una condición indeseable. Un valor promedio para el calor liberado durante la neutralización de soluciones fuerte de ácidos y bases es de 13.400 cal / mol de agua formada. Al controlar la velocidad de adición del reactivo neutralizante, el calor producido puede disiparse y disminuir el aumento de temperatura. Para cada reacción la temperatura final depende de la temperatura inicial del reactivo, la especie que participa en la reacción (y sus calores de solución y reacción), la concentración de los reactivos y la cantidad de reactivo en proporción estequiométrica. En la mayoría de los casos una planificación apropiada en la neutralización con respecto a la concentración de los agentes neutralizantes, velocidad de adición, tiempo de reacción y diseño del equipo puede aliviar el problema del calentamiento.

La neutralización usualmente muestra un incremento del contenido de sólido disuelto, debido a la adición de agentes químicos.

Los aniones que resulta de la neutralización de ácidos sulfúrico y clorhídrico, son sulfatos y cloros respectivamente, que no son considerados peligrosos pero los límites de descarga recomendado están basados en el problema del agua potable. Los cationes que están presente después de la neutralización que involucra la soda cáustica y la cal (o piedra caliza) son el sodio y calcio (posiblemente el magnesio), respectivamente que no son tóxicos y no tienen límite recomendado de descarga. Sin embargo, el calcio y el magnesio son responsable de la dureza del agua y problema de escamamiento.

La acidificación de corrientes que contienen sales, como sulfitos, producirán gases tóxicos. Si no hay alguna alternativa satisfactoria el gas de ser removido mediante el restregamiento (limpieza) o otro tratamiento.

#### **4.6. Confiabilidad**

La neutralización es altamente confiable con la verificación apropiada, con el control y un pre-tratamiento de las sustancia que intervienen en el control.

#### **4.7. Requerimientos químicos**

Los químicos usados en la neutralización son específicos en el tratamiento existente en el agua de residuo. Los químicos siguientes son los más usados:

- Cal [ $\text{CaO}$  o  $\text{Ca(OH)}_2$ ]
- Piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ )
- Soda cáustica ( $\text{NaOH}$ )
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Ácido Clorhídrico ( $\text{HCl}$ )

Cuando el tratamiento es deficiente el agua de residuo, los siguientes químicos pueden usarse:

- Fosfato de amonio ( $\text{Na}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )
- Fosfato trisodio ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ )

La selección de un químicos para la neutralización depende de muchos factores tales como precio, disponibilidad y compatibilidad con el proceso. El ácido sulfúrico es el ácido más usado en la neutralización de residuo alcalinos. Es menos costos que el ácido clorhídrico, pero tiende a formar precipitados con el calcio, conteniendo agua de residuo alcalino. Cuando el ácido clorhídrico es usado, los compuestos formados son solubles. Una consideración importante en el uso de reactivos alcalinos para la neutralización de agua de residuo ácido es el “factor de basicidad”, el cual es el número de gramos equivalente de óxido de calcio en la capacidad de neutralizar de un álcali específico. La soda cáustica tiene un alto factor de basicidad y una solubilidad alta, pero es cara. La cal hidratada es menos

costosa, pero tiene baja basicidad y solubilidad y forma precipitados con agua de residuos ácidos que contienen ácidos sulfúrico, causando eliminación y problema de escamamiento. La piedra caliza y las cenizas de soda tienen una basicidad de baja a moderada y la ceniza de soda tienen una solubilidad más alta que la cal hidratada. La piedra caliza es la menos soluble de todos los materiales.

#### **4.8. Generación de residuos**

La neutralización puede ser acompañada por la reducción en la concentración de metales pesados si el tratamiento procede a un pH alcalino. Esto puede resultar en la generación de residuos que pueden removerse en operaciones posteriores. Donde los productos sólidos se forman (como en la precipitación de sulfato de calcio o hidróxidos de metales pesados), es necesario disponer de clasificadores, espesadores y filtros; si el precipitado es de pureza suficiente, sería un producto rentable; de otra manera, debe idearse un plan de eliminación.

#### **4.9. Criterios de diseño**

Dependiendo de los volúmenes del agua de residuo se usa un tratamiento discontinuo o un tratamiento continuo. Un sistema continuo empleará sistemas automatizados de control para reducir fluctuaciones de pH y aumento eficiencia de reacción. Un sistema de control mide el pH de la solución y controla la adición del agente neutralizante para mantener los efluentes dentro de los límites aceptable de pH. La operación del sistema de control son basados en factores como el flujo, fortaleza de la base o ácido y el método de agregar el agente neutralizante.

El sistema de neutralización puede diseñarse como una o varias etapas. Por regla general, puede usarse una etapa si el pH del agua de residuo cruda está entre 4 y 10. Dos etapas se requieren frecuentemente si el pH está cercano a 2 o sobre 10. Más de dos etapas se utiliza si el pH está bajo 2 o sobre 12.

El tamaño estanque de neutralización depende del volumen o flujo del agua de residuo, tiempo de reacción, la solubilidad del reactivo y los precipitados insolubles formados en la reacción.

#### **4.10. Desempeño**

Cada industria lleva una hoja de datos del rendimiento de la neutralización.

#### **4.11. Costo de la neutralización**

##### **a) Diseño básico**

Este estudio está hecho para la neutralización de corrientes de aguas de residuo ácida o básica por adición de ácido o base. Este sistema como se muestra en la figura 2

consiste de un sistema de adición química y con 2 etapas de neutralización, con un tiempo de residencia en el primer estanque de 5 minutos y de 20 en el segundo. El principal factor de costo y diseño para esta tecnología es el flujo de agua de residuo. Un factor de escala es usado para ajustar la presencia o carencia de flujo iguales en la corriente superior de la unidad. Otros factores importantes la acidez de flujo de entrada, alcalinidad, pH, TDS y TSS. Tres métodos alternativos de estimar los requerimientos químicos de neutralización se proveen correspondiendo a los tipos de información disponible. El método preferido está basado en la dosis de diseño de ácido sulfúrico o la base (cal hidratada o soda cáustica) requerida para neutralizar la corriente de aguas de residuo en base a información de la acidez de la corriente de entrada o alcalinidad (en mg/l CaCO<sub>3</sub> equivalentes). Si estos datos no son disponibles, la adición de reactivo requerida puede aproximarse basados en datos de pH. Para corrientes donde no se dispone de alcalinidad, acidez y datos de pH, una estimación de dosis química standard puede usarse con la mejor base ingenieril. Sin embargo, se debe tener presente que el uso de estos dos últimos métodos puede introducir a errores considerables.

#### **a.1) Fuente**

La información de costo unitario en este informe se basa en el BAT Effluent limitations Guidelines engineering study for the Organic Chemicals / Plastics and Synthetic Fibers Industries (USEPA 1982a). El desarrollo del método para el factor de diseño es basado en las suposiciones y procedimientos en el Contractor Developed Design and Cost Model (USEPA 1982a).

#### **a.2) Datos requeridos**

Flujo de agua de residuo (l/s) (mgd)  
Alcalinidad y acidez (en mg/l CaCO<sub>3</sub> equivalentes) pH  
TDS, TSS (mg/l)

#### **a.3) Limitaciones**

Ninguna.

#### **a.4) Pre-tratamiento**

La neutralización comúnmente es precedida por la nivelación de corrientes, excepto cuando se quiere evitar corrosiones severas a los equipos o unidades siguientes.

#### **a.5) Ecuación de diseño**

El promedio diario de la corriente de agua de residuo en l / s (mgd) es primordial en el factor de costo de inversión y el diseño para sistemas de neutralización. El tiempo de residencia de diseño de las cámaras de atenuación son de 5 y 20 minutos respectivamente, en promedio 120% de corriente diaria. Un factor de escala se aplica a la estimación de costo de inversión, si la unidad de neutralización precede de la nivelación de corriente se debe considerar para un tamaño de unidad de 200% en vez de 120%.

## **a.6) Tratamiento subsiguiente**

Ninguno especificado.

## **b) Costo de capital**

El flujo del efluente es lo principal en el factor de costo de capital en esta unidad de proceso. Los costos de inversión pueden estimarse para los sistemas de neutralización menor o igual a 8.76 l/s (0.2 mgd) en la capacidad se la curva de costo de bajo orden (figura 2) y para sistemas entre 8.76 y 876 l/s (0.2 y 20 mgd) en la capacidad se usa la curva de costo de alto orden (figura 3). Un factor de escala de 1.67 es aplicada al costo de inversión si la unidad de neutralización no es precedida por una unidad de nivelación. La estimación de costos usadas en estas curvas deben ajustarse a valores actuales con sus respectivos índice de costos.

### **b.1) Datos de Costo**

Los artículos (\*) incluidos en la estimación de curva de costo de inversión son como se indica a continuación (USEPA 1982a):

- Bajo Orden < 8.76 l / s, (0.2 mgd)  
Tanque de mezclado, fibra de vidrio.  
Tanque de atenuación, fibra de vidrio.  
Alimentación y almacenamiento de ácido.  
Agitadores (2).  
Cañería, eléctrica.  
Instrumentación
- Alto Orden, 8.76 a 876 l / s (0.2 a 20 mgd)  
Tanque de mezclado, concreto.  
Tanque de atenuación.  
Alimentación y almacenamiento de ácido.  
Agitadores (2)  
Cañería, eléctrica.  
Instrumentación.

(\*) Notar que la cal o el manejo cáustico y el equipo de alimentación se diseña para servir las necesidades de planta entera y se clasifica y costea separadamente.

### **b.2) Curva de costo de inversión**

- Curva de Bajo Orden - Ver la Figura 2
  1. Costo (millares de dólares) vs. Flujo (litros por segundo o millones de galones por día).

2. Curva base, estimación de costos sobre cuatro sistema con velocidad de flujo de 4.38, 8.76, 17.5, y 26.3 l / s (0.1, 0.2, 0.4, y 0.6 mgd)

- Curva de Alto Orden - Ver Figura 3

1. Costo (ciento de miles de dólares) vs. flujo (litros por segundo o millones de galones por día)

2. Curva base, estimación de costos sobre cuatro sistemas con velocidad de flujo de 8.76, 43.8, 219, y 876 l / s (0.2, 1.0, 5.0, y 20.0 mgd)

- Factor de escala - Si la neutralización no es precedida por la nivelación, un factor de escala de 1.67 es aplica al costo de inversión estándar

### **b.3) Índice de costo**

Periodo base, Julio 1977, St. Louis

Chemical Engineering (CE), Índice de Planta = 204.7

### **c) Costo de operación y mantención**

La Operación de costos incluyen componentes variables y fijos. Los componentes variables de costo de operación son la energía y los costos químicos. Los costos de operación fijos incluyen mano de obra, supervisión, mano de obra de laboratorio, mantenimiento, servicio, seguro e impuestos, y agua de servicio. Todos los costos de operación fijos y variables deberán ser ajustados a los niveles actuales que usan un factor apropiado de costo unitario o índice.

#### **c.1) Costo Variable**

- Requerimientos Energéticos, Bajo Orden (Flujo < 8.76 l / s (0.2 mgd)

1. Bombas, Agitadores (USEPA 1982a). Estas ecuaciones se desarrollaron usando el procedimientos de análisis de regresión.

Sistema Internacional

$$KW = (0.55 \times \text{Flujo}) + 0.657$$

donde: KW = Energía requerida, kilowatts

Flujo = Flujo del Efluente, l / s

Sistema Inglés

$$HP = (32.3 \times \text{Flujo}) + 0.881$$

donde: HP = Energía requerida, Hp.

Flujo = Flujo del Efluente, mgd

- Requerimientos Energéticos, Alto orden (Flujo 8.76 a 876 l / s (0.2 a 20 mgd) (USEPA 1982a). Estas ecuaciones se desarrollaron usando el procedimientos de análisis de regresión.

Sistema Internacional

$$KW = (0.266 \times \text{Flujo}) + 6.49$$

donde: KW= Energía requerida, kilowatts  
Flujo = Flujo del Efluente, l / s

Sistema Inglés

$$HP = (15.6 \times \text{Flujo}) + 8.70$$

donde: HP = Energía requerida, Hp  
Flujo =Flujo del Efluente, mgd

- Costo de Energía

Sistema Internacional

$$PC = KW \times 24 \times EC$$

donde: PC = Costo de Energía, US\$/día  
KW = Energía requerida, kilowatts  
24 = Horas/día  
EC = costo de electricidad, US\$/Kw\*hr

Sistema Inglés

$$PC = HP \times 24 \times 0.746 \times EC$$

donde: PC = Costo de energía, US\$/día  
HP = Energía requerida, Hp  
24 = Horas/día  
0.746 = Kw\*hr/Hp\*hr  
EC = Costo de electricidad, US\$/Kw\*hr

- Requerimientos Químicos

Los requerimientos químicos para la neutralización pueden estimarse tres maneras que dependen de la calidad de datos disponible del efluente de agua de residuo. El método preferido es usar los datos acidez/alcalinidad (Caso I), pero los métodos que usan datos de pH (Caso II) o dosis estándar (Caso III) puede utilizarse.

## CASO I - Datos disponible de acidez y alcalinidad

Si la acidez y la alcalinidad están presente en el efluente, determina la característica dominante.

$$A = AP - (a - 2)$$

donde: A= Acidez o Alcalinidad dominante, mg/l (CaCO<sub>3</sub> de equivalentes)  
AP =Factor de medida del efluente dominante acidez o alcalinidad mg/l  
a = Factor de la concentración del otro efluente, mg/l

Esto modifica la acidez o alcalinidad que debería usarse en cálculos siguientes donde se aplica en el lugar del valor efluente dominante.

### I.1) Ajuste de ácido y cal basados en los requerimientos de acidez

Si los efluentes de agua de residuo de característica dominante es ácido, la cal se agrega para neutralizar el ácido y se va ajustando el ácido para cubrir fluctuaciones menores de acidez.

#### Sistema Internacional

$$CAL = 0.74 \times AC \times FLOW \times 0.086$$

donde: CAL= Cal requerida, kg / día  
0.74 = Relación estequiometrica de Ca (OH)<sub>2</sub> a CaCO<sub>3</sub>  
AC = Efluente ácido modificado, mg / l (CaCO<sub>3</sub> de equivalentes)  
FLOW= Flujo de entrada, mgd  
0.086= Factor de conversión

#### Sistema Inglés

$$CAL = 0.74 \times AC \times FLOW \times 8.34$$

donde: CAL= Cal requerida, lb/día  
FLOW= Flujo entrada, mgd  
8.34 = Factor de conversión

Los requerimiento de ajuste de ácido están basados en la acidez de la corriente de entrada modificada.

#### Sistema Internacional.

$$TA = ADOSE \times FLOW \times 0.086$$

donde: TA= Ajuste de ácido, lb/día  
ADOSE= Dosis ácida, mg/l  
FLOW= Flujo de entrada, mgd.

### I.2) Ajuste de ácido y cal basados en los requerimientos de alcalinidad.

Si el efluente de agua de residuo predomina el álcali, el ácido sulfúrico se agrega para neutralizar el residuo y se va ajustando la cal para cubrir fluctuaciones menores de alcalinidad.

Sistema internacional.

$$ACID = 0.98 \times ALK \times FLOW \times 0.086$$

donde: ACID = Ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) requerido, kg / día  
 0.98 = Relación estequiométrica de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a CaCO<sub>3</sub> equivalentes  
 ALK = Flujo de entrada de álcali modificado, mg /l, (CaCO<sub>3</sub> equivalente)  
 FLOW = Flujo de entrada, l / s  
 0.086 = Factor de conversión.

Inglés

$$ACID = 0.98 \times ALK \times FLOW \times 8.34$$

donde: ACID = Ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) requerimiento, lb/día  
 FLOW = Flujo de entrada, mgd  
 8.34 = Factor de conversión

Los requerimiento de ajuste de cal están basados en la alcalinidad de la corriente de entrada modificada.

Sistema Internacional

$$TL = LDOSE \times FLOW \times 0.086$$

donde: TL = Ajuste de cal, kg / día  
 FLOW= Flujo de entrada, l/s  
 ADOSE = Dosis de cal, mg/l  
 (LDOSE se determina de la tabla siguiente)

ALCALINIDAD (mg/l)	DOSIS DE CAL (LDOSE) (mg/l)
ALK > 150	50
100 < ALK < 150	200 - ALK
ALK < 100	100

Inglés

$$TL = LDOSE \times FLOW \times 8.34$$

donde: TL = Ajuste de cal, lb / día  
 LDOSE =Dosis de cal, mg / l (ver tabla de arriba)  
 FLOW = Flujo de entrada, mgd

## CASO II - Solo datos de pH disponible

Si la información sobre alcalinidad y acidez de entrada para el sistema de neutralización puede ser estimado en base a los siguientes rangos de pH de entrada. Las estimaciones de este método deben ser analizadas especialmente cuando se trata de residuo de agua altamente amortiguada.

II.1) Si  $(\text{low pH}) > 7.0$ , entonces el ácido y el ajuste de cal se requieren:

$\text{ACIDC} = [(\text{low pH}) - 7.0] 2 \times 20$  o  $50 \text{ mg/l}$ ; cualquiera que sea más grande.

$\text{TLC} = 50 \text{ mg/l}$

donde:  $\text{ACIDC} = \text{Ácido (H}_2\text{SO}_4\text{) requerido, mg/l}$   
 $(\text{low pH}) = \text{El mínimo valor de pH del flujo de entrada}$   
 $\text{TLC} = \text{Ajuste de cal, mg / l}$

II.2) Si  $(\text{low pH}) < 7.0$  y  $(\text{avg pH}) > 7.0$ , entonces la cal y el ajuste de ácido son requeridos:

$\text{CALC} = [7.0 - (\text{pH})] 3 \times 20$  o  $50 \text{ mg / l}$ ; cualquiera que sea más grande.

$\text{TAC} = [[(\text{avg pH}) + (\text{high pH}) - 2] - 7] 2 \times 20$  o  $50 \text{ mg/ l}$  cualquiera que sea el mayor.

donde:  $\text{CALC} = \text{Cal requerida, mg / l}$   
 $(\text{avg pH}) = \text{Valor de pH promedio de la corriente de entrada.}$   
 $(\text{high pH}) = \text{Valor de pH más alto de la corriente de entrada.}$   
 $\text{TAC} = \text{superando requerimiento ácido, mg / l}$

II.3) Si  $(\text{low pH}) < 7.0$  y  $(\text{avg pH}) < 7.0$  y  $(\text{high pH}) > 7.0$ , entonces la cal y el ajuste de ácido son requerido:

$\text{CALC} = [7.0 - [((\text{avg pH}) + (\text{low pH})) - 2]] 3 \times 20$  o  $50 \text{ mg/l}$  cualquiera que sea mas grande.

$\text{TAC} = [(\text{high pH}) - 7.0] 2 \times 20$  o  $50 \text{ mg/l}$  cualquiera que sea mayor.

II.4) Si  $(\text{low pH}) < 7.0$  y  $(\text{avg pH}) < 7.0$  y  $(\text{high pH}) < 7.0$ , entonces solamente la cal es requerida:

$\text{CALC} = [7.0 - (\text{avg pH})] 3 \times 100 \text{ mg / l}$  cualquiera que sea mayor

$\text{TAC} = 0$

II.5) Para convertir requerimientos químicos en base peso diario

### Sistema Internacional

$\text{ACID} = \text{ACIDC} \times \text{FLOW} \times 0.086$

$\text{TL} = \text{TLC} \times \text{FLOW} \times 0.086$

$\text{CAL} = \text{CALC} \times \text{FLOW} \times 0.086$

donde: ACID = Ácido requerido, kg / día  
TL = Ajuste de cal, kg / día  
CAL = Cal requerida, kg / día  
TA = Ajuste de ácido, kg / día  
FLOW = Flujo de entrada, l / s  
0.086 = Factor de conversión.

#### Inglés

$$ACID = ACIDC \times FLOW \times 8.34$$

$$TL = TLC \times FLOW \times 8.34$$

$$CAL = CALC \times FLOW \times 8.34$$

$$TA = TAC \times FLOW \times 8.34$$

donde: ACID = Ácido requerido, lb / día  
TL = Ajuste de cal, lb / día  
CAL = Cal requerida, lb / día  
TA = Ajuste de ácido, lb / día  
FLOW = Flujo de entrada, mgd  
8.34 = Factor de conversión.

### **CASO III - No Hay Datos Disponibles**

Para una corriente donde no hay datos de pH, acidez, alcalinidad disponible, una dosis estándar de 100 mg / l de ácido y 100 mg / l de cal puede ser supuesto. Estas adiciones se consideran convenientes para neutralizar pH balanceado (USEPA 1982a). Para corrientes de pH neutro, una dosis estándar mínima de 50 mg/l de ácido y 50 mg/l de cal puede usarse.

#### Sistema Internacional

$$CAL = SDL \times FLOW \times 0.086$$

donde: CAL = Cal requerida, kg / día  
SDL = Dosis de cal estándar, mg / l  
(100 mg / l o 50 mg / l mínimo)  
FLOW = Flujo de entrada, l / s  
0.086 = Factor de conversión.  
ACID = SDA x FLOW x 0.086

donde: ACID = El ácido requerido, kg / día  
SDA = Dosis estándar de ácido, mg / l  
(100 mg / l o 50 mg / l mínimo)

#### Inglés

$$CAL = SDL \times FLOW \times 8.34$$

donde: CAL = Cal requerida, lb/día  
FLOW = Flujo de entrada, mgd

$$8.34 = \text{Factor de conversión.}$$
$$\text{ACID} = \text{SDA} \times \text{FLOW} \times 8.34$$

- Costos Químicos (excepto cal \*)

$$\text{AC} = \text{ACID} \times \text{N}$$

donde: AC = Costo del ácido, US\$ / día  
ACID = Requerimiento ácido, lb / día  
N = Costo unitario del ácido sulfúrico, US\$ / lb

\* El costo por la cal se basa en las necesidades totales más que en las necesidades individuales, en cada unidad de proceso los requerimientos deben ser contabilizados excepto por los costo de sistema de manejo y la cal debe ser estimada en forma separada después del diseño de todas las unidades de procesos que requiere la cal.

## c.2) Costos Fijos

Los componentes fijo O & M de esta tecnología se enumeran en la Tabla 6-20 incluyendo la base de costo y los costos unitarios del Modelo (USEPA 1982a).

## d) Costos diversos

Los costos para ingeniería y artículos comunes de la planta tal como tierra, cañerías, y los edificios, se calculan después de la terminación de costos para unidades individuales.

## e) Modificación

El efluente puede ajustarse variaciones de sólidos disuelto totales (TDS) y TSS que resulta desde el proceso de neutralización. TDS es predecible o esperado que cambie, como resultado de la adición de ácido y cal. Si los sulfato y el calcio están presente en las aguas de residuo cantidades adicionales deben ser agregados durante la neutralización, adicionalmente TSS puede formarse a medida que la solución alcanza el límite de solubilidad para calcio y sulfato. La formación de TSS desde el agua de residuo es de interés para las consideraciones de costo, que podría afectar el volumen de fango que eventualmente afectaría a la etapas siguiente.

### e.1) El incremento del TDS debido a la Neutralización

#### Sistema Internacional

$$\text{TDSE} = \text{TDSI} + [(\text{CAL} \times (40 - 74) + \text{ACID} \times (96 - 98))] - (\text{FLOW} \times 0.086)$$

donde: TDSE = Flujo promedio de salida TDS, mg / l

TDSI = Flujo de entrada promedio TDS, mg / l  
CAL = Cal agregada, kg / día  
40 - 74 = Relación masiva de Ca a Ca (OH) <sub>2</sub>

ACID = Ácido agregado, kg / día  
96 - 98 = Relación masiva de SO<sub>4</sub> a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
FLOW = Flujo de entrada, l / s  
0.086 = Factor de conversión

Inglés

$$TDSE = TDSI + [(CAL \times (40 - 74) + x \text{ ACID } (96 - 98)] - (FLOW \times 8.34)]$$

donde: CAL = Cal agregada, lb / día  
ACID = Ácido agregado, lb / día  
FLOW = Flujo de entrada, mgd  
8.34 = Factor de conversión

## CAPITULO V

### EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

#### 5.1 Descripción

La extracción por solventes, también conocida como extracción líquido-líquido, es la separación de los constituyentes de una solución líquida, por el contacto con otro líquido inmiscible con el cual las impurezas tienen una alta afinidad. La separación se puede basar tanto en diferencias físicas que afecten la solubilidad diferencial entre los solventes, o en reacción química definida.

El proceso de extracción por solvente se muestra en forma esquemática en la figura 4. El diagrama muestra una unidad de extracción por solvente simple operando en una corriente acuosa; en la práctica, esta unidad puede consistir de:

1. Una única etapa de mezclado y luego una de separación,
2. Varios mezcladores-separadores en serie
3. Un aparato extractor (por ejemplo: una columna o una centrifuga diferencial)

Tal como indica el diagrama de flujo, el re-uso del solvente extractor a continuación de la remoción de sólido y la recuperación de la porción del solvente extractante que se disuelve en la fase extraída, son aspectos necesarios del proceso de extracción por solvente. El re-uso del solvente es necesario por razones económicas, puesto que el costo del solvente es generalmente muy alto como para considerar su eliminación después de usado. Solo en contados casos se puede eliminar el re-uso del solvente. Estos casos se elevan donde una corriente de alimentación de una industria química puede ser usada como solvente y entonces enviada para el procesamiento normal, o cuando el agua es el solvente. La recuperación de solvente desde un extractor de agua puede ser eliminada en casos donde la concentración en el agua a ser descargada no es dañina, y donde la pérdida de solvente no representa un alto costo.

El resultado final de la extracción por solvente es separar la solución original en dos corrientes una corriente tratada (el refinado), y una corriente de soluto recuperado (la cual puede contener pequeñas cantidades de agua y solvente). La extracción por solvente puede también ser considerada para un proceso de recuperación, puesto que los solventes químicos son generalmente recuperados para re-uso, reventa, o posterior tratamiento y eliminación. Un proceso para extraer un soluto de una solución incluirá típicamente tres pasos básicos.

1. La extracción en si
2. La recuperación del solvente desde el refinado (corriente tratada), y
3. La remoción del soluto desde el solvente extractor.

El proceso puede ser operado en forma continua.

El primer paso, extracción, pone dos fases líquidas (alimentación y solvente) en un íntimo contacto para permitir la transferencia del soluto de la alimentación al solvente. Este proceso puede ser operado en forma continua. Una unidad de extracción puede ser un aparato mezclador-separador en el cual alimentación y solvente son mezclados por agitación, permitiéndole asentarse y separarse en dos corrientes líquidas, o puede ser una columna en la cual los dos líquidos son puestos en contacto por un flujo contracorriente causado por la diferencia de densidad. El proceso produce dos corrientes, la corriente limpia o refinada, y el extracto o corriente cargada de soluto. Ambas corrientes van a contener solvente extractor y pueden requerir un procesamiento posterior para remover y/o recuperar el solvente y el soluto. La corriente tratada o refinada, puede requerir un proceso de remoción de solvente, si la pérdida de este incrementa significativamente los costos del proceso, o causa algún problema en la descarga del refinado. La extracción del solvente puede ser acompañada por stripping, destilación o adsorción. El extracto o corriente cargada de soluto puede ser procesado para recuperar el solvente y remover el soluto. La remoción del soluto y recuperación del solvente puede ser vía una segunda etapa de extracción, destilación o cualquier otro proceso. Por ejemplo, una segunda extracción con soda cáustica, es usada a veces para extraer el fenol desde aceites livianos, el cual es usado como el solvente primario en la defenolización de las aguas de desecho de una planta de coke (USEPA 1982a). La destilación será usualmente más común, excepto donde se presenten problemas de azeótropos. En ciertos casos puede ser posible el usar el solvente cargado con soluto como la corriente de alimentación a un proceso industrial. Eliminando así la recuperación del soluto. Este es aparentemente el caso en algunas refinerías del petróleo donde crudo o aceites livianos pueden usarse como solvente (para remoción de fenol desde el agua) y luego procesar con el soluto en el. Esta aplicación es particularmente atractiva puesto que elimina un paso costoso.

La extracción por solvente debería observarse como un proceso para tratar concentrado, seleccionar, y segregar corriente de aguas de desecho donde la recuperación de material es posible para contrarrestar los costos del proceso. La extracción por solvente, cuando efectuada sobre los más concentrados flujos de desecho, producirá raramente un efluente tratado (el refinado) que pueda despedirse directamente para aguas superficiales; comúnmente se necesitará alguna forma de pulido final. La extracción por solvente no puede competir económicamente con la oxidación biológica o con la adsorción en el tratamiento de cantidades grandes de desechos muy diluidos, y tendrá problemas compitiendo con el stripping con vapor en la recuperación de solutos volátiles presentes en moderadas a bajas concentraciones.

## **5.2. Condición de la tecnología**

La extracción por solvente es un método probado para la recuperación de orgánicos desde soluciones líquidas y puede ser el proceso de la elección en algunos casos.

## **5.3. Modificaciones y tipos representativos**

Hay dos categorías importantes de equipo para la extracción líquida: etapa simple y multi-etapa. En el equipo de etapa simple, los fluidos se mezclan, la extracción ocurre, y los

líquidos insolubles se radican y separan. Una cascada de tales etapas puede entonces ser arreglada. Una unidad de etapa simple debe proveer facilidades para mezclar los líquidos insolubles y para radicar y decantar la emulsión o dispersión resultante. En la operación batch, mezclando junto con radicar y decantar puede tener lugar en las mismas o en acumuladores separados. En la operación continua, se requieren acumuladores diferentes. En equipo de multi - etapa, el equivalente de muchas etapas puede incorporarse en un aparato o dispositivo único. el flujo contracorriente es producido en virtud de la diferencia en densidades de los líquidos, y con pocas excepciones, el equipo toma la forma de una torre vertical que puede o no contener dispositivos internos para influir en el modelo de flujo. Las otras formas incluyen centrifuga, discos rotatorios, y baldes rotatorios. Dependiendo de la naturaleza de la estructura interna, el equipo puede ser del tipo stagewise o contacto - continuo.

Los solventes usualmente usados incluyen petróleo crudo, petróleo liviano, bencina, y tolueno. Solventes menos comunes pero más selectivos incluyen al cloroformo, etilacetato, isopropil éter, tricresil fosfato, isobutilcetona, cloruro de metileno, y butil acetato. Cuando se usa el petróleo crudo o el petróleo liviano, el fenol es destruido en operaciones aguas abajo. Alternativamente, la extracción con el petróleo liviano puede ser seguida por recuperación de fenol por medio de la extracción del petróleo con soda cáustica. En este caso, el fenol se recupera como fenolato de sodio

#### **5.4. Aplicaciones**

La extracción por solvente se aplica actualmente en dos áreas principales: (1) la recuperación de fenol desde desechos acuosos, y (2) la recuperación de solventes de hidrocarburos halogenados desde soluciones orgánicas que contienen otros componentes solubles en agua. La extracción por solvente actualmente esta siendo usada en las siguientes industrias, la principal aplicación es la extracción de materiales fenólicos desde aguas de desecho.

- Manufactura de acero o hierro.
- Manufactura de Químicos Orgánicos, y
- Refinando de Petróleo

La subcategoría fabricación de coke de la industria de Acero e Hierro utiliza extracción por solvente para defenolizar una corriente de desecho. En el proceso, el aceite liviano de benceno, u otro solvente conveniente, extrae el compuesto fenólico desde el agua de desecho. El solvente fenolizado es entonces separado y extraído con soda cáustica. El fenolato de sodio es separado afuera, y el solvente desfenolizado es reutilizado en el sistema de recuperación (USEPA 1982a).

Otras aplicaciones de extracción por solvente son descritas brevemente a continuación (USEPA 1982a).

- Extracción de químicos basados en thiazol desde efluente del procesamiento de la goma con benceno.

- Extracción de ácido salicílico y otros ácidos hidroxí-aromáticos desde aguas de desecho usando metal isobutil cetona como solvente.
- El des-aceitamiento de aguas de extinción desde las operaciones de petróleo por medio de la extracción solvente han sido desarrolladas por la Corporación de Petróleo del Golfo. El agua para extinción contiene sobre 6,000 mg / l de petróleo emulsionado y disuelto se extrae con un solvente liviano de aceite aromático, y el extracto se recicla para el procesamiento en la refinería. El tratamiento adicional de el agua es necesario para re-uso de esta. No se sabe si este proceso está en uso actualmente.
- La recuperación de ácido acético desde aguas de desecho industriales se propone para manejar aquellos que puedan contener niveles de ácido acético de 0.5% a sobre el 5. El extractante es una solución de óxido trioctylphosphine en un solvente transportador. Este proceso esta actualmente en la etapa de desarrollo, pero se ha demostrado que es práctico.
- Recuperación de solvente por medio de la extracción por solvente se efectúa en por lo menos una instalación de manejo de desechos peligrosos en Lowell, Massachusetts.

### **5.5. Ventajas y limitaciones**

La principal ventaja de la extracción por solvente es su uso como un recicló técnico. Los solventes valiosos pueden recuperarse para ser reutilizados en corriente de proceso de una industria. Hay relativamente pocos problemas técnicos insuperables con la extracción solvente. El problema más difícil es comúnmente el hallazgo de un solvente que mejor reúna una lista larga de cualidades deseadas incluyendo el bajo costo, eficiencia de extracción alta, baja solubilidad en el refinado, fácil separación desde el soluto, diferencia de densidad adecuada con el refinado, sin tendencia para la formación de emulsiones, no-reactivo, y no-peligroso. Ningún solvente reunirá todos los criterios deseados y, así, es necesario un compromiso. Hay una amplia gama de equipos de extracción disponibles hoy, y los requerimientos de espacio no son un problema.

El costo de proceso es siempre un factor determinante en extracción por solvente, y ha así limitado lejos la aplicación real a situaciones donde un producto valioso se recupera en la cantidad suficiente para contrarrestar los costos de extracción. Estos costos serán relativamente pequeños cuando puede usarse una unidad de extracción de etapa simple (p. ej., mezclador simple - separador) y donde la recuperación de solvente y soluto puede efectuarse eficientemente. En ciertos casos, el proceso puede rendir una ganancia cuando se toma el crédito por el material recuperado. Cualquier extracción requiriendo más que el equivalente a diez etapas teóricas puede requerir diseño específico equipo y será bastante caro.

Aun cuando las operaciones de recuperación de solventes son utilizadas, el agua de desecho que permanece después de que el resto de los solventes se ha separado contendrá todavía pequeñas cantidades de estos materiales. Una único tecnología de tratamiento ha demostrada ser efectivo en la remoción completa de solventes: el stripping con vapor. Además, los sistemas de extracción por solventes raramente producen un refinado que sea conveniente para la descarga directa a las aguas superficiales y así, un se requiere generalmente tratamiento pulidor (p. ej., tratamiento biológico).

## **5.6. Confiabilidad**

La extracción por solvente es altamente confiable para aplicaciones probadas, si son adecuadamente operadas.

## **5.7. Los químicos requeridos**

Los solventes químicos que se usan incluyen el benceno (benzol), tolueno, cloroformo, etilacetato, isopropil éter, tricresil fosfato, metal isobutil cetona, cloruro de metileno, y butil acetato.

## **5.8. Los residuos generados**

La extracción solvente no genera desechos sólidos. Cuando mezclas de líquidos orgánicos se tratan principalmente para la recuperación de simplemente un componente, (p. ej., el más valuable hidrocarburo halogenado), los costos pueden hacer la purificación de los otros componentes (requeridos para la reventa o re-uso) poco práctica, resultando en un desecho para la eliminación.

## **5.9. Criterios de diseño**

El diseño es específico al soluto a ser recuperado y las características de la corriente de desecho. Los parámetros importantes de diseño son:

1. Elección del solvente,
2. Coeficiente de distribución, y
3. Valor del flujo de agua de desecho.

## **5.10. Desempeño**

La extracción por solventes reduce la concentración de fenol desde niveles de varios por cientos a niveles de pocas partes por millón. La eficiencia de remoción de 90 a 98% es posible en la mayoría de las aplicaciones, y con equipos especiales ha sido posible alcanzar eficiencias de alrededor del 99%, la tabla que se incluye en el anexo entrega información del desempeño en las siguientes industrias:

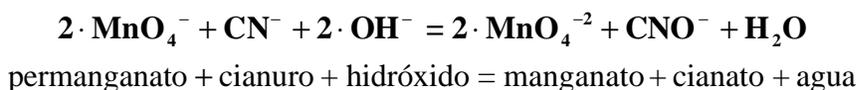
- Refinería de Petróleo, y
- Manufactura de Químicos Orgánicos.

## CAPITULO VI

### SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN QUÍMICA

#### 6.1 Descripción

Oxidación es el proceso de reacción química en el cual uno o más electrones son transferidos desde el compuesto que está siendo oxidado hasta el compuesto que produce la transferencia, conocido como agente oxidante. En una típica reacción química, como puede ser la que se muestra a continuación,



tenemos que el estado de oxidación del ion cianuro aumenta de -1 a +1 al combinarse con un átomo de oxígeno para formar cianato. Por otro lado el estado de oxidación del permanganato disminuye de -1 a -2, o sea, el permanganato se reduce a manganato. Este cambio en el estado de oxidación implica que un electrón fue traspasado del ion cianuro al ion permanganato.

El aumento en la valencia positiva o disminución en la valencia negativa con la oxidación ocurre simultáneamente con la reducción en los radios químicos equivalentes. Algunas reacciones de oxidación proceden incluso hasta la generación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En otros casos, la oxidación no se lleva tan lejos debido a factores como la dosis de oxidante, el pH del medio de reacción, el potencial oxidativo del oxidante o la formación de productos intermedios estables.

La principal función llevada a cabo por la oxidación en el tratamiento de residuos peligrosos es la detoxificación o reducción de las características tóxicas de los compuestos presentes en el residuo. Por ejemplo, oxidantes son usados para convertir cianuro a, un menos tóxico, cianato o directamente a dióxido de carbono y nitrógeno. Una segunda función es la de asegurar la completa precipitación, como en el caso de la oxidación de Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> y en reacciones similares, donde el material oxidado tiene una menor solubilidad que bajo condiciones de precipitación por reacción.

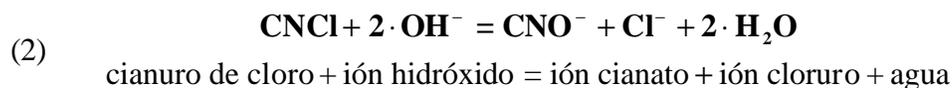
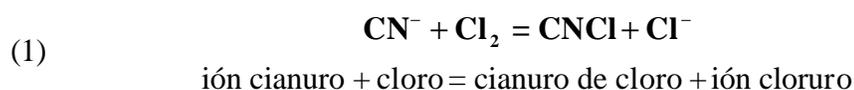
#### 6.2. Tipos de oxidación representativos y sus modificaciones

Existen muchos agentes oxidantes, pero su aplicación en el tratamiento de aguas residuales requiere una determinación específica de su efectividad de remoción de los contaminantes o sustancias tóxicas involucradas, como también una determinación de la inocuidad de los productos o subproductos de reacción. Los agentes más utilizados en el tratamiento de las aguas y sus respectivos procesos de oxidación son descritos a continuación.

## a) Oxidación por Cloro

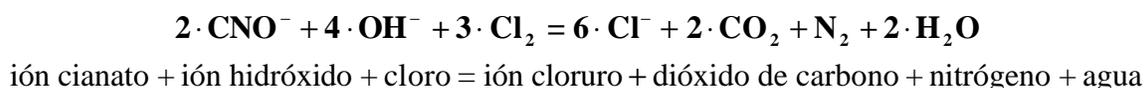
El cloro elemental o en su forma de hipoclorito es un agente oxidante poderoso en solución acuosa siendo usado en los sistemas industriales de tratamiento de agua principalmente para oxidar el **cianuro**. El cloro y los hipocloritos también pueden ser usados para oxidar compuestos químicos basados o que contengan **fenol**, pero en este caso, su uso es limitado debido a la formación de clorofenoles si el proceso de oxidación no es controlado correctamente, debido a que estos compuestos clorados son muy tóxicos.

El proceso alcalino de cloración de cianuro usa cloro y compuestos básicos (soda cáustica) para oxidar el cianuro a cianato y posteriormente a dióxido de carbono y nitrógeno. La reacción de oxidación entre el cloro y el cianuro se cree que ocurre en dos etapas como se muestra a continuación:

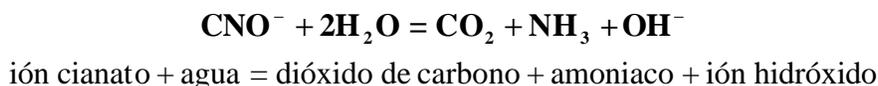


La formación de cianuro de cloro (CNCl) es esencialmente instantánea. La segunda reacción, la formación de cianato, es llevada a cabo de manera más rápida y más eficiente a un pH de 10 o mayor. Un tiempo de detención de 30 minutos a 2 horas es comúnmente utilizado (USEPA 1982a).

Los cianatos pueden ser descompuestos en mayor grado produciendo nitrógeno y dióxido de carbono por exceso de cloro:



Un acercamiento alternativo que debe ser evitado es una hidrólisis ácida:



La descomposición por exceso de cloro se lleva a cabo en aproximadamente una hora si el pH se ajusta en 8.0-8.5. La hidrólisis ácida comúnmente se lleva a cabo a un pH de 2-3. Debido a que se debe tener cuidado para poder evitar la liberación del cianuro de cloro en estado gaseoso, el cual es muy tóxico, la hidrólisis ácida comúnmente no es elegida como opción a usar (USEPA 1982a).

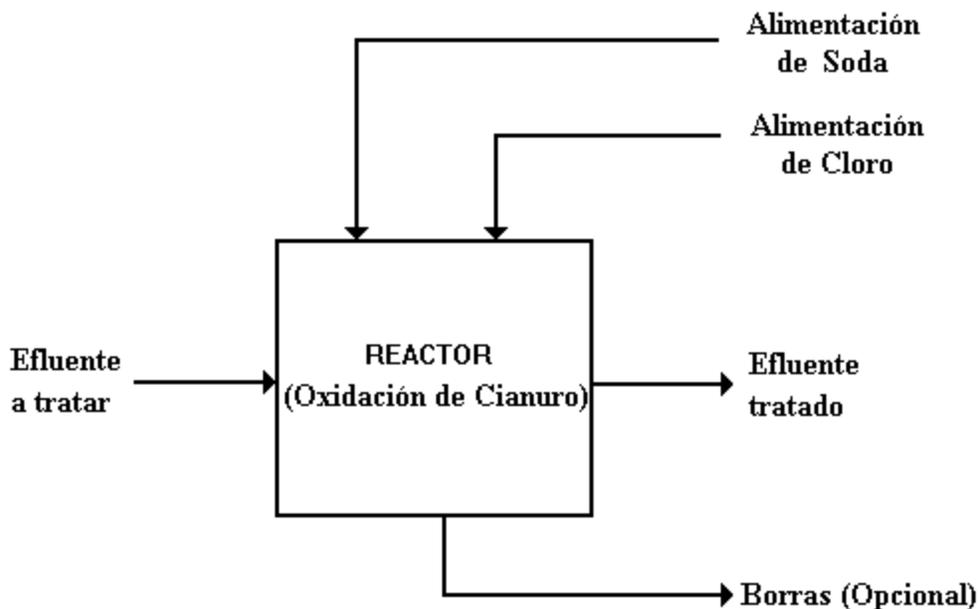
El equipo usado en la oxidación química consiste generalmente en un estanque de equalización o neutralización seguido de dos estanques de reacción, aunque la reacción se puede llevar a cabo en un solo estanque. Cada estanque tiene un controlador registrador

para mantener las condiciones necesarias en lo que respecta al pH y al potencial de óxido-reducción (ORP).

En el primer estanque, las condiciones se ajustan para oxidar cianuros a cianatos. Para manejar la reacción, se mide la cantidad de cloro en el estanque de reacción para mantener el ORP en el rango de 350 a 400 milivolts y se agrega soda cáustica al 50 % en solución para mantener el pH en el rango de 9.5 a 10. En el segundo estanque de reacción, las condiciones son aquellas que oxidan los cianatos en dióxido de carbono y nitrógeno. El ORP y el pH deseados para esta reacción son 600 milivolts y 8 respectivamente. Cada uno de los estanques de reacción está equipado con un agitador de hélice diseñado para proveer aproximadamente dos revoluciones por minuto. El tratamiento por un proceso batch se logra usando dos estanques, uno para recolectar agua por un determinado periodo de tiempo, y uno para el tratamiento del agua ya acumulada. Si los efluentes de desechos concentrados son frecuentes, se puede utilizar otro estanque para equalizar o neutralizar el flujo que va hacia el estanque de tratamiento. Así, cuando el estanque de almacenamiento está lleno, el líquido es traspasado al estanque de reacción para su tratamiento. Posteriormente, el sobrenadante se descarga y los lodos o residuos obtenidos se recolectan para su remoción y para luego disponer de ellos.

Una técnica alternativa de cloración involucra el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl) como agente oxidante. Reacciones con hipoclorito de sodio son similares a aquellas que utilizan cloro, a excepción de que no hay necesidades de soda cáustica para destruir el cianuro libre en las etapas de oxidación. A pesar de esto, se requiere álcalis para precipitar complejos de cianuro y metales como hidróxidos.

Un sistema de oxidación típico que usa cloro y soda se esquematiza a continuación:

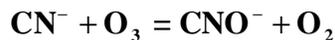


**Figura 6.1. Diagrama de flujo del proceso - oxidación química**

## b) Oxidación por ozono

El ozono ( $O_3$ ), una molécula inestable, es altamente reactiva como agente oxidante y además es aproximadamente diez veces más soluble que el oxígeno, en porcentaje en peso. El ozono es usado en el tratamiento industrial de residuos para oxidar cianuro a cianato y oxidar fenoles y compuestos coloreados a una variedad de compuestos no tóxicos y no coloreados. La ozonización es de mayor utilidad cuando las aguas residuales a tratar contienen pequeñas cantidades de material oxidable. No hay restricciones inherentes en los niveles de sólidos disueltos o suspendidos en el efluente en cuestión, debido a que estos no contienen material oxidable que pueda competir con el polutante a ser removido en su requerimiento de ozono.

La oxidación de cianuro se puede ilustrar en la siguiente ecuación iónica:



ión cianuro + ozono = ión cianato + oxígeno

La reacción indicada en la ecuación anterior representa la oxidación de cianuros en cianatos. Si continua la exposición con ozono, se convertirá el cianato en dióxido de carbono, aunque esto generalmente no es económicamente práctico. Es debido a esto que la posterior degradación del residuo con cianato dependerá de procesos como hidrólisis y bio-oxidación.

Como ya se mencionó, el ozono es también efectivo en el tratamiento de fenoles. Es aproximadamente dos veces más poderoso que los demás agentes oxidantes, al igual que el peróxido de hidrógeno, pero sin ser tan selectivo, por lo que oxida un amplio rango de materiales. Para residuos fenólicos de bajas concentraciones, las prácticas usuales consisten en oxidar el compuesto fenólico a un compuesto orgánico intermedio que sigue siendo tóxico pero es más fácil de biodegradar. Para residuos con concentraciones altas o medias, la oxidación por ozono puede no ser tan económica comparándola con la oxidación biológica, aunque es de utilidad si se instala como apoyo posterior a un sistema biológico.

El ozono es más soluble y más estable en soluciones ácidas que en soluciones básicas. A pesar de esto, la velocidad de la reacción de ozonización es relativamente insensible al pH. De esta manera, es poco frecuente encontrar un previo ajuste de pH en el proceso de ozonización, debido a que el costo del proceso de neutralización frecuentemente compensa cualquier aumento en la eficiencia de la ozonización. Una excepción a esta generalización es la ozonización del cianuro. En esta, el cianato formado hidroliza inicialmente más rápidamente en medio alcalino. Si se requiere una conversión completa del cianuro a dióxido de carbono, corrientes de tipo ácida deben ser ajustadas a un pH de aproximadamente 9 antes de la ozonización.

Debido a que el ozono es inestable, este debe ser generado en el sitio en que será utilizado. Los generadores de ozono utilizan una descarga de corona que ocurre cuando la

corriente alterna de alto voltaje se impone a través de un espacio (gap) de descarga. El ozono es generado tanto de oxígeno o de una corriente de aire. De dos a dos y media veces mayor será la cantidad de ozono producido a partir de una corriente de oxígeno puro en comparación con una corriente de aire. El aire ozonizado por el generador se introduce en una cámara de contacto diseñada para asegurar un buen mezclado del ozono con las corrientes de residuos.

Los dos sistemas de mezcla ozono/efluente de uso masivo son el mezclador Venturi y los difusores de poros. Con el mezclador Venturi, el gas ozonificado y los residuos fluyen en co-corriente, y el flujo de gas ozonificado esta limitado a un 30%-60% del flujo volumétrico de líquido. En un sistema de difusores de poros, se acostumbra usar un flujo en contra-corriente, siendo el flujo de gas hasta 20 veces mayor que el flujo de líquido. En algunos sistemas se utiliza una columna de contacto de lecho empaquetado. Esto aumenta el área superficial y acelera la velocidad de transferencia de masa del ozono a la solución. Un manufacturero de este tipo de equipamiento ha estado utilizando ultrasonido en conjunto con ozonización, con lo cual se aumenta de igual o mayor manera el área disponible para la transferencia de masa. Dependiendo de el rango de tratamiento que uno requiera, puede llegar a ser necesario el incorporar dos o más etapas de contacto, que pueden ser de distintas características. Si oxígeno es utilizado como alimentación de gas en vez de aire, el método de ozonización en circuito cerrado es la mejor alternativa. En este sistema el gas que sale del equipo de contacto se recicla de vuelta al generador siendo enriquecido en ozono.

Los sistemas de ozono modernos son completamente automatizados. Un monitor de ozono provee un monitoreo continuo en línea de la concentración de ozono en el efluente gaseoso del equipo de contacto. Si la concentración de ozono excede un nivel determinado (generalmente 0.05 ppm), el voltaje o la frecuencia del generador de ozono se reduce.

### **c) Oxidación por ozono con radiación ultravioleta (UV)**

Una de las modificaciones hechas al proceso de ozonización es la aplicación simultánea de luz ultravioleta y ozono en la oxidación de cianuros, compuestos fenólicos y compuestos organoclorados. Algunos compuestos que son altamente resistentes al ozono por si solo, pueden ser ozonizados en presencia de luz UV. La radiación UV cataliza el proceso de ozonización siendo el modo de acción la activación del propio ozono. Además, la aplicación de luz UV reduce la cantidad de ozono que se requiere en comparación con los sistemas que utilizan ozono solo.

### **d) Oxidación por peróxido de hidrógeno**

El peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), conocido como agua oxigenada, es un agente oxidante poderoso que ha sido utilizado con bastante frecuencia en la oxidación de fenoles, cianuros, compuestos sulfurados, y iones metálicos. El peróxido de hidrógeno en presencia de un catalizador metálico (por ejemplo:  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{2+}$ ) oxida efectivamente los fenoles en un amplio rango de temperaturas y concentraciones. El proceso es sensitivo al pH, con un pH óptimo de 3-4 y un eficiencia que decrece rápidamente para valores tanto menores como mayores (USEPA 1982a).

La oxidación de cianuro, con  $\text{H}_2\text{O}_2$  se puede llevar a cabo por medio de dos procesos. El primero de ellos involucra la reacción del peróxido de hidrógeno con cianuro a un pH alcalino y en la presencia de un catalizador de cobre.

El segundo proceso, conocido como proceso Kastone, utiliza una formulación que contiene un 41% de peróxido, con trazas de catalizador y estabilizadores, en conjunto con formaldehído. Los residuos con cianuro son calentados hasta aproximadamente  $120\text{ }^\circ\text{C}$  ( $248\text{ }^\circ\text{F}$ ), tratados con solución oxidante y con formaldehído, y luego son agitados por una hora. Los productos principales de esta reacción son los cianatos, amoníaco, y ácido amido glicólico. La completa destrucción de los cianatos requiere de una hidrólisis ácida siguiendo a la reacción principal.

El peróxido de hidrógeno ha sido utilizado para la separación de iones metálicos por oxidación selectiva. De esta manera, ayuda a remover hierro o fierro de corrientes combinadas oxidando el ion ferroso a ion férrico, el cual luego se puede precipitar agregando la base apropiada. En soluciones diluidas ( $<30\%$ ), la descomposición del peróxido es acelerada por la presencia de iones metálicos contaminantes. Para concentraciones más elevada de peróxido de hidrógeno, estos contaminantes pueden catalizar una descomposición violenta. Es debido a esto que el peróxido debe ser añadido de manera lenta y cautelosa a la solución manteniendo un buen mezclado. Sulfuros, sulfitos, y el dióxido de azufre también pueden ser fácilmente oxidados con  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Cabe mencionar que bajo condiciones de alcalinidad, los sulfatos son generalmente producidos.

#### **e) Oxidación por permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ )**

El permanganato de potasio ha sido utilizado para la destrucción de residuos orgánicos en aguas residuales y en agua potable. Este compuesto reacciona con aldehídos, mercaptanos, fenoles y ácidos insaturados. Se le considera como un agente oxidante relativamente poderoso. La forma reducida del permanganato es dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), el cual puede ser removido por filtración.

El permanganato de potasio es principalmente usado en la destrucción de compuestos fenólicos presentes en las aguas residuales de la industria. Reacciona separando la estructura de anillo aromático del fenol produciendo una molécula alifática de cadena larga. La molécula alifática es posteriormente oxidada a dióxido de carbono y agua. La reacción inicial se lleva a cabo inmediatamente, y casi el 90% del fenol es oxidado en los primeros diez minutos. Un tiempo de reacción de 1-3 horas es suficiente para asegurar la completa oxidación del fenol (USEPA 1982a). El proceso es afectado por el pH, de manera de que a mayor pH (hasta 9.5) más rápida es la reacción.

### **6.4. Aplicaciones**

La tecnología para la aplicación de la oxidación química a gran escala está bien desarrollada. Residuos industriales como cianuros y otras especies peligrosas o tóxicas presentes en corrientes de desechos diluidas, por ejemplo fenoles y compuestos sulfurados, son por lo general tratados por oxidación química. La oxidación de residuos con cianuro

usando cloro es un proceso clásico que se puede encontrar en la mayoría de las plantas que usan cianuros en operaciones de electroplateado.

La oxidación química puede ser usada tanto para el tratamiento de residuos con compuestos orgánicos como inorgánicos. Las principales aplicaciones del proceso en general se describen a continuación:

#### **a) Oxidación de un efluente con cianuro**

Numerosas plantas de platinado y de terminación de metales usan métodos de oxidación química para tratar sus residuos con cianuro. Cianuros y metales generalmente están juntos en los desechos de las industrias de platinado y recubrimiento con metales. Su concentración y su valor agregado influyen en la selección del proceso de tratamiento. Si el cianuro y los metales pesados no son económicamente recuperables por un método como el intercambio iónico, el radical cianuro se convierte ya sea en el menos tóxico cianato o en dióxido de carbono y nitrógeno por oxidación, mientras que los metales pesados son precipitados y removidos como borras o lodos. En el tratamiento de residuos con cianuro por oxidación, se puede usar hipoclorito o soda más cloro (cloración alcalina) o también se puede usar ozono, o la variante de usar ozono con radiación UV. El tratamiento de cianuros por oxidación química es hoy en día una práctica regular en las siguientes industrias de gran difusión a nivel mundial:

- Manufactureras de Compuestos Químicos Inorgánicos.
- Industrias de Terminación con Metales.
- Industrias Textiles.

También es utilizada, pero en menor escala, en las siguientes industrias:

- Industrias del Acero y el Hierro.
- Recubrimientos de espirales metálicos
- Equipamiento y Suministros Fotográficos.
- Industrias de Metales No-Ferrosos.
- Industrias Míneras de Extracción y Refinamiento.
- Industrias de Refinamiento de Petróleo.

#### **b) Oxidación de un efluente con fenol**

La oxidación química de fenoles ha encontrado su aplicación hasta hoy en día solo en corrientes de desechos diluidas. El permanganato de potasio, uno de los oxidantes usados, se reduce a dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ) el cual es un sólido filtrable. El cloro gaseoso no es usado con frecuencia debido al alto potencial de formación de los clorofenoles. Un proceso de ozonización para la oxidación de fenoles es llevado a cabo en las industrias de producción y elaboración de Acero y Hierro.

### **c) Oxidación de otros compuestos orgánicos**

Agentes químicos oxidantes han sido utilizados para el control de desechos orgánicos en aguas residuales y en el tratamiento de agua potable. Dentro de los compuestos orgánicos para los cuales se conoce tratamiento oxidativo, tenemos a los aldehídos, mercaptanos, bencidina y ácidos insaturados. Para estas aplicaciones, el hipoclorito de sodio y de calcio, el permanganato de potasio y el peróxido de hidrógeno son reconocidos como agentes oxidantes. Se ha usado en alguna ocasión ácido nitroso.

En adición a las aplicaciones masivas ya descritas, la oxidación química usando cloro e hipoclorito de sodio ha sido usado para prevenir la acumulación de sulfuros solubles en líneas de alcantarillado. La oxidación de pesticidas ha sido también una rama de mucha investigación buscando lograr la remoción de residuos de “Diquat” y “Paraquat” del agua.

#### **4.5. Ventajas y limitaciones**

Algunas ventajas de la oxidación con cloro son la operación a temperatura ambiente, la posibilidad de controlar automáticamente y los bajos costos involucrados. Las limitaciones que tiene este tipo de proceso incluyen la necesidad de un control riguroso de pH, la posibilidad de interferencia química en el tratamiento de residuos mezclados y el potencial peligro involucrado en el almacenamiento y manejo de cloro gaseoso. A esto se le suma el hecho que al oxidar fenoles, el uso de cloro puede ocasionar la formación de los peligrosos y aún más tóxicos clorofenoles, si el agua residual a tratar es de bajo contenido en cloro.

Algunas ventajas de la oxidación de ozono son, el hecho de que sea aplicable de muy buena manera el control automático, la eliminación de los problemas de almacenaje y tratamiento debido a la producción del ozono en la localidad de utilización, la no producción de compuestos orgánicos clorados, y el que se evita agregar sólidos disueltos en la etapa de tratamiento. Algunas limitaciones o desventajas que podemos mencionar son los altos costos de capital involucrados en el proceso, la posibilidad de interferencia química en el tratamiento de mezclas de residuos, y un requerimiento elevado de energía (25 kWh/kg de ozono generado).

#### **6.6. Características operacionales**

El proceso de oxidación es altamente confiable si se lleva a cabo con el monitoreo y el control apropiado. Además se debe hacer un pre-tratamiento para controlar sustancias que podrían interferir.

## **6.7. Químicos requeridos**

Por otro lado, se puede hacer un listado resumen de los agentes oxidantes que son más utilizados:

- Cloro ( $\text{Cl}_2$ ).
- Hipoclorito de Sodio ( $\text{NaOCl}$ ).
- Hipoclorito de Calcio ( $\text{Ca}[\text{OCl}]_2$ ).
- Permanganato de Potasio ( $\text{KMnO}_4$ ).
- Peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).
- Ozono ( $\text{O}_3$ ).

## **6.8. Residuos generados**

La mayoría de las oxidaciones químicas generarán algún tipo de residuo que deberá ser removido por tratamientos químicos posteriores a la oxidación. La generación más significativa ocurre debido al uso de soda cáustica o cal con cloro gaseoso en la cloración alcalina. Cantidades menores de residuos resultan de oxidaciones llevadas a cabo con hipocloritos.

## **6.9. Criterios de diseño**

Se pueden usar tanto operaciones batch como continuas en los procesos de oxidación. El tratamiento batch es utilizado preferentemente para flujos menores o entre 190000 a 380000 litros por día (50000 a 100000 galones por día). El consumo de reactivos oxidantes y la elección de este reactivo dependerá en la eficiencia del proceso, la presencia de material oxidable competitivo, y por último la temperatura; y deberá ser determinado a partir de pruebas realizadas en planta piloto.

Cabe mencionar que en general el equipamiento necesario para la oxidación química es de mucha simpleza y facilidad de uso. Esto incluye estanques de almacenamiento para los agentes oxidantes e incluso para los residuos generados, equipos de medición de las características de ambas corrientes ya mencionadas, y estanques con agitadores para proveer un contacto apropiado entre el agente oxidante y el residuo a tratar. Cierta tipo de instrumentación es requerida para determinar las concentraciones de los polutantes, el pH del efluente, y el grado de conversión de la reacción de oxidación. El proceso puede ser monitoreado con un electrodo de potencial de oxidación-reducción (ORP). Este electrodo consiste generalmente en un pedazo de metal noble (generalmente Platino) que se expone en el medio de reacción. El electrodo produce un fuerza electromotriz (FEM) que se relaciona empíricamente con la razón de constituyentes oxidados y reducidos en la solución.

Una condición típica para la cloración alcalina de un kilogramo (2.2 libras) de cianuro a cianato, es la necesidad de seis kilogramos (13.2 libras) de tanto hidróxido de sodio y cloro. La reacción se lleva a cabo a un pH de 10, y al menos un tiempo de contacto de 15 minutos es necesario para completar la reacción.

Si se tiene la presencia de complejos metálicos de cianuro, puede ser necesaria la extensión de la cloración por un periodo mayor de tiempo. La destrucción completa del cianato requiere de una segunda etapa de oxidación con un tiempo de retención de aproximadamente 45 minutos a un pH inferior a 8.5. El requerimiento teórico de reactivo para esta segunda etapa es de 4.1 kilogramos (9.0 libras) de cloro y 1.1 kilogramos (2.4 libras) de soda cáustica por kilogramo (2.2 libras) de cianuro (USEPA 1982a).

La oxidación de cianuro a cianato con ozono requiere aproximadamente 2 kilogramos (4.4 libras) de ozono por kilogramo (2.2 libras) de cianuro, y una oxidación completa necesita 5 kilogramos (11 libras) de ozono por kilogramo (2.2 libras) de cianuro. Cabe mencionar que la oxidación de cianuro a cianato es bastante rápida (10 a 15 minutos) a un pH de 9 a 12, siendo prácticamente instantáneo en la presencia de trazas de cobre (USEPA 1982a).

Los requerimientos del ozono para una destrucción parcial de los fenoles presentes en una corriente, varían de una a cinco partes de ozono por parte de fenol. La demanda actual es una función de la concentración de fenol, del pH y del tiempo de retención o reacción.

### **6.10. Rendimientos y eficiencias**

La oxidación química es muy efectiva en la destrucción de cianuros libres como también en lo que se refiere al cadmio, cobre y complejos de cianuro-zinc. Es importante hacer notar que la oxidación química solo destruye la parte del complejo correspondiente al cianuro. A pesar de esto, el cianuro de níquel es destruido incompletamente, y los complejos de hierro-cianuro no son afectados aparentemente por el cloro o el ozono (USEPA 1982a). El proceso con ozono combinado con radiación UV es efectivo para el tratamiento de cianuros complejos como el cianuro férrico, el cianuro de cobre y el cianuro de níquel. Se tiene información del rendimiento del proceso de oxidación de las siguientes industrias y/o sus corrientes de desechos:

- Manufactureras de Compuestos Químicos Inorgánicos.
- Industrias Textiles.
- Industrias Mineras de Extracción y Refinamiento.
- Desechos Orgánicos e Inorgánicos.
- Compuestos Químicos Orgánicos
- Adhesivos y Sellantes.

Por último se muestran en las tablas 4.1 y 4.2 las eficiencias de remoción para las oxidaciones con cloro y ozono respectivamente:

**Tabla 6.1. Sumario de control tecnológico para la oxidación con cloro**

Polutantes	Puntos o Datos		Concentración del Efluente		Porcentaje de Remoción (%)	
	Escala piloto	Gran Escala	Rango	Media	Rango	Media
Clásicos (mg/l)						
DQO	—	1	—	980	—	35
SST	—	2	33–160	97	—	97
Nitrato de Amonio	—	1	—	120	—	37

Polutantes	Puntos o Datos		Concentración del Efluente		Porcentaje de Remoción (%)	
	Escala piloto	Gran Escala	Rango	Media	Rango	Media
Tóxicos (µg/l)						
Cobre	—	1	—	320	—	14
Cianuro	1	2	<2-130	35	82->99	>99
Plomo	—	1	—	2500	—	0

**Tabla 6.2. Sumario de control tecnológico para la oxidación con ozono**

Polutantes	Puntos o Datos		Concentración del Efluente		Porcentaje de Remoción (%)	
	Escala piloto	Gran Escala	Rango	Media	Rango	Media
Clásicos (mg/l)						
DBO (5)	2	1	610–5200	2900	—	10
DQO	2	—	76–12000	6000	—	84
SST	2	—	12–140	76	—	PS <sup>1</sup>
COT	3	—	200–980	540	5–52	11
Grasas y aceites	1	—	—	4	—	97
Fósforo Total	2	—	0.16–1.1	0.63	—	0
Fenoles Totales	2	—	0.01–0.13	0.07	50->99	>74
Aluminio	2	—	0.13–7	3.6	—	PS
Manganeso	2	—	0.07–0.09	0.08	—	12
Vanadio	2	—	0.02–0.54	0.28	—	PS
Bario	2	—	0.01–0.12	0.06	—	0

<sup>1</sup>PS = Poco Significativo.

Hierro	2	—	0.25–2.3	1.3	—	4
Silicona	2	—	2.6–4.7	3.6	2–4	3
Titanio	2	—	0.002–0.18	0.09		PS
Boro	2	—	0.74–1.0	0.87	—	0
Calcio	2	—	4.8–30	17	—	9
Magnesio	2	—	2.2–6.1	4.2	0–8	4
Sodio	2	—	53–56	54	2–8	5
Molibdeno	2	—	<0.01–<0.4	<0.2	—	PS
Cobalto	2	—	0.008–0.38	0.19	—	PS
Estroncio	2	—	0.002–0.18	0.016	0–99	50
Amoníaco	2	—	0.26–5.5	2.9	—	PS
Nitrato	2	—	1.8–8.8	5.3	—	47
Estaño	1	—	—	<0.02	—	PS

Polutantes	Puntos o Datos		Concentración del Efluente		Porcentaje de Remoción (%)	
	Escala piloto	Gran Escala	Rango	Media	Rango	Media
Tóxicos (µg/l)						
Antimonio	2	—	25–1200	610	—	PS
Arsénico	2	—	4–43	24	0–48	24
Berilio	2	—	<0.04–<4	<2.0	—	PS
Cadmio	3	—	<2–250	<130	—	PS
Cromo	1	—	6.3–<200	<100	—	PS
Cobre	2	—	89–590	340	—	PS
Cianuro	4	—	<2–1500	<24	>33–>98	78
Acero	2	—	<22–<900	<460	—	>29
Mercurio	1	—	—	<1.1	—	PS
Níquel	2	—	66–5000	2500	—	PS
Selenio	1	—	—	<1	—	PS
Plata	2	—	16–1300	660	—	PS
Talio	1	—	—	<50	—	PS
Zinc	3	—	90–460	240	—	96
2-etil-hexil-ftalato”	2	—	90–110	100	—	PS
Butil-benzil-ftalato	1	—	—	BLD <sup>2</sup>	—	98* <sup>3</sup>
Di-n-butil-ftalato	1	—	—	2.7	—	47
Benceno	1	—	—	BLD	—	80*
Etilbenceno	2	—	BLD–0.1	0.05	—	PS

<sup>2</sup>BLD = Bajo el Limite de Detección.

<sup>3</sup>\* = Valor Aproximado.

Tolueno	2	—	90.9–1.2	1.0	—	31
Antraceno	2	—	BLD–0.4	0.2	—	98*
Benzo(a)pireno	1	—	—	BLD	—	95*
Benzo(k)fluoranteno	1	—	—	BLD	—	90*
Fluoranteno	1	—	—	0.1	—	50
Pireno	1	—	—	0.1	—	67
Cloroformo	1	—	—	BLD	—	PS
1,2-Z-Dicloro-etileno	1	—	—	2.1	—	PS
Cloruro de Metileno	2	—	15–61	38	—	PS
Tricloro etileno	1	—	—	0.9	—	PS

## CAPITULO VII

### ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN

#### 7.1. Introducción

La Estabilización/Solidificación es una tecnología donde un material residual es mezclado con materiales que tienden a fijarse a un sólido, capturando o fijando el residuo dentro de la estructura del sólido.

Aunque los términos solidificación y estabilización son, usualmente, usados indistintamente, ellos representan conceptos distintos para el control de materiales residuales.

- **Solidificación:** se refiere a la producción de un sólido, de masa monolítica con suficiente estructura integrada, para ser transportado en piezas de tamaños convenientes sin requerir algún envase secundario.
- **Estabilización química:** se refiere a la inmovilización de sustancias tóxicas mediante reactivos químicos para formar compuestos insolubles en un enrejado cristalino estable.
- **Estabilización física:** envuelve el mezclado de lodos o semilíquidos con un agente abultante, tal como el pulverizado de cenizas muy finas(PSH), para producir sólidos de grano grueso, cuya consistencia es semejante a la del suelo, que puede ser fácilmente transportado por camiones, correas transportadoras o rieles hacia un sitio de disposición. El primer objetivo de este proceso de mezclado es la generación de un secado, transportando productos residuales con aceptables propiedades medio ambientales.

Otras técnicas de fijación incluyen procesos basados en arcilla y varias formas de encapsulación usando polímeros orgánicos que se endurecen durante el tratamiento.

El primer objetivo en todos estos procesos, es convertir las corrientes de residuos tóxicos a un inerte, masas físicamente estables, teniendo muy baja lixiviabilidad y con suficiente fuerza mecánica para permitir la recuperación de la tierra o rellenos sanitarios. En la movilización de los residuos al agua se ha considerado mayormente el contenido de residuos tóxicos y también se ha dado énfasis sobre el proceso de fijación donde han sido localizadas para prevenir la llegada de los residuos a contactarse con el agua y controlar las condiciones químicas del medio ambiente acuático, en orden a minimizar la solubilidad. Infortunadamente otros serios impactos a largo plazo sobre la salud humana y el medio ambiente no pueden ser completamente regulado, pues hay muy poca o no existe información acerca de la degradación del medio ambiente a largo plazo, a excepción de la polución del agua.

## **7.2 Procesos**

El presente sistema de estabilización/fijación o de fijación puede ser agrupado en los siguientes 11 clases de procesos (Poon et al 1983):

- a) Solidificación mediante la adición de cemento.
- b) Solidificación mediante la adición de limo u otros materiales puzolánicos.
- c) Embutiendo los residuos en materiales termoplásticos, tales como: betún, parafina o polietileno.
- d) Micro-encapsulación mediante fraguado térmico.
- e) Macro-encapsulación de residuos en un revestimiento inerte.
- f) Tratamiento de los residuos para producir un producto cementoso con una gran adición de otros constituyentes.
- g) Formación de un vidrio por fusión de los residuos con sílica (clasificación).

Los primeros dos métodos son los más comúnmente usados, siendo convenientes para la gran mayoría de los residuos inorgánicos de procesos. Los costos de tratamiento para los procesos restantes son, generalmente, más altos; estas últimas técnicas están reservadas para residuos problemáticos tales como radioactivos o aquellos con alto contenido orgánico.

### **a) Procesos basados en cemento**

Las técnicas basadas en cemento, generalmente, usan materiales de cemento ordinario de Portland (OPC) con aditivos para mejorar las características físicas y disminuir la percolación de las sustancias sueltas, desde el residuo sólido resultante. El residuo peligroso es mezclado en una pasta con agua y polvo de cemento no hidratado. El mecanismo de estabilización es la formación de productos hidratados desde componentes de silicato y agua. Se forma un gel de silicato de calcio hidratado. Este gel entonces se hincha y forma la matriz de cemento compuesto de fibras de silicato, que actúan como sistema de enclavamiento, y los productos hidratados.(Birchall, Howard y Bailey, 1978).

Una serie de compuestos pueden interferir con el proceso de solidificación (USEPA 1981). Algunos, tales como sales de manganeso, estaño, cobre y plomo, pueden incrementar los tiempos de fraguado y disminuir, grandemente, la resistencia física. Impurezas tales como materia orgánica, limo (sedimentos) y algunas arcillas, pueden causar demora en el fraguado. Estas impurezas y otros materiales insolubles, bastante finos para pasar por un tamiz de 200 mesh, pueden cubrir las partículas más grandes y debilitar los lazos agua/cemento.

Variaciones del proceso básico pueden ajustar las características físicas y químicas atípicas del residuo. Por ejemplo, mientras el agua es esencial para la hidratación y fraguado del cemento, un exceso de agua impediría el endurecimiento. Para residuos líquidos o tipos de pasta, un agente abultador, generalmente, PFA, es adicionado para alcanzar una consistencia aceptable para la adición del cemento. Otro problema frecuentemente encontrado con residuos ácidos es que el cemento, siendo alcalino, primero

absorbe la acidez libre y luego comienza a fraguar a un pH cercano a 11. La adición de OPC a tales residuos es entonces destructivo y muchas veces primero se introduce el limo o PFA para espesar el residuo y alcanzar un pH alrededor de 7. Un mínimo del 10 % en peso, del cemento es generalmente requerido para producir el endurecimiento del producto sólido con la necesaria resistencia mecánica.

Los minerales arcillosos, tales como la bentonita, con su capacidad de intercambio catiónico y gran superficie específica, reaccionarán con los compuestos orgánicos y por lo tanto han sido usados para aumentar el rango de residuos aceptados por fijación a residuos inorgánicos, conteniendo sobre el 5% de ciertos orgánicos, generalmente básicos (Kupiec 1980). Hay muchos tipos de minerales arcillosos pero sólo aquellos con la suficientemente alta capacidad de intercambio catiónico son aceptables. Ejemplos de arcillas son la vermiculita y la montmorillonita las que tienen capacidades de intercambio catiónico en el rango de 130 a 150 meq por 100 g (Grim 1962, Thang 1974). El agente de fraguado, usualmente OPC, refuerza la acción de **gelling** de la arcilla y forma un material físicamente estable tal que tiene la habilidad de atrapar y ligar los residuos contenidos. Ese material residual es convertido en un sólido química y físicamente estable, similar al suelo, el que es demandado por ser substancialmente insoluble en agua pero esponjoso, con lo que reabsorbe el agua a través de su apreciable extensión.

## **b) Procesos basados en limo**

El limo o materiales puzolánicos combinados producen matrices cementosas que entranpan química y físicamente los residuos.

Las puzolanas son definidas como materiales que, aunque no cementosos por si mismo, contiene constituyentes que se combinaran con limo a temperaturas normales en la presencia de agua formando compuestos insolubles estables que tienen tales propiedades (Lea 1970).

Tanto el material natural como el artificial pueden ser usados, incluyendo polvo volcánico y cenizas, además de puzolanas tales como barro(arcilla) cocido, arcilla esquitosa, esquito petrolífero gastado, gasa quemada, mortero quemado y PFA.

Las puzolanas, más comúnmente usadas en procesos de fijación química son cenizas muy finas y polvos de horno de cemento. Ambos son residuos y los procesos tienen la ventaja de la codisposición. La interpretación del mecanismo de la reacción limo-puzolana, se basa en que los materiales puzolánicos tienen un comportamiento similar a las reacciones de los compuestos zeolíticos en lo que respecta al intercambio de sus constituyentes iónicos. Ello esta sujeto a que esta capacidad de intercambio puede ser elevada por la combinación de limo con iones metálicos en el proceso de fijación(Pojasek 1979).

Una interpretación alternativa es que la mayoría de las reacciones puzolánicas son debido a la formación de compuestos hidratados, llamado silicato de tricalcio hidratado

como en la hidratación de cemento. El efecto neto, demanda es que las partículas de residuo son micro-encapsuladas dentro de una gran matriz de gel.

La tabla 6-10 muestra la influencia de la adición de limo para una desulfuración gaseosa de fibras (FGD) del lodo físicamente estabilizado con PFA (Pojasek 1979). La resistencia del producto sólido final es elevado con una mayor concentración de limo. En estas circunstancias, el PFA es usado como un agente abultador y como material puzolánico (un exceso de agua es tan indeseable como en el proceso basado en cemento). En orden a producir un sólido mecánicamente resistente, puede requerirse la adición de limo sobre un 30%, dependiendo del tipo de residuo y de la composición química de la puzolana.

### **c) Encapsulación termoplástica**

Los materiales termoplásticos son plásticos orgánicos capaces de revertir el ablandamiento y endurecimiento del sobrecalentamiento enfriamiento. Estos materiales poliméricos son usualmente materiales lineales con pocos enlaces cruzados y otros especialmente hinchados, o son solubles en solventes orgánicos. Los materiales termoplásticos incluyen asfalto, bitumen, polietileno, polipropileno y nylon. Los materiales más frecuentemente usados en este grupo son asfalto y bitumen.

En la técnica de estabilización, el residuo necesita ser secado o deshidratado hasta que el residuo tenga un alto contenido de sólido y, entonces, es mezclado con el polímero a elevada temperatura (usualmente 100°C). Algunos procesos utilizan líquidos pastosos y los mezclan con el material termoplástico, mientras alcanzan la temperatura para evaporar el exceso de agua. El proceso ha sido usado en continuo o batch, mezclando las operaciones donde la energía utilizada esta claramente concentrada en la operación (Pojasek 1979). Los materiales, tales como el sulfuro, han sido incorporados en la matriz de encapsulación, para proveer la resistencia física y la estructura integra. El 60% del sulfuro contenido en la mezcla sulfuro/asfalto puede ofrecer una técnica de costo más efectivo, que esta sujeta a la disposición de grandes cantidades de sulfuro a bajo costo desde fuentes secundarias, tales como residuos gaseosos de chimenea, refinerías de petróleo, procesamiento del carbón(Breuner y Rugg 1982).

### **d) Micro-encapsulación por fraguado térmico**

Los fraguadores térmicos son materiales que se convierten en sólido y endurecen cuando se calientan. Permanecen sólidos aun después de los subsecuentes ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Los procesos de micro-encapsulación incluyen in situ la polimerización, formando un revestimiento impenetrable cercano a las partículas del residuo. Los monómeros orgánicos son continuamente mezclados con el residuo y es adicionado un activador/catalizador para iniciar la polimerización. Los enlaces cruzados están influenciados por los parámetros como: pH, contenido de agua y constituyentes iónicos en las corrientes de alimentación, con el endurecimiento de los enlaces cruzados del polímero

producido, siendo este estable y soluble en solventes orgánicos. (Subramanian y Wakalingan 1977, USEPA 1977)

La mayoría de los tipos de polímeros orgánicos, corrientemente en uso para el tratamiento de residuos son la urea formaldehído, poliéster y polibutadieno procesados con fenol formaldehído y resinas epóxicas, siendo usados en pequeña cantidad.

### **e) Macro-encapsulación**

La macro-encapsulación, básicamente, consiste del sellado de los materiales residuales, tratados o no de alguna manera, con una cubierta impenetrable e inerte.

Para los recipientes de residuos, usualmente se asume que la pared del recipiente, eventualmente se corroerá y a continuación fallara, exhibiendo las características de soportación, por lo tanto, se puede diseñar una camisa de soportación para reforzar el recipiente. En un proceso, el reactivo usado es una mezcla de fibra de vidrio, reforzado con resinas de fraguado térmico (epóxicas) y resinas de poliuretano basado en agua. La mezcla es rociado o brochado sobre la pared del recipiente y es elegido para proveer una camisa exterior fuerte que protegerá el contenido, de la lixiviación(percolación) y del stress mecánico.(Lubowitz y Telles 1981)

Se debe mencionar también una muy simple técnica de macro-encapsulación, envuelve el uso de OPC, típicamente empleado cuando los materiales están siendo dispuestos, como ocurre en los laboratorios pequeños (Ej: botellas de productos químicos, etc). El material, ya contenido en un envoltorio, es transferido a un bidón de acero y los intersticios son llenados con una pasta de OPC. El endurecimiento del cemento incluye los químicos. El cemento endurecido, que incluye los químicos y el vertido, es soportado por el bidón de soportación. El recipiente, puede entonces ser dispuesto en un sitio de relleno sanitario. Una técnica similar puede ser usada para encapsular materiales radioactivos, previa disposición.

### **f) Técnicas cementosas**

La cementación puede ser aplicada a residuos que contienen grandes cantidades de sulfato de calcio o sulfito de calcio, tales como el proveniente de la limpieza de lodos del gas combustible o de la desulfuración de lodos.

Una porción del residuo, usualmente 8 a 10% en peso, es calcinado y, luego, remezclado con el residuo para absorber el exceso de humedad. El producto resultante es un sólido estable, fácilmente manejable. (Pojasek 1979)

## **g) Vitrificación**

Los residuos son mezclados con sílica y calentados a temperaturas extremadamente altas, y a continuación refrigerados hasta llegar, preferentemente, a un sólido vidrioso. Una variación de esta técnica, es usando electrodos de grafito reduciendo los residuos enterrados, seguido de una vitrificación in-situ. Todo sistema de vitrificación emplea algunos tipos de cubiertas para capturar y tratar los humos y vapores emitidos durante la operación.

Debido a que estos sistemas utilizan una gran cantidad de energía, estos son costosos, ellos han sido generalmente considerados sólo para altos niveles de radioactivos u otros residuos extremadamente peligrosos.(Pojasek 1979)

Sin embargo, un nuevo proceso desarrollado en el Reino Unido se ha diseñado para vitrificar asbestos por tostado en un horno a alta temperatura, especialmente, adaptado(Enviromental News Data Service 1985). Se pretende que el volumen del residuo sea reducido en un factor de 10 o más y que el producto sea no fibroso e inofensivo que puede ser usado como recubrimiento.

### **7.3. Aplicabilidad**

Una gran variedad de residuos han sido tratados mediante estos procesos, incluyendo residuos metálicos, residuos de ácidos de la fundición de plata y plomo, las colas de las minas, los lodos de tratamiento de efluentes, cenizas de la incineración, alimentos para la producción de lodos y control de residuos en la emisión de la producción de gas combustible. Datos disponibles, sugieren que los procesos de cementación son más convenientes para residuos inorgánicos, especialmente para aquellos que contienen cationes. Los residuos orgánicos e inorgánicos aniónicos son más manejables mediante procesos de encapsulación orgánica.

Las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 resumen la información disponible sobre las ventajas y desventajas relativas a los distintos procesos.

Aunque muchos materiales no son totalmente reducidos por estos procesos, su liberación al ambiente por percolación es considerablemente lenta.

Un gran número de los propietarios de los procesos, basados sobre los principios discutidos, los han patentado (Pojasaek 1979; Poon et al. 1983). En general, el abultamiento (estabilización física) de lodos con PFA y/o la adición de OPC a un residuo para promover su endurecimiento, no están pensados en infringir las patentes existentes. Sin embargo, el uso de otros materiales residuales, tales como polvo combustible de los hornos de secado del cemento o escorias de los altos hornos, para reducir los costos o de aditivos tales como arcillas, podrían infringir las patentes existentes. El uso de este manual se a preocupado de conducir a una perfecta inspección de la literatura patentada antes de embarcarse en el riesgo que envuelve la significante inversión financiera.

**Tabla 7.1. Resumen de ventajas y desventajas de los procesos de fijación inorgánica**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja inversión de capital en equipos y costos de operación.</li> <li>• Los materiales requeridos son relativamente baratos y abundantes.</li> <li>• Las técnicas para el procesamiento están relativamente bien establecidos.</li> <li>• La natural alcalinidad de los materiales ayuda a neutralizar la acidez de la solución residual.</li> <li>• Una amplia deshidratación no es requerida pues los materiales están incorporados en el agua y pueden ser adaptados a amplios rangos de contenido de agua.</li> <li>• Las propiedades físicas del residuo tratado puede ser variada mediante la variación selectiva de la razón de reactivo.</li> <li>• Los procesos basados en limo pueden disponer de 2 residuos en un proceso simple.</li> <li>• Los procesos basados en arcillas pueden ser usados para el tratamiento de algunos residuos orgánicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere una gran cantidad de materias primas.</li> <li>• Materias primas (especialmente cemento que necesita una gran cantidad de energía).</li> <li>• Ciertos residuos, tales como aquellos que contienen compuestos orgánicos pueden causar algunas dificultades en el endurecimiento.</li> <li>• El volumen y peso del producto tratado es aumentado considerablemente.</li> <li>• Los residuos tratados son vulnerables a la percolación, especialmente los ácidos moderados y la adición de selladores puede ser requerida.</li> <li>• Los mecanismos de estabilización no están bien establecidos.</li> </ul>

**Tabla 7.2. Resumen de ventajas y desventajas de los procesos de encapsulación orgánica**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las velocidades de migración de la contaminación son, generalmente, más bajas que en los procesos inorgánicos.</li> <li>• En comparación con los procesos inorgánicos se requiere una mejor fijación.</li> <li>• Los materiales tratados tienen una menor densidad, esto reduce los costos de transporte.</li> <li>• Los materiales orgánicos forma una frontera impermeable entre el residuo y la solución percolada.</li> <li>• Los procesos pueden encapsular un amplio rango de residuos.</li> <li>• Para la macro-encapsulación, la manera del rociado para la aplicación de resinas sobre los equipos puede ser empleado directamente y no requiere grandes gastos de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los materiales usados son caros.</li> <li>• Para la encapsulación termoplástica y por fraguado térmico, requiere de grandes gastos de energía en secado, fundido y polimerización.</li> <li>• Algunos polímeros orgánicos son inflamables.</li> <li>• Los procesos requieren de trabajadores expertos y de equipos caros, excepto para la macro-encapsulación.</li> <li>• Los materiales son biodegradables y están sujeto a ataques por solventes orgánicos.</li> <li>• La polimerización incompleta de alguno de estos materiales podría causar la misma polución.</li> </ul>

**Tabla 7.3. Compatibilidad de selección de entre la categoría del residuo con las diferentes técnicas de solidificación/estabilización de residuos**

Componente residual	Basado en cemento	Basado en limo (cal)	Encapsulación termoplástica	Micro-encapsulación por termofraguado	Macro-encapsulación
<b><u>Orgánicos</u></b>					
Solventes orgánicos y aceites	Muchos impiden el fraguado, pueden escapar como vapores.	Muchos impiden el fraguado, pueden escapar como vapores.	Los orgánicos pueden vaporizar en el calentamiento .	Pueden retardar el fraguado de los polímeros.	Deben primero ser absorbidos en una matriz sólida.
Sólidos orgánicos(ej: resinas plásticas.	Bueno- muchas veces incrementan la estabilidad.	Bueno- muchas veces incrementan la estabilidad.	Posible uso como agente aglomerante.	Puede retardar el fraguado del polímero.	Compatible- muchos materiales de encapsulación son plásticos.
<b><u>Inorgánicos</u></b>					
Residuos ácidos.	El cemento neutralizara los ácidos.	Compatible.	Pueden ser neutralizados antes de su incorporación	Compatible.	Pueden ser neutralizados antes de su incorporación
Óxidos	Compatible.	Compatible.	Pueden causar fallas incendiarias en la matriz.	Puede causar fallas en la matriz.	Puede causar deterioro del material de encapsulación
Sulfatos	Puede retardar el fraguado y causar spailing sin el uso de cemento especial.	Compatible.	Puede deshidratar y rehidratar causando hendiduras.	Compatible.	Compatible.

Componente residual	Basado en cemento	Basado en limo (cal)	Encapsulación termoplástica	Micro-encapsulación por termofraguado	Macro-encapsulación
Halados	Fácilmente percolados desde el cemento, puede retardar el fraguado.	Puede retardar el fraguado son más fácilmente percolados.	Puede deshidratar.	Compatible.	Compatible.
Metales pesados	Compatible.	Compatible.	Compatible.	A pH ácido solubilizan en hidróxidos metálicos.	Compatible.
Materiales radioactivos.	Compatible.	Compatible.	Compatible.	Compatible.	Compatible.

Fuente: USEPA. 1981. Report No. SW-873 (PB-81-181-505)

#### **7.4. Evaluación del proceso**

Las proporciones relativas de residuos y de otros constituyentes en un satisfactorio proceso de estabilización/solidificación, constituyen variables que dependen considerablemente de la exacta composición y naturaleza de los residuos y de los detalles del proceso. Si se está seleccionando el proceso más adecuado para una corriente residual particular, existe información publicada por los dueños del proceso, pero que es improbable que sea de utilidad. No existe sustituto para un detallado proceso de evaluación en el laboratorio. En suma, es necesario llevar a cabo específicos test de laboratorio para cada corriente de residuos que están siendo solidificadas con una facilidad particular.

La efectividad de un proceso de estabilización/solidificación para un residuo particular, puede ser evaluado en términos de tres significativas propiedades de el residuo tratado:

- Tiempo de endurecimiento y salado;
- Propiedades físicas; y
- Solubilidad de los componentes peligrosos.

Como muestra la tabla 6-13, un número de materiales retarda el establecimiento de la mezcla, particularmente en procesos con cemento o basados en la cal. El tiempo de establecimiento es fácil de testear en el laboratorio, por ejemplo, por el uso periódico de un

penetrómetro, el cual es un instrumento de forma cónica, y de tamaño y peso estándar, que se deja caer desde una altura estándar.

Propiedades físicas como la densidad y el esfuerzo de compresión del residuo tratado, son de importancia en la determinación de sus propiedades como un material para la recuperación de la tierra. En las siguientes tablas se muestran valores típicos de esfuerzos de compresión para procesos de fijación basados en cemento, dados por el vendedor de los propietarios del proceso.

**Tabla 7.4. Esfuerzo de tensión de un producto fijado con base de cemento (psi)**

	Después de tres días	Después de siete días	Después de 28 días
Residuo de arsénico		390	750
Residuo acuoso	193	330	610
Residuo de cromo		108	220
Residuo de cromo		155	310

**Tabla 7.5. Tensiones típicas de materiales (psi)**

Concreto (B.S.12) consistente de una mezcla estándar de cemento, arena y arcilla, después de 28 días.	4.500
Mortero (B.S.12) consistente de una mezcla estándar de cemento, arena y arcilla, después de tres días.	2.100
Impermeabilizadores industriales usados en rellenos de huecos, en la estabilización de terrenos, cargadores de lodos y en todo sitio de trabajo, después de 28 días.	77 a 616
Productos fijados con cemento, después de 28 días.	200 a 800

La resistencia a la lixiviación de un componente peligroso es afectado por la permeabilidad de el residuo tratado, el cual controla la velocidad de penetración del fluido que está percolando (lixiviando), y por la velocidad de lixiviación de los contaminantes en el fluido.

La siguiente tabla compara valores típicos de permeabilidad para varios materiales, valores dados por el vendedor de un producto fijado por cemento.

**Tabla 7.6. Valores típicos de coeficientes de permeabilidad (cm/s)**

Arcilla limpia	1 y más
Arena limpia y áspera	1 a 0.01
Arenas mezcladas	0.01 a 0.05
Arena fina	0.005 a 0.001
Arena barrosa	0.002 a 0.0001
Barro	0.0005 a 0.00001
Greda	0.000001 y menos
Concreto típico	0.000001
Producto fijado con cemento	0.0000001 a 0.0000002

Una variedad de test de lixiviación han sido ideados, los cuales se adjudican una simulación de tierra donde ocurre un proceso de lixiviación en un relleno sanitario. Entre los factores que influyen en el potencial lixiviado de un residuo se incluyen: iones presentes, pH, estequiometría, temperatura, carga electrostática (efecto superficial), presencia de compuestos ligandos y quelatos, el potencial de óxido-reducción (redox), y muchos otros parámetros.

El proceso de lixiviación es afectado por muchas reacciones complejas locales, tanto que la velocidad de lixiviación no puede ser expresada en un convencional modelo matemático, aunque esto ha sido probado (Poon et al., 1983).

Los dos métodos principales para testear la lixiviación son los test de columna y batch con agitación. Comúnmente, muchas variaciones en el proceso están en uso en diferentes laboratorios (Young and Wilson, 1982) y es por eso muchas veces imposible publicar correlaciones de resultados de estos test. Las ventajas y desventajas de los test de columna y batch son comparados en la siguiente tabla.

**Tabla 7.7. Ventajas y desventajas de los test batch y de columna**

**Test batch**

Ventajas	Desventajas
El efecto de borde en el test de columna es evitado	No considera al medio ambiente en un sitio de relleno sanitario
El tiempo requerido para el test es generalmente menor que para el test de la columna	No mide la lixiviación verdadera, sino que concentraciones de equilibrio
Los resultados son más reproducibles	Se requiere un procedimiento de filtración estándar

### Test de la columna

Ventajas	Desventajas
Simula el contenido del residuo lixiviado y la lenta migración del lixiviado encontrada en rellenos sanitarios  Buena predicción de el modelo con el tiempo	Canalización y no uniformidad del relleno  Se tapa Crecimientos biológicos  Efectos de borde Requerimientos de tiempo Reproducibilidad

El diseño básico de estos, y de otros test de lixiviación, es mostrado esquemáticamente en la figura 7.18.

**Tabla 7.8. Test de equilibrio de lixiviación. Resultados para procesos basados en la fijación con cemento**

Polutante	Concentración del polutante en el residuo (ppm)	Concentración de polutante en el lixiviado (ppm)	% de lixiviado
Cromo (+6)	25.000	0.2	0.03
Cobre	25.000	0.26	0.03
Níquel	25.000	0.5	0.055
Zinc	55.150	0.15	0.009
Plomo	101.150	0.5	0.016
Cadmio	78.090	0.1	0.042
Manganeso	45.590	0.08	0.057
Sulfuro	14.660	0.1	0.05
Estaño	9.740	0.1	0.03
Arsénico	12.500	0.16	0.03

La EPA ha publicado reportes independientes, asignando una selección para procesos de estabilización/solidificación (USEPA, 1978).

## 7.5. Criterios de diseño

La selección de cualquier técnica particular de residuos fijados debe incluir cuidadosas consideraciones de el contenedor requerido, el costo de proceso, el abultamiento del material, y de los cambios de las características de manejo. El diseño y el sitio de cualquier relleno sanitario que, eventualmente, recibirá el residuo fijado son consideraciones preponderantes en la decisión del contenedor y propiedades físicas requeridas.

El proceso típico de estabilización/solidificación inorgánica incluiría las siguientes etapas:

- **Colección (recolección) de residuos:** algunas plantas pueden segregar los residuos a ser solidificados. La mezcla de los residuos afectará el proceso escogido para el pretratamiento y la solidificación.
- **Pretratamiento de residuos:** pretratamientos físicos requeridos pueden incluir decantación, desaguado, evaporación o calcinación, destrucción con cianuro, neutralización, o reducción con cromo. Tratamientos químicos previos a la solidificación pueden ser requeridos para algunos procesos.
- **Adición de agentes aglomerantes y de solidificación:** cada técnica de estabilización/solidificación tendrá un requerimiento para la adición de agentes. El total de aditivos será probablemente determinado por las especificaciones requeridas para la aprobación del procedimiento estructural integral. Otras especificaciones pueden ser requeridas dependiendo del uso final del material.
- **Sistemas de mezclado/empaquetado:** la solidificación es muchas veces conducida a uno u otro contenedor, o por mezclado en línea con descarga a un contenedor o no. La mezcla en contenedores de el residuo y los agentes de solidificación, pueden ser realizados con mezcladores de rodillo, mezcladores rotatorios o tipo kettle (ejemplo, figura 6-19). El mezclado en línea es realizado por mezclas dinámicas o batch (ejemplo, figura 6-20). Al usarse los contenedores, estos deben ser inspeccionados, monitoreados y etiquetados.
- **Área de fraguado y endurecimiento:** el residuo puede ser dirigido a una serie de lagunas de endurecimiento y fraguado, o puede ser descargado directamente a el sitio de depósito final para un endurecimiento in-situ. Áreas de laguna podrían ser suficientes para mantener al residuo tratado durante una semana por lo menos, tiempo durante el cual el proceso de endurecimiento podría completarse.
- **Deposición de residuos endurecidos:** la proximidad de la planta de tratamiento a un depósito para los residuos fijados, es un factor determinante de la viabilidad comercial del proceso. El producto final es más aglomerado que el residuo original; si son usadas lagunas intermedias, remoción del producto fijado por excavadores y el transporte a el depósito puede aumentar considerablemente el costo total del tratamiento.

## **7.6. Consideraciones del proceso**

La siguiente discusión está limitada al proceso de fijación inorgánica.

### **a) Caracterización del residuo**

Las características físicas y químicas de el residuo deben ser especificadas. La acidez/basicidad, el contenido metálico, los contaminantes orgánicos, etc., constituyen información esencial requerida para un proceso de evaluación.

### **b) Evaluación del proceso/Control de calidad**

El control a nivel de laboratorio de todas las etapas de un proceso de fijación es vital. Debe ser recalcado el hecho que la calidad de los agentes químicos y aglutinadores, que se utilizan, y la integridad del producto final son empíricamente determinados, y los test a pequeña escala que se realizan en laboratorio, se deben desarrollar sobre un residuo para estabilizar estos parámetros. Procesos de fijación a gran escala, incluyen la descarga en algunas lagunas de fraguado, no ofreciendo oportunidades para remediar la acción que se produciría al procesar incorrectamente un residuo. El defecto más común es el obtener un producto que no se ha fraguado hasta el nivel de esfuerzo mecánico deseado, resultando en el colapso de la laguna retenedora de lodos debido a la presión de la pasta.

El uso de más aditivos para el proceso son patentados, y por la competencia comercial, las compañías están en contra de discutir sus técnicas, velocidades y razones de mezcla. Por esta causa es que muy pocos datos científicos de valores están disponibles para el residuo producido. Un próximo documento, preparado por el departamento UK de el medio ambiente, dará una guía para un proceso básico de fijación incluyendo la adición de PFA y OPC a el residuo.

### **c) Almacenaje/Mezclado**

El residuo en crudo(s), y los aditivos, requieren de un fácil almacenamiento. Materiales secos son depositados en silos con equipos para el transporte, y que permitan cierta facilidad para pesar y para el control. Todo proceso de fijación inorgánica, ya sea basado en cemento o cal, requiere condiciones alcalinas ( $\text{pH} > 10$ ) para el fraguado final y para la etapa de endurecimiento. Hay considerables alcances para la improvisación durante el pretratamiento, por ejemplo por el mezclado de dos corrientes de residuos con alto pH, así se logra ahorrar en aditivos como la cal.

### **d) Mezclado**

Muchas formas de mezclado pueden ser usadas, dependiendo de la escala de el proceso y de la naturaleza física de los aditivos. Para operaciones pequeñas o medianas, las mezclas de cemento son las más convenientes. Tanques cilíndricos de paleta larga de

agitación, pueden ser usados. Bombas de mezcla y otras formas de mezcla estática son convenientes para el contacto de las pastas o en procesos a escala de tambores (Pojasek, 1979).

#### **e) Lagunas de fraguado**

El residuo tratado puede llegar por gravedad o por tornillos de descarga (descarga rotatoria), a las lagunas de fraguado, o bombeados mientras aún esté en forma de pasta. Las lagunas serían de un tamaño tal de permitir una semana como mínimo tiempo de residencia para el residuo. Típicamente el líquido pastoso comienza a fraguar dentro de veinticuatro horas. Después de tres días, el producto está lo suficientemente solidificado como para caminar sobre él, y después de un más o menos un mes, el producto podrá soportar el tráfico vehicular. El último esfuerzo de el producto es alcanzado después de un período de seis meses. Un excavador mecánico remueve los residuos solidificados de las lagunas.

Las lagunas son generalmente bien drenadas, son recintos forrados en arcilla, y están provistas de zanjas colectoras de percolado (lixiviado), las cuales se podrían convertir en las alimentaciones de un tanque donde el ajuste químico final puede ser realizado previo a la descarga, si surgiera la necesidad. El monitoreo del lixiviado es esencial como una indicación de la eficacia del proceso.

#### **f) Sistemas completos**

Dos ejemplos de procesos a escala de tambor para residuos fijados, son los mostrados en las figuras 6-19 y 6-20.

Para el tratamiento de procesos a gran escala, digamos, sobre 30 Ton/día de residuos, los requerimientos básicos serían:

- Dos mezcladores de cemento, de acero inoxidable de 10 m<sup>3</sup>
- Tres silos, cada uno de alrededor de 20 m<sup>3</sup> de capacidad, con PFA, cemento y cal y equipos para el transporte, y mecanismos de pesado batch y control
- Dos lagunas de 500 m<sup>3</sup>, cada una con capacidad para retener una semana el producto tratado
- Dos bombas de transferencia de lodos
- Tanques de depósito, mezclando y pre-tratando residuos crudos y un excavador mecánico.

La fuerza laboral correspondería a dos operadores por turno (Pojasek, 1979).

Una secuencia típica de operaciones es la siguiente:

- 25 ml de la colección batch de el residuo es tratado a pH=7 con PFA y posiblemente con otros materiales; los requerimientos de PFA son conocidos.

- De 3 m<sup>3</sup> a 5 m<sup>3</sup> de el residuo son entonces bombeadas a el mezclador, junto con la necesaria cantidad de PFA. Después de un período de mezclado de 10 a 15 minutos, pH de la mezcla es chequeada por neutralización.
- Se adiciona cemento en una cantidad igual a alrededor del 10% en peso de la cantidad de residuo, y es completamente mezclado con él. La basicidad de el cemento sube el valor del pH. Necesariamente, el cemento o cal es adicionado para mantener el pH final alrededor de un valor de diez.
- Después de mezclar por quince minutos, los valores de pH y consistencia son verificados. Por experiencia se sabe que si se considera demasiada humedad, se debe adherir más PFA para abultar la mezcla.
- El producto es descargado y dejado endurecer.

#### **g) Mantención**

La naturaleza corrosiva de algunos residuos, y la abrasión de el tambor de mezclado, por los sólidos aditivos, provoca un periódico reemplazo de el tambor; la frecuencia de el reemplazo depende de la extensión de el uso de el tambor. Típicamente, un programa de reposición a los seis meses, es necesario para una operación de 7 días/semana.

#### **7.7. Consideraciones económicas**

Una de las más importantes ventajas de las técnicas de estabilización/solidificación, es que el depósito de el residuo tratado puede tener lugar en un gran número de sitios, que podrían haber sido diferentes. Esta es una obvia ventaja en regiones donde los residuos peligrosos que se producen son una desventaja financiera y práctica, por la no capacidad de depositar ciertos residuos a través de la falda del espacio del relleno sanitario local (Poon et al., 1983).

Un análisis completo de el costo de tratamiento debe incluir costos de transporte de ambos residuos, del crudo y del estabilizado, el equipo requerido y el costo de la mano de obra (laborantes). Costo de varios sistemas diferentes se dan en la siguiente tabla (Hill, 1981):

**Tabla 7.9. Consideraciones económicas para residuos de sistemas de estabilización/solidificación**

Tipo de sistema de tratamiento	Material requerido	Costos de material (1980)	Cantidad de material requerido para tratar 100 libras de residuo crudo	Tendencia de precios	Costo de equipos	Requerimientos de energía
Basado en cemento	Cemento	\$0.03/lb	50 lb a 100 lb	Estable	Bajo	Bajo
Pozzolánico	Cal pulverizada	\$0.03/lb	50 lb a 100 lb	Estable	Bajo	Bajo
Termoplástico	Bitumen Tambores	\$0.05/lb \$27/tb	100 lb 0.8/tb	Relación con los precios del petróleo	Muy alto	Alto
Polímeros orgánicos (sistemas de polyester)	Polímeros Catalizador Tambores	\$0.45/lb \$1.11/lb \$17/tb	43 lb de mezcla de polyester y catalizador	Relación con los precios del petróleo	Muy alto	Alto

Los costos de capital e instalación de procesos de fijación inorgánica, dependen de la escala y del nivel de satisfacción requerida en el depósito. Por ejemplo: PFA, cal y cemento pueden ser depositados en bolsas o en tambores de 200 litros, y el cemento mezclado se alimenta con la ayuda de un camión elevador con tenazas.

Para operaciones a pequeña escala empleando, por ejemplo, un solo mezclador de 10 m<sup>3</sup> de volumen total (de este volumen se ocupa en el trabajo 6 m<sup>3</sup>), tales facilidades de depósito son adecuadas. Igualmente, el producto tratado puede ser descargado por gravedad a buenos drenados, un poco olvidados frente a las lagunas, así dispensando con la necesidad de un excavador y ahorrando en cuanto a requerimientos de espacio. Los mezcladores pueden ser manejados eléctricamente o con máquinas diesel; bombas de borras pueden también ser operadas eléctricamente o con un compresor de aire con poder diesel.

Para el ejemplo de 30 Ton/día, el costo instalado está estimado en alrededor de US\$ 500000, con costos civiles y de instalación responsables del 10% del costo total.

La mantención está estimada en 50000 US\$/año.

## **7.8 Encapsulación**

Ciertas sustancias químicas requieren ser destruidas por incineración a temperaturas por sobre los 1200°C, para convertirlas en no peligrosas. Si los volúmenes para depósitos son insuficientes para permitir la viabilidad de una operación con incinerador a esas altas temperaturas, y si no están disponibles alternativas como el cemento o cal.

Un proceso de encapsulación para el depósito permanente de esos químicos es en celdas de concreto especiales para soportar el considerable esfuerzo interno.

Químicos que han sido encapsulados incluyen:

- PCB (policlorato de bifenilo)
- OCB (orto cloro fenol)
- Compuestos de mercurio
- Venenos del grupo uno de pesticidas (DDT)
- Capacitadores (reellenos de PCB).

La encapsulación se da en los reellenos sanitarios de clase uno. Con arcilla como la formación geológica en la base del sitio.

Los bloques, de 3.2 (4.6 metros de tamaño, son tirados en la base del barro. El piso, reforzado con una malla (especie de red que forma una completa jaula dentro del concreto), se coloca primero con un espesor de 25 a 30 centímetros. El concreto se deja endurecer durante tres a cuatro días, entonces el bloque es cargado para encapsulación a el tambor/capacitador. Cada tambor/capacitador tiene unos 100 mm de espacio entre sí y la próxima unidad, tanto que el concreto está rodeando completamente cada unidad.

Entonces el bloque es cargado, y se hace un diagrama sobre su contenido y su posición relativa, el alambrado de la jaula es inclinado, tendiéndose sobre el tope, y 28 delgadísimas capas de concreto se colocan en la celda; se llenan todas las brechas entre tambor/capacitador.

El bloque está completamente sellado cuando se tapa totalmente la zanja de barro (arcilla).

## CAPITULO VIII

### PROCESAMIENTO DE LOS LODOS

**8.1 Introducción.** Los mejoramientos en el tratamiento de aguas residuales industriales, desafortunadamente, son acompañados frecuentemente por la producción en cantidades crecientes de lodos de cada vez más difícil manejo. Los lodos retirados de la sedimentación simple o primaria tienen como mucho un 97% de agua. Los lodos biológicos y muchos lodos químicos tienen los contenidos más altos de agua y son mucho más difíciles de desaguar que los lodos primarios. El costo combinado de manipulación y de eliminación de lodos municipales e industriales es frecuentemente mayor que el costo de tratamiento de la misma agua residual.

Aunque se usa un gran número de combinaciones alternativas de equipos y de procesos para el tratamiento de lodos, las alternativas básicas son bastante limitadas. El depositario definitivo de los materiales contenidos en el lodo debe ser la tierra, el aire, o el agua.

Hay dos enfoques filosóficos básicamente diferentes en el manejo de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales: el reutilizaje y la eliminación (desecho), los que son opuestos.

1. El enfoque del reutilizaje está basado en reciclaje de los lodos por lo que los nutrientes y los orgánicos contenidos en los lodos son reutilizados beneficiosamente. Éste es discutido en forma detallada en el capítulo de eliminación en tierra, Sección 7.2.. La meta del tratamiento de lodos en este caso está en hacer compatible al lodo con el sistema de reutilizaje propuesto (por ej., estabilizar al lodo para que no ocasione condiciones molestas, eliminar patógenos para prevenir problemas de enfermedades, degradar orgánicos tóxicos, etc.).
2. La filosofía de eliminación considera al lodo como un material de desecho. En algunos casos, tales como el vertido al océano, sólo un limitado pre-tratamiento del lodo se necesita previo a la eliminación. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de eliminación incorporan técnicas de tratamiento para proveer la máxima reducción en el volumen y/o de la masa del lodo previo a la eliminación, con poca o ninguna estima para los componentes potencialmente beneficiosos de lodo. La figura 6-25 resume las alternativas generales de manejo lodos.

Las tecnologías discutidas en esta sección incluyen acondicionamiento del lodo, digestión, compostura, espesado, y desaguado.

**NOTA:** Los lodos producidos en el procesamiento requieren de una eliminación cuidadosa, ya que ellos pueden contener grandes concentraciones de metales o de sustancias tóxicas precipitadas. Vea el Capítulo 7 para una discusión de tecnologías de eliminación.

### 8.2. Acondicionamiento

El propósito usual del acondicionamiento del lodo es aumentar el valor y/o el alcance del desaguado lográble para un lodo determinado. Una amplia variedad de técnicas químicas y físicas son usadas. El uso del acondicionamiento del lodo previo al desaguado ha llegado a ser una práctica estándar, y la combinación de acondicionamiento y de desaguado reduce el contenido de humedad del lodo desde una gama de 95 a 98% a una de 60 a 75 %. Las prácticas de acondicionamiento más frecuentemente requieren la adición de químicos. En un método se agrega el cloruro férrico sólo o en combinación con lima; mientras que en otro se agregan polielectrolitos orgánicos. La adición solamente de lima es bastante popular como acondicionador para el lodo primario crudo, y el cloruro férrico sólo se ha usado para acondicionar lodos biológicos. El tratamiento basado en lima se usa para altos valores de pH (12.0), y tiene la ventaja de proveer un importante grado de desinfección al lodo.

Los coagulantes poliméricos orgánicos y los coagulantes ayudadores son de tres tipos básicos:

1. Aniónicos (de carga negativa): sirven como ayudantes de coagulación complementando a los coagulantes inorgánicos  $Al^{+++}$  y  $Fe^{+++}$ , aumentando la tasa de floculación, tamaño, y dureza de las partículas.
2. Catiónicos (de carga positiva): sirven como coagulantes primarios o conjuntamente con coagulantes inorgánicos.
3. No iónicas (grupos de monómeros con cantidades iguales de cargas positivas y negativas): sirven como ayudantes de coagulación de una manera similar a los polielectrolitos aniónicos y catiónicos.

La popularidad de los polímeros es principalmente debida a su facilidad de manejo, pequeños requerimientos de espacio de almacenaje, y a su eficacia. Todos los coagulantes inorgánicos son difíciles de manejar y su naturaleza corrosiva pueden ocasionar problemas de mantenimiento en el almacenamiento, manejo, y alimentación, además de los riesgos inherentes de su manipulación. Muchas plantas en los EE.UU. han abandonado el uso de coagulantes inorgánicos en favor de los polímeros.

Las instalaciones para el acondicionamiento químico son relativamente simples y consisten en equipo para almacenar al químico(s), alimentar al químico(s) en dosis controladas, y mezclar al químico(s) con el lodo. El costo del acondicionamiento químico es primariamente una función de la cantidad de químicos requerida, la que es afectada por factores tales como:

1. La concentración de sólidos
2. El tamaño de partículas del lodo
3. La proporción de material volátil en el lodo
4. Agentes reductores en el lodo (por ej.,  $H_2S$ )
5. Alcalinidad

Los requerimientos de químicos para cualquier lodo determinado pueden determinarse exactamente sólo por pruebas sobre el lodo involucrados. Los valores típicos aparecen en la Tabla 6-22.

Los costos de químicos también varían ampliamente desde una localidad a otra. El costo típico de químico acondicionante en 1978 era de US\$11 a US\$28 por tonelada seca de sólidos.

La adición de químicos inorgánicos puede doblar el peso del lodo.

### **8.3. Digestión**

Los propósitos principales de la digestión orgánica del lodo, como método de estabilización, son para hacer al lodo menos putrescible, para reducir el contenido de patógenos, y para reducir la cantidad de lodo. Los procesos usualmente usados son: digestión anaeróbica y digestión aeróbica.

#### **a) Digestión anaeróbica**

En este proceso, la materia orgánica del lodo se estabiliza en un ambiente anaerobio (desprovisto de oxígeno). La mayoría de los sistemas modernos son de “alta velocidad” que utilizan una o dos etapas. Un proceso típico de dos etapas se muestra en la Figura 6-26. La estabilización del lodo ocurre en la primera etapa, unidad de mezcla y calentamiento, con la segunda etapa de digestión que provoca la sedimentación y el espesado. En un sistema de etapa única, el digestor secundario puede ser reemplazado por algún otro proceso de clarificación/espesamiento. El digestor es calentado a 29 - 35°C y con un tiempo de retención del lodo típico de 15 días o menos.

Las condiciones óptimas incluyen un pH entre 6.8 a 7.2 y ausencia de materiales tóxicos. El proceso ha tenido éxito cuando la alimentación del sistema ha consistido en el lodo primario o una combinación de lodo primario y limitadas cantidades de lodo activado residual o WAS (Waste Activated Sludge). Con el advenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales, que son más eficientes que la sedimentación simple, grandes cantidades de lodo activado se producen en las plantas. Este lodo adicional, cuando se pone en un proceso de digestión anaeróbica de dos etapas, puede ocasionar altos costos de operación y pobres eficiencias de planta. La causa básica del problema es que los sólidos adicionales no sedimentan ni desaguan fácilmente después de la digestión.

El proceso convierte cerca de un 50% de los sólidos orgánicos a formas gaseosas y líquidas, proveyendo una reducción considerable de la masa del lodo que requiere eliminación o disposición. Un componente importante en los subproductos gaseosos (comúnmente cerca de dos tercios) es el metano. El gas resultante tiene un valor típico de calor de 224 kJ/m<sup>3</sup> con cerca de 0.94 m<sup>3</sup> de gas formado por kilogramo de sólidos volátiles destruido.

El uso de digestores anaerobios se ha practicado con algún alcance en plantas de tratamiento de aguas residuales desde hace muchos años. Los criterios típicos de diseño son presentados en la Tabla 6-23.

Notar que la diferencia básica entre los sistemas convencionales y los de alta velocidad es su velocidad de carga. Las unidades de alta velocidad logran las cargas más altas porque su diseño incluye una temperatura uniforme y mayor capacidad de mezclado.

El efecto de la temperatura sobre el tiempo requerido para una digestión apropiada se muestra en la Tabla 6-24.

Un digestor anaerobio convencional o de baja velocidad típico podría diseñarse con cargas de sólidos de  $1.12 \text{ kgVSS/día/m}^3$  y un tiempo de retención de 50 días, mientras que un digestor de alta velocidad podría tener una carga de sólidos de  $4.4 \text{ kgVSS/día/m}^3$  y un tiempo de retención de 25 días.

La apropiada operación de un digestor requiere mantener una variación de temperatura menor de un grado por día, una producción altísima de gas, mantener la relación entre ácidos volátiles y alcalinidad entre 0.1 y 0.25 y una mantención del pH entre 6.8 y 7.2. Como un ejemplo, un valor de ácidos volátiles de 200 mg/l y una alcalinidad de 2,000 mg/l darían una relación entre ácidos volátiles y alcalinidad de 0.1. Pueden necesitarse medidas correctoras si este valor comienza a subir sobre 0.25 y acercándose a 0.35. Las fuentes potenciales de problemas incluyen ácidos volátiles, metales pesados, oxígeno, sulfuros y amoníaco. El amoníaco es un inhibidor a niveles de 1500 a 3000 mg/l y  $\text{pH} > 7.4$ , y es tóxico sobre los 3000 mg/l. Mientras era originalmente pensado que las concentraciones de ácidos volátiles sobre 2000 mg/l eran tóxicas, como se indicó más arriba, lo importante es la relación de ácidos volátiles a alcalinidad. La concentración de metal pesado soluble y total es frecuentemente muy diferente porque aniones tales como los carbonatos y los sulfuros pueden remover a los metales pesados desde la solución por precipitación y secuestro.

Consiguientemente, no es posible definir precisamente las concentraciones tóxicas totales para cualquier metal pesado. Sólo la fracción disuelta de metales ocasiona inhibición. La inhibición de la digestión anaeróbica ocurre a concentraciones solubles de aproximadamente 3 mg/l para el cromo, 2 mg/l para el níquel, 1 mg/l para el zinc y 0.5 mg/l para el cobre (Mosey 1976, DeWalle et al. 1979).

El gas del digestor se usa en las plantas de tratamiento de aguas residuales para calentar a los digestores y edificios y abastecer motores bombas, sopladores de aire y generadores eléctricos. Los criterios siguientes dan estimaciones para el gas y calor disponible desde digestión anaeróbica de un conjunto de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales:

	Lodo primario	Lodo Activado residual	Total
Gas producido, 1/m <sup>3</sup> desde tratamiento de aguas residuales	38.72	42.72	81.14
Calor disponible, kJ/m <sup>3</sup> desde tratamiento de aguas residuales	865.50	948.25	1813.70

Un esquema de un sistema típico para utilizar gas del digestor en un motor de combustión interna (IC) se muestra en la Figura 6-27. Como se indica en esta figura el motor podría acoplarse a un generador, soplador o bomba. La eficiencia típica de un motor IC es 36.4% (2750 kJ/MJ). La eficiencia típica de un motor IC más generador es 30% (4479 kJ/MJ). La energía eléctrica que puede generarse desde una digestión anaeróbica primaria y WAS puede abastecer cerca del 85% de la energía eléctrica requerida para una planta de lodo activado y también provee sobre el 50% del calor para el proceso de digestión.

El proceso también provee reducciones considerables de bacterias patogénicas (85-100%).

Las desventajas del proceso incluyen:

1. El control del proceso requiere considerable tiempo y pericia del operador para lograr la óptima reducción de sólidos y producción de gas.
2. Los sobrenadantes desde el proceso son frecuentemente altos en DBO, sólidos y amoníaco e imponen una carga agregada cuando se recircula al sistema de tratamiento de agua residual.

Los costos basados en tonelada seca en 1978 para una digestión anaeróbica de dos - etapas son:

Origen del lodo	Toneladas por día de sólidos secos al digestor			
	10	25	50	100
Primario	US\$ 19.10	US\$ 15.75	US\$ 14.50	US\$ 13.90
Primario + WAS	US\$ 47.55	US\$ 43.40	US\$ 43.00	US\$ 41.45

Ningún crédito para el valor de combustible del gas del digestor se refleja en la estimación de arriba. A un costo en 1978 de US\$2.84/1000 MJ, el valor del combustible era US\$16/tonelada de sólidos secos para la digestión primaria de lodo y US\$18.90/tonelada para el primario + WAS.

## **b) Digestión aerobia**

La digestión aerobia consiste en la aireación separada del lodo primario residual o del lodo biológico residual, o de una combinación de ambos en un tanque abierto. Es comúnmente usada para estabilizar excesos de lodos activados o excesos de lodos desde plantas pequeñas que no tienen clarificación primaria separada. La figura 6-28 es un diagrama esquemático de un sistema aerobio de digestión. Las ventajas que el sistema ofrece sobre la digestión anaeróbica incluyen: más simple de operar, menor costo de inversión, y mejor calidad de los sobrenadantes. Las desventajas son: más altos costos de operación, lodo de pobres características de desaguado, y consumo neto de energía mayor que la producción de energía.

La práctica actual es proveer más de 15 días de tiempo de retención para la estabilización del exceso de lodos biológicos. Se requiere de tiempo adicional cuando se incluye al lodo primario. Se han logrado reducciones de sólidos volátiles de 35 a 50%. Además cerca de 2 g de oxígeno se requieren por g de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura del líquido es 45°C o menos. Una concentración de oxígeno disuelto de 1.0 mg/l debería mantenerse en todo momento.

La Figura 6-29 resume bien los resultados de varios estudios a escala de planta y piloto. Esto claramente muestra la importancia de la “edad” del lodo y de la temperatura. La “edad” del lodo puede operacionalmente definirse como la masa total de sólidos en el sistema de tratamiento dividida por la cantidad de sólidos retirados diariamente. En un digestor sin reciclo, la edad del lodo es equivalente al tiempo de retención hidráulico. Esta figura es muy útil para el diseño. Muestra, por ejemplo, que con una temperatura del líquido de 20°C y una edad del lodo de 40 días un 40% de reducción de sólidos volátiles puede ser esperada.

La Tabla 6-25 presenta los costos calculados en 1978 para la digestión aerobia de una combinación de lodos activados primarios + residuales (exclusivos de la separación de sólidos y/o espesado). Los costos de inversión son significativamente menores que los de una digestión anaeróbica en dos etapas. Esto es parcialmente porque el tiempo de detención total del lodo se supuso como un tercio del de la digestión anaeróbica en dos etapas. El tiempo de detención requerido para lograr el mismo nivel de destrucción de sólidos como en una digestión anaeróbica puede realmente ser dos veces el de las digestiones anaeróbicas. Los costos O & M son significativamente más altos para el proceso aerobio debido al consumo de potencia. A fin de comparar adecuadamente estos dos sistemas, diferencias en el espesamiento, los costos de tratamiento del desaguado y sobrenadante deben agregarse a cada uno de los costos del sistema de digestión.

## **3. Compostaje**

El compostaje es un método para la oxidación biológica de material orgánico del lodo bajo condiciones que permiten la producción biológica de calor. El compostaje, adecuadamente efectuado, desagua al lodo, destruye los elementos del lodo capaces de producir olor, destruye

o reduce los organismos que producen enfermedades, todo esto cuando se opera a temperaturas elevadas (45 a 75°C) y produce un producto orgánico estético y útil. El compostado, producto final, contiene nitrógeno disponible, pero su valor importante es su capacidad de sostención de la humedad, lo que lo hace un óptimo aditivo del suelo. La mezcla suelo/compostado es más trabajable y permite una penetración más fácil de la raíz.

El compostaje del lodo proveniente de agua residual difiere del procesamiento y compostaje de residuos sólidos. Algunas de estas diferencias son:

- El compostaje de residuos sólidos es frecuentemente precedido por un complejo proceso de separación y manipulación de materiales.
- El residuo sólido varía ampliamente en composición lo que hace al proceso más difícil.
- Muchas operaciones de compostaje de residuos sólidos en el pasado fueron operadas y evaluadas en base a una potencial ganancia más que como medios alternativos de eliminación.
- Para una población determinada, el volumen de residuo sólido compostado es varias veces el volumen de lodo compostado del agua residual. Por lo tanto, el residuo sólido crea un gran mercado o tarea de eliminación.

El método general de compostaje es muy similar para todos los procesos. Se muestra esquemáticamente en la Figura 6-30. Las consideraciones ambientales importantes incluyen humedad, temperatura, pH, concentración y disponibilidad de nutrientes y concentración de oxígeno. El lodo desaguado (típicamente 20% de sólidos) se envía al sitio y mezclado con un agente aumentante de volumen. El propósito del agente aumentante de volumen es aumentar la porosidad del lodo y así asegurar las condiciones aerobias durante el compostaje. Si el material compostado es demasiado denso o está mojado, puede llegar a producir anaerobiosis y así producir olores. El contenido óptimo de humedad de la mezcla compostada está en el rango de 40 a 50%. Si es demasiado poroso la temperatura del material permanecerá baja. Las temperaturas bajas demoran la terminación del compostaje y reducen la muerte de organismos patógenos.

Diversos materiales para aumentar el tamaño pueden usarse, y los materiales convenientes de bajo costo incluyen astillas de madera, astillas de corteza, la corteza del arroz, neumáticos desmenuzados y residuos sólidos en cubos. También se usó compostado no totalmente terminado. Generalmente, una parte del lodo conteniendo un 20% de concentración de sólidos se mezcla con tres partes de agentes aumentadores de volumen, aunque esta mezcla puede variarse dependiendo del contenido de humedad del lodo, tipo de agente aumentador de volumen, y condiciones locales. La mezcla lodo-agente aumentador de volumen se forma entonces en la “windrow” o pila estática, y los microorganismos cultivados allí en un ambiente controlado proceden a reducir al material orgánico biodegradable.

Siguiendo con el compostaje, el producto es removido desde el “windrow” o pila estática y curado en pilas de almacenamiento por 30 días o más. Este curado provee una estabilización adicional y destrucción de patógenos. Con anterioridad o siguiendo al curado, el

compostado debe resguardarse para remover una parte de los agentes aumentadores de volumen para el reusado o para aplicaciones que requieren de un producto más fino. El compostado puede también ser usado sin resguardar. La remoción de los agentes aumentadores de volumen reduce la dilución de los nutrientes del compostado. El compostado se prepara entonces para su distribución.

El pH es un factor en todos los procesos biológicos. Altos y bajos pH's reducen la actividad microbiana. Es bueno mantener al proceso en un rango cerca de pH neutro. Otro factor ambiental importante es la concentración de nutrientes requerida para los microorganismos de compostaje. Una medida básica de este requerimiento es la relación carbón-nitrógeno. La relación C/N óptima para el compostaje es de 20 a 25 partes de carbón por 1 parte de nitrógeno. El factor ambiental final de interés es el nivel de oxígeno en la masa compostada. El oxígeno es esencial para la actividad aerobia que tiene lugar en la pila compostada, y son generalmente necesarias concentraciones de oxígeno en la atmósfera dentro del compostado del orden de 5 a 15 por ciento.

Los sistemas de compostado generalmente caen en tres categorías:

1. "Windrow"
2. Pila estática ventilada
3. Sistemas encerrados o mecanizados

Los "windrow" y los sistemas de pila estática ventilada se han usado casi exclusivamente en el compostaje de lodo de alcantarillado a causa de su bajo costo y demostrado desempeño. Ellos se discuten en forma detallada más adelante.

Los sistemas encerrados o mecanizados han tenido un uso limitado en los EE.UU., pero varios sistemas operan en Europa con el lodo de alcantarillado. Estos sistemas ofrecen ventajas ciertas sobre los procesos naturales. Ellos están encerrados dentro de un recipiente o reactor, por lo que los factores ambientales no los afectan. Estos procesos requieren poco terreno, pueden producir los contenidos más altos de sólidos de cualquier proceso y son los más flexibles con respecto al control de olores y al control operacional. Sin embargo, ellos tienen desventajas ciertas. Las instalaciones tienen los mayores costos, dado que la construcción de los recipientes y del equipo necesario resulta en un alto gasto de capital. Y, siendo de naturaleza mecánica, las instalaciones tienen altos costos de mantenimiento y usan más energía. Estos sistemas no se discutirán más detalladamente.

#### **a) Compostaje "windrow"**

El compostaje "windrow" es el proceso más viejo usado exclusivamente para lodos. El "windrow" consiste en largas filas de lodo mezclado con un agente aumentador de volumen, frecuentemente lodo previamente compostado. La mezcla de lodo-agente aumentador de volumen debe ser completamente mezclada para asegurar un apropiado compostaje. El oxígeno

es proporcionado a los microorganismos mediante una aireación natural y un periódico volteado del “windrow”.

La mezcla lodo-agente aumentador de volumen (normalmente 3 partes de agente aumentador de volumen por una parte de lodo) es la diseminación en “windrows” con una sección transversal triangular. Los “windrows” tienen normalmente de 3 a 4.9 m de ancho en la base, 1 m de ancho en la cima y de 0.9 a 1.5 m de alto. Un método alternativo para mezclar al agente aumentador de volumen con el lodo para formar el “windrow” consiste en colocar al agente aumentador de volumen como una base para el “windrow”. El lodo se descarga entonces en lo alto del agente aumentador de volumen y se disemina. Una máquina de compostaje (parecida a una gran “rototiller”) mezcla al lodo y al agente aumentador de volumen y forma la mezcla en un “windrow”. Sobre 8 a 10 vueltas de la pila son necesarias para mezclar adecuadamente a los dos materiales.

El “windrow” es normalmente volteado diariamente usando el compostador; sin embargo, durante períodos lluviosos el volteado se suspende hasta que las capas superficiales del “windrow” se sequen. Las temperaturas en el interior del “windrow” bajo apropiadas condiciones de compostaje van desde 55 a 65°C. El volteo mueve el material superficial al centro del “windrow” para una exposición a temperaturas más altas. Las temperaturas más altas se necesitan para la pasteurización y la muerte de muchos agentes patógenos. El volteo también ayuda al secado y aumenta la porosidad para un mayor movimiento y distribución del aire.

Los “windrows” se voltean por un periodo de dos semanas o más dependiendo del clima y de la eficiencia de compostaje. El compostado “windrow” es entonces aplanado para un secado adicional. El compostado se mueve para el curado cuando el contenido de humedad ha disminuido a aproximadamente 30 a 40 por ciento. Un apropiado compostaje “windrow” debe producir un producto relativamente estable con un contenido de humedad de un 30 a un 40% y tiene que haber sido expuesto a temperaturas de por lo menos 50°C por un lapso de tiempo durante el proceso de compostaje.

El proceso de compostaje requiere de una retención más larga en climas lluviosos o fríos, por lo tanto, el clima es un factor importante en el proceso “windrow” en espacios abiertos. Cubrir el área de compostaje puede reducir significativamente los efectos de un clima frío y aproximadamente eliminar los problemas de climas lluviosos. De todos modos, el área de curado debería cubrirse si las operaciones serán efectuadas durante períodos de precipitaciones.

## **b) Compostaje en pilas estáticas**

El método de pila compostaje en pila estática (Epstein et al. 1976) es aplicado al lodo crudo que requiere de un sistema forzado de aireación para el control del proceso. La pila entonces permanece fija, a diferencia de el constante volteo del “windrow”, y un sistema de aireación

forzada mantiene condiciones aerobias forzando al aire o sacando aire de la pila por medios mecánicos.

Una base es preparada para la pila y consiste en una capa gruesa de 0.3 m de agente aumentador de volumen o producto compostado previamente. Un tubo perforado de 0.1 m de diámetro se instala en la base como una cabecera de aireación. Las pilas son generalmente de sección transversal triangular, de 4.5 a 7.5 m en la base, 3 m de altura y 12 a 15 m de longitud. La mezcla de lodo-agente aumentador de volumen se acumula sobre esta base hasta una altura de aproximadamente 3 m formando una sección transversal triangular. Generalmente una relación de 2:1 o 3:1 de agente aumentador de volumen a lodo desaguado se usa para absorber la humedad y para dar porosidad a la pila de compostaje. La pila se cubre con una capa de 0.3 m de producto compostado. Esta capa se extiende por los lados para ayudar a absorber olores y para actuar como un escudo contra la penetración de la precipitación. Una pila estática típica se ilustra en la Figura 6-31. Una configuración alternativa es el método de pila estática extendida, donde subsiguientes pilas son agregadas a la pila estática inicial. Esta configuración ahorra espacio comparada con el número de pilas estáticas separadas.

La parte inferior del tubo perforado se une a un soplador por cañerías y fittings. El otro lado del soplador se entuba a una pila, de menor tamaño, adyacente de 1.3 m de altura y 2.7 m de ancho. El aire y los gases son sacados por el soplador desde la pila de compostaje estática y descargados mediante la pila pequeña de producto de compostaje. La pila pequeña efectivamente absorbe los olores. El ciclo operativo del soplador se ajusta para mantener los niveles de oxígeno de los gases de salida y de la pila de compostaje dentro de un rango de 5 a 15%. Las temperaturas dentro de la pila de compostaje variarán algo con el monitoreo, pero deberían alcanzar los 60 a 65°C. Normalmente el soplador se opera en un ciclo on-off para mantener apropiados niveles de oxígeno y temperaturas dentro de la pila.

Después de un período promedio de compostaje de 3 semanas, el compostado se mueve hacia el área de curado.

Temperaturas externas como - 7°C y una precipitación total de 0.2 m por semana no interfieren con una operación externa exitosa de la pila estática de compostaje expuesta. Las temperaturas producidas durante el compostaje de la pila estática son generalmente sobre 55°C y frecuentemente exceden los 70 a 80°C.

El producto compostado tiene un pequeño olor mohoso, es húmedo, de color oscuro, y puede ser abultado. La textura del compostado varía dependiendo de el grado de resguardo. El compostado es valioso como un acondicionador de suelo y un fertilizador de bajo nivel y varía ampliamente en su contenido. Un compostado típico contiene un promedio de 1.5% de nitrógeno y 1.0% de fósforo. Una apropiada pila estática de compostaje debería reducir los coliformes totales y fecales y a las salmonella bajo límites detectables. El compostado producido por el proceso "windrow" probablemente contiene patógenos perceptibles porque trabaja a temperaturas menores. El compostaje tiene poco efecto sobre el contenido total de metales pesados del lodo,

pero hay alguna dilución y también algún indicio de una captación más baja después del compostaje.

## **Economía**

La economía del compostaje está determinada por dos factores:

1. El costo de producir el compostado, y
2. El costo de (o ingreso desde la) eliminación del producto compostado.

La comercialización del producto final es la clave del éxito del esfuerzo del compostaje. Un estudio de mercado encontró varias operaciones exitosas de compostaje de lodo municipal, donde todo el producto final fue vendido o usado exitosamente de otra manera. El estudio concluyó que el precio superior límite para el compostado del lodo de alcantarillado con volumen aumentado en 1978 era de US\$4 a 11 por tonelada; y para el compostado del lodo de alcantarillado envasado y en bultos de US\$66 por tonelada. Los costos de poner en bultos podrían acercarse a US\$33 por tonelada.

Estas operaciones comerciales de compostaje de lodo municipal han tenido éxito generalmente por:

- Tener publicidad local favorable
- Tener el producto disponible para carga (o hacer entregas)
- Ofrecer manuales para su uso, o por lo menos sugerencias
- Ofrecer el producto sin costo o barato
- Dar al producto un nombre comercial

El costo de producir compostado incluye los siguientes elementos:

1. Amortización del terreno, inversión de capital y estructuras,
2. Amortización de los costos de equipos móviles importantes, y
3. Costos de mantenimiento y operación.

Los requerimientos de terreno son afectados por varios factores pero son típicamente de 0.1 a 0.2 hectáreas por tonelada seca para la técnica de pila estática. Las técnicas de “windrow” requieren de 2 a 3 veces más área.

Los requerimientos de inversión del sitio y estructuras varían dependiendo del proceso usado, disponibilidad de instalaciones existentes, grado de mecanización del proceso, y de las demandas de la región climática. La inversión del sitio relativo al compostaje incluirán generalmente accesos al sitio y mejoramientos, almacenaje del agente aumentador de volumen, área de mezclado del agente aumentador de volumen con el lodo o equipo mecánico fijo, rellenos de compostaje y

pertenencias tales como sopladores, área de selección, área de almacenaje del compostado, servicios a las instalaciones tales como eléctricos, y equipo de manejo de materiales fijos.

El equipo móvil importante incluye pantallas, cargadores frontales, camiones, y equipo de testeo. El número y el tamaño de éste equipo importante dependerá de la capacidad y del tipo de operación. Los costos de mantenimiento y operación normalmente incluyen:

- Trabajo de construcción de las pilas de compostaje, materiales de manipulación, y resguardando del compostado
- Labor de una inspección regular a las operaciones y pruebas de desempeñando a las pilas
- Energía eléctrica para los sopladores, iluminación, y otros usos diversos
- Costo O & M para el equipo que incluye al cargador frontal y a la pantalla
- Costos de transporte de materiales
- Costo del agente aumentador de volumen, típicamente de US\$3 a US\$5 por metro cúbico en 1978.

Esto por supuesto puede ser reducido si un material empleado está siendo desechado como un producto residual.

Las Tablas 6-26 y 6-27 dan datos reales económicos y operacionales para pilas estáticas e instalaciones “windrow” pequeñas (< 0.9 m secos/día) y medias (1.8 a 8.2 m secos/día) a partir de 1983. Como estas tablas demuestran, los costos de capital y de mantención y operación varían considerablemente desde una instalación a otra dentro de cada categoría. Estas variaciones se deben a varios factores tales como el método de cálculo costo usado, la inclusión de costos de desaguado, la inclusión de costos de transporte a otras locaciones, amortización, y consideraciones locales. Debido a estas variaciones, es esencial que cada comunidad haga su propia estimación de costos.

### **8.3 Espesado**

El propósito del espesamiento de lodo está en reducir el volumen de lodo para ser estabilizado, desaguado o dispuesto, la figura 6-32 ilustra el impacto que el espesado puede tener sobre el volumen de lodo. El espesado a un 1% de la concentración de sólidos en el lodo a uno de 6% reduce el volumen de lodo a ser manejado por un factor de 5. Esta reducción puede proveer ahorros importantes en el costo del desaguado, digestión, u otras instalaciones río abajo. Hay tres métodos usualmente usados para el espesado de lodo: gravedad, flotación, y centrifugación.

#### **a) Espesado por gravedad**

El espesado por gravedad es el proceso de concentración más común en el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales. Es simple y barato. El espesado por gravedad es

esencialmente un proceso de sedimentación. Pero, en comparación con la etapa inicial de aclaración de residuos, la acción de espesado es relativamente lenta. Los aspectos teóricos de el espesado por gravedad ha sido el tema de muchos estudios y puede ser resumido en varios paper's (Dick y Ewing 1967; Edde y Eckenfelder 1968; y Fitch 1971).

La figura 6-33 ilustra un típico espesador por gravedad, circular. Las unidades tienen una profundidad típica de agua de 3 metros. La velocidad de carga se expresa en términos de kilogramos de sólidos secos en el lodo aplicado al área superficial por día del espesador ( $\text{kg / día/ m}^2$ ) o por hora ( $\text{kg / h / m}^2$ ).

El grado al que los lodos residuales pueden espesarse depende de muchos factores; entre los más importantes son el tipo de lodo a ser espesado y su concentración volátil de sólidos. El lodo biológico abultado, particularmente del proceso activado de lodo, no concentrará al mismo grado. Los lodos activados, espesados separadamente, son espesados comúnmente por el proceso de flotación. El grado de tratamiento biológico y la razón de lodo primario a secundario (biológico), afectará la concentración definitiva de sólidos obtenida con el espesador por gravedad. La hidráulica y la velocidad de la superficie de carga son también de importancia. La hidráulica máxima típica de velocidad de carga es de 1200 a 1600 ( $\text{l / m}^2 / \text{h}$ ) la que ha sido principalmente usada en el pasado para lodos primarios. Para lodos tal como residuos-activados o tipos similares, la carga hidráulica es menor, de 200 a 400 ( $\text{l / m}^2 / \text{hr}$ ) son aplicables. La carga de corriente excesivamente baja puede conducir a problemas de olor. Si el flujo de lodo al espesador está muy por debajo al valor de diseño, el bombeo del efluente secundario a los espesadores puede ser práctico para minimizar olores.

La calidad del líquido superior removido desde los lodos sólidos es importante en cualquier operación de espesamiento porque este líquido es comúnmente retornado a los procesos de tratamiento. Un buen espesador debe tener un mínimo de descomposición anaeróbica y los sólidos capturar el 90% excedente. Así, el desborde retornado al proceso de tratamiento no debería presentar un problema operacional.

La tabla 6-29 resume los costos estimados en 1978 de un espesador por gravedad con base en un valor de carga de 4.1 ( $\text{kg / m}^2 / \text{h}$ ). El consumo eléctrico del proceso es bajo, en el orden de 1-1.7 ( $\text{kwh / ton. de sólidos}$ ).

**Tabla 6-29. Costos de espesamiento por gravedad**

Item	Toneladas por día de sólido seco			
	10	25	50	100
Costo construcción	120000	160000	320000	540000
Estudios de ingeniería	22800	30400	60800	102600
<u>Total costo de capital</u>	<u>142800</u>	<u>190400</u>	<u>380800</u>	<u>642600</u>
Mano de obra (\$8/ h)	3600	4400	6000	10000
Energía (\$0.025/kwh)	100	300	500	800
<u>Mantenimiento material</u>	<u>400</u>	<u>700</u>	<u>1300</u>	<u>2200</u>
Costo m.o. anual	4100	5400	7800	13000

<u>Costo anual capital</u>	<u>13500</u>	<u>18000</u>	<u>36000</u>	<u>60700</u>
Costo total anual	17600	23400	43800	73700
<b>Costo por tonelada de sólido seco</b>	<b>4.8</b>	<b>2.6</b>	<b>2.4</b>	<b>2.0</b>

### b) Espesado por flotacion por disolución de aire

El espesamiento por flotación son unidades especialmente populares en las plantas de tratamiento para manejar residuos de lodos activados. Allí ellos tienen la ventaja sobre los tanques de espesamiento por gravedad de sólidos, tienen más altas concentraciones y un costo inicial más bajo para el equipo. En la flotación, las burbujas de aire son adjuntas a sólidos suspendidos que ocasionan que los sólidos se separen del agua en una dirección ascendente. Esta separación se debe al hecho que las partículas de sólido tienen una gravedad específica más baja que el agua cuando las burbujas son adjuntadas.

La figura 6-34 ilustra las consideraciones básicas involucradas en el proceso. Una porción del efluente de la unidad, o el efluente de la planta, se bombea al tanque de retención (un tanque de presurización) a 4.1-4.8 (kg / cm<sup>2</sup>). El flujo a través del sistema de reciclo se mide y controlada por una válvula ubicada inmediatamente antes del mezclado con la alimentación del lodo. El flujo del reciclo y la alimentación de lodo se mezclan en una cámara de la unidad. Las partículas de lodo flotan hacia la manta de lodo y el efluente clarificado se despiden bajo un deflector, sobre un ajustable desborde. El lodo espesado es quitado a una velocidad variable. El lodo espesado sube a la manta de lodo, que es normalmente 20 a 61 cm de gruesa. Las burbujas de aire y lodo fuerzan la superficie del manto hacia arriba del nivel de agua, induciendo drenaje de agua desde las partículas de lodo.

Parecido al espesado por gravedad, el tipo de lodo y la calidad afecta el desempeño de la unidad. El espesamiento por flotación es muy aplicable a lodos activados pero concentraciones más altas pueden ser logradas por lodos combinatorios entre primarios y activados. Sin embargo, concentraciones mayores o iguales pueden ser logradas por lodos combinados en unidades de espesamiento por gravedad. Un alto índice de volumen de lodo (SVI), representa un lodo abultado, el cual resulta en un pobre desempeño de espesado. La tabla 6-30 presenta resultados típicos del proceso de flotación. Como puede verse desde los datos los polielectrolitos químicos se usan frecuentemente en el proceso. El efecto total está en aumentar los sólidos permisibles cargados, aumentando así el porcentaje de sólidos flotados, y aumentando la claridad del efluente. Polieléctrolitos catiónicos ha sido el mas exitoso.

**Tabla 6-30. Resultados típicos del espesado por flotación**

TIPO DE LODO	Concentración de sólidos alimentados (%)	Velocidad de carga típica sin polimeros (lb/ft <sup>2</sup> /d)	Velocidad de carga típica con polimeros (lb/ft <sup>2</sup> /d)	Concentración de sólidos <i>float</i> (%)
--------------	--	---	---	---

Primario + WAS	2.0	20	60	5.5
Primario + (WAS + FeCl <sub>3</sub> )	1.5	15	45	3.5
(Primario + FeCl <sub>3</sub> ) + WAS	1.8	15	45	4.0
WAS	1.0	10	30	3.0
WAS + FeCl <sub>3</sub>	1.0	10	30	2.5
Digestión primaria +WAS	4.0	20	60	10
Digestión primaria +(WAS + FeCl <sub>3</sub> )	4.0	15	45	8.0
Aluminio terciario	1.0	8	24	2.0

Las cargas de los típicos diseños para las unidades de flotación de sólidos se dan en la tabla 6-31, la cual también muestra el efecto de los sólidos cargados sobre el tipo de lodo (USEPA 1979). La máxima carga hidráulica debe siempre ser menor que el mínimo valor de subida del lodo / partículas de aire para asegurar que todas las partículas alcanzarán la flotación del lodo antes de que éstas alcancen el fin del tanque. Los valores reportados van desde 0.54 a 2.7 (l / min / m<sup>2</sup>) con un valor máximo de 1.7 (l / sec / m<sup>2</sup>) recomendado para residuos de lodo activado.

**Tabla 6-31. Espesador típico (DAF) con velocidad de carga necesaria para producir un mínimo en concentración de 4% de sólidos**

Tipo de lodo	Velocidad de carga de lodos (lb / ft <sup>2</sup> / h)	
	Sin adición química	Óptima adición química
Primario	0.83 - 1.25	sobre 2.5
Residuo de lodo act. (WAS)		
Aire	0.42	sobre 2.0
Oxígeno	0.6 - 0.8	sobre 2.2
Filtro espesador	0.6 - 0.8	sobre 2.0
Primario + WAS (aire)	0.6 - 1.25	sobre 2.0
Primario+filtro espesador	0.83 - 1.25	sobre 2.5

La tabla 6-32 presenta costos típicos de 1978 para un espesador por flotación cuyo valor de carga es de 8.2 (kg / m<sup>2</sup> / h), no incluyen costos químicos ni de alimentación. Los costos de polímeros podrían agregar desde \$1 a \$17 por tonelada de sólidos. El consumo eléctrico está sobre 110 (kWh / tonelada de sólidos).

**Tabla 6-32. Costos de espesado por flotación**

**Por tonelada de sólido seco**

<b>Item</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Costo construcción	200000	290000	380000	500000
Estudios de ingeniería	38000	55100	72200	95000
<u>Total costo de capital</u>	<u>238000</u>	<u>345100</u>	<u>452200</u>	<u>595000</u>
Mano de obra (\$8/ h)	9600	22400	44800	89600
Energía (\$0.025/kWh)	10000	20000	40000	75000
<u>Mantenimiento material</u>	<u>200</u>	<u>300</u>	<u>500</u>	<u>1000</u>
Costo m.o. Anual	19800	42700	85300	165600
<u>Costo anual capital</u>	<u>22500</u>	<u>32600</u>	<u>42700</u>	<u>56200</u>
Costo total anual	42300	75300	128000	221800
<b>Costo por tonelada de sólido seco</b>	<b>11.6</b>	<b>8.3</b>	<b>7.0</b>	<b>6.1</b>

**c) Espesado por centrifugación**

Aunque la centrifugación ha sido usada ampliamente para desaguar, ha tenido menos uso para espesar. Se ha usado para espesar WAS donde las limitaciones de espacio o las características de lodo lo hacen un método insustituible. Las concentraciones de WAS de 5-8% son producidos típicamente por un tipo de centrífuga decantadora bajo las siguientes condiciones:

Modo de operación	Continua
Alimentación de sólidos (WAS)	0.5 - 1.5%
Espesado de sólidos (WAS)	5.0 - 8.0
Recuperación	85 - 95
Dosis de polímero	0 - 3 kg/ton.

**Desaguado**

**a) Lechos de secado**

Un método ampliamente usado es el desaguado, el cual es especialmente popular en pequeñas plantas de tratamiento, donde lechos de secado son usados para secar lodos. Sobre 6000 plantas de tratamiento en los Estados Unidos usan este método. Los lechos de secado poseen la ventaja de necesitar poca habilidad del operador. El secado con aire se restringe normalmente al lodo bien digerido, porque el lodo crudo es oloroso, atrae los insectos, y no seca

satisfactoriamente cuando se aplica en profundidades razonables. El diseño y el uso de lechos secadores son afectados por muchos parámetros. Ellos incluyen condiciones del tiempo, características del lodo, proximidad de residencias. Las condiciones climáticas son muy importantes. Factores tal como la cantidad de precipitaciones, porcentaje de sol, la temperatura del aire, humedad relativa, y la velocidad del viento determinan la eficacia del aire de secado. Es importante que el lodo sea bien digerido para un óptimo secado. En el lodo digerido, se extraen los gases, los sólidos tienden a flotar en el lodo y sale una capa de líquido relativamente clara, la cual puede desaguar fácilmente mediante la arena. Los criterios típicos de diseño se dan más adelante, y un resumen de guía publicada aparece en la tabla 6-33.

Comúnmente una capa profunda de arena se coloca sobre la grava que es de 20-45 cm de profundidad. Este filtro de grava de arena está bajo tubos para desaguar fuera el licor aclarado desde el lodo. El lodo estable digerido se aplica entonces al lecho en una profundidad de 20-30 cm, y el lodo es drenado y secado por varias semanas o meses dependiendo de el tiempo. El tiempo especialmente adverso puede resultar en tiempos de secado tan largos como 6 meses.

La buena ventilación es importante para controlar humedad y perfeccionar el valor de evaporación. Se espera, que la evaporación ocurra rápidamente en tiempo seco cálido. La adaptación del equipo mecánico removedor de lodo, es más difícil para abrir lechos secadores.

La remoción mecánica de lodo desde lechos secadores se ha practicado desde hace muchos años en algunas plantas grandes de tratamiento, pero ahora recibe más atención la necesidad de minimizar problemas con costos de trabajo.

Una desventaja importante en las plantas más grandes en sistemas regionales es el espacio requerido. Para una planta de lodo activo de  $0.4 \text{ (m}^3 / \text{s)}$ , sobre 4.5 (ha) de lechos secadores se requerirían para una digestión primaria y los residuos de lodo activo en un valor de carga de  $73 \text{ (kg / m}^2 / \text{a)}$ . Los requerimientos de espacio más la dependencia de factores incontrolables de tiempo son restricciones severas en el uso de lechos de secado en plantas regionales grandes. Los datos de costo disponible para lechos secadores grandes (adecuados para  $0.44\text{-}1.10 \text{ (m}^3 / \text{s)}$  de plantas de lodo activo) en 1978 proyectó unos costos totales de \$77-99 por tonelada de sólidos secos.

## **b) Filtración al vacío**

Un filtro de vacío básicamente consiste de un tambor cilíndrico (fig. 6-35) que rota parcialmente sumergido en una cuba de lodo. El tambor de filtro se divide en compartimientos por fajas de sello o particiones. Un vacío se aplica entre el filtro y la cubierta de tambor que ocasiona que el filtrado sea extraído. En el filtro de tambor mostrado en la figura 6-34, la torta de lodo desagüado es quitada por una cuchilla fija de rascador. Hay también diseños alternativos que usan otros métodos para la remoción de lodos.

El desempeño de los filtros de vacío pueden ser medidos por diversos criterios tal como el rendimiento, la eficiencia de remoción de sólidos y las características de torta. Cada uno de estos criterios es de importancia, pero el uno o el otro pueden ser particularmente importante en una planta determinada. Los resultados típicos se muestran en la tabla 6-34.

El rendimiento es la medida más común de desempeño del filtro. El rendimiento expresa el rendimiento de filtro y se expresa desde el punto de vista de kilogramos de sólidos totales secos en la torta despedido desde el filtro, por metro cuadrado de la área efectiva de filtro por hora.

La segunda medida de desempeño de filtro es la eficiencia de remoción de sólidos. Básicamente, el filtro de vacío es un dispositivo usado para la separación de materia sólida desde el líquido, y la eficiencia real del proceso es el porcentaje de los sólidos de alimentación recuperados en la torta filtrada. Las remoción de sólidos en filtros de vacío se extienden desde 85%-99%. Los sólidos filtrados recirculados imponen una carga sobre las unidades de tratamiento de planta, y deberían prácticamente reducirse al mínimo. Sin embargo, puede ser necesario para reducir la eficiencia de filtro a fin de entregar más rendimiento de filtro y así mantener la producción de lodo.

La calidad de la torta es otra medida de el desempeño del filtro, dependiendo de el calor y humedad de la torta. El contenido de sólidos en la torta varía desde 20 a 40% en peso, dependiendo de el tipo de lodo, sumersión en el filtro y tiempo de ciclo. La entrega de una torta muy seca no indica necesariamente un buen desempeño del filtro. La humedad de la torta debería ajustarse al método de eliminación final, y es ineficiente para secar la torta más de lo que se requiere.

Los costos ilustrativos basados en un promedio de valor de carga de 20 (kg / m<sup>2</sup>/h) se muestran en la tabla 6-35. El consumo eléctrico típico es 44-66 (kWh / ton. de sólidos).

**Tabla 6-35. Costos estimados para desaguado por filtración al vacío**

<b>Item</b>	<b>Ton. por día de sólido seco</b>			
	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Costo construcción	270000	470000	780000	1400000
Estudios de ingeniería	51300	89300	148200	266000
<u>Total costo de capital</u>	<u>321300</u>	<u>559300</u>	<u>928200</u>	<u>1666000</u>
Operaciones (\$10/ h)	47000	90000	160000	270000
Mantenimiento (\$10/ h)	8000	17000	28000	51000
Mantenimiento mat.químico	46000	100000	180000	310000
Mantenimiento otros mat.	24000	45000	72000	120000
Costo m.o. anual	125000	252000	440000	751000

<u>Costo anual capital</u>	<u>30000</u>	<u>52800</u>	<u>37600</u>	<u>157300</u>
Costo total anual	155300	304800	477600	908300
<b>Costo por tonelada de sólido seco</b>	<b>42.6</b>	<b>33.4</b>	<b>26.2</b>	<b>24.9</b>

### c) Centrifugación

Hay muchos tipos de equipos de centrifugación disponibles para una variedad de aplicaciones especializadas en la industria. Sin embargo, la centrífuga es el tipo más ampliamente usado para el desaguado de lodos. La centrífuga mostrado en la figura 6-36 consiste de una unidad que rota que comprende de una escudilla y un transportador. El sólido cilíndrico - la escudilla cónica, o la carcasa, se apoya entre dos conjuntos de bolas e incluye una sección cónica con el fin de formar una playa de drenaje sobre el tornillo helicoidal, el transportador empuja los sólidos de lodo a la salida los puertos y entonces el lodo se incrusta en una tolva de descarga. El lodo de encima entra rotando a la escudilla mediante un tubo estacionario de alimentación que se extiende en el eje hueco del transportador rotador de tornillo y se distribuye mediante puertos en una piscina dentro de la escudilla rotadora.

Como el lodo líquido fluye por la sección cilíndrica hacia los dispositivos de desborde, los sólidos progresivamente más finos se radican por centrifugación a la pared de la escudilla. El transportador helicoidal rotando empuja los sólidos a la sección cónica donde los sólidos se fuerzan fuera del agua, y la agua libre desagua desde los sólidos hacia la piscina.

Hay varias variables que afectan el desempeño de la centrífuga de escudo sólido, y estos se muestran más adelante. Varios de ellos son prefijados por el fabricante, y algunos pueden ser controlados por el operador. La velocidad de escudilla es uno de las variables primarias de la fuerza centrífuga, para la separación de sólidos desde líquidos.

- Diámetro de escudilla
- Longitud de escudilla
- Velocidad giratoria de bolea
- Vara angular
- Profundidad de piscina
- Punto de alimentación de fango
- Punto de alimentación de químicos
- Condición de cuchillas

En cualquier profundidad determinada de piscina, un aumento en la velocidad de escudilla provee más gravedad, proveyendo una mayor aclaración. Típicos valores de G para una escudilla sólida desde hace muchos años estaban sobre 3000. En años recientes, las unidades que operan en 700 G se han desarrollado. Estas bajas velocidades proveen resultados comparables con un consumo menor de poder. La introducción de polímeros, ha aumentado la gama de materiales que pueden ser desaguados satisfactoriamente por centrifugación. El grado de recuperación de

sólidos puede regularse sobre gamas más bien amplias que dependen de la cantidad de coagulación química usada. Un aumento en la velocidad de escudilla disminuirá a veces el requerimiento de polímeros, la recuperación de sólidos produce una torta más seca. La escudilla no debería operarse a una alta velocidad ya que aumenta el costo de mano de obra.

Aunque la profundidad de la piscina sea variable sobre el sólido - la centrifuga de escudilla puede requerir varias horas de trabajo para el desborde. Como tal, no es un método popular de control operacional. La profundidad de piscina regula tanto la calidad de aclaración como la sequedad de sólidos. Así, mientras aumentamos la profundidad de piscina resultará en una mejor recuperación de sólidos en un valor específico de alimentación, pero la torta producida será más mojada.

Algunos ensayos de campo se realizaron en Littleton / Englewood, Colorado Wastewater. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 6-36. La centrífuga de alta velocidad de la (HSC) con un diámetro de escudilla de 0.43 m y una longitud de 1.26 m era capaz de espesar el WAS a un 7 % en concentración de sólidos sin ningún químico. La centrífuga de baja velocidad (LSC) con un diámetro de escudilla de 0.46 m y una longitud de 1.35 m, sin embargo, requiere, \$6.1 de químicos por tonelada de sólidos secos de lodo para que logre una concentración de sólidos de 7 % con una recuperación más alta.

Las características de desempeño de la centrífuga de escudilla sólida con una variedad de lodos se muestran en la tabla 6-37 (USEPA 1987). Concentraciones más altas de torta se logran generalmente con la relación más favorable de lodo primario.

Los costos típicos en 1978 para centrifugación se ponen de manifiesto en la tabla 6-38 con base en 4 % de influente en concentración de sólidos. Los requerimientos eléctricos son una función de la velocidad de escudilla pero son típicamente 22-66 (kWh/ton. de sólidos).

La centrífuga tiene la ventaja de ser un proceso totalmente compatible con requerimientos limitados de espacio.

**Tabla 6-38. Costos estimados para desaguado por centrifugación**

Item	Ton. por día de sólido seco			
	10	25	50	100
Costo construcción	360000	580000	860000	1400000
Estudios de ingeniería	68400	110200	163400	266000
<u>Total costo de capital</u>	<u>428400</u>	<u>690200</u>	<u>1023400</u>	<u>1666000</u>
Operaciones (\$10/ h)	25600	50400	96000	184000
Mantenimiento (\$10/ h)	6200	13600	22400	45600
Mantenimiento mat.químico	36000	80000	160000	270000

Mantenimiento otros mat.	27000	52000	85000	140000
Costo m.o. anual	94800	196000	363400	639600
<u>Costo anual capital</u>	<u>40400</u>	<u>65200</u>	<u>96600</u>	<u>157300</u>
Costo total anual	135200	261200	460000	796900
<b>Costo por tonelada de sólido seco</b>	<b>37.0</b>	<b>28.6</b>	<b>25.2</b>	<b>21.8</b>

#### d) Filtro prensa de cinta

El filtro prensa de cinta emplea simple o doble movimiento de cintas y un continuo desaguado de lodos a través de una o más etapas de desaguado. Las prensas filtro de cinta y las centrifugas de escudilla sólida han llegado a ser los más frecuentemente usados dispositivos de desaguado. Todos los procesos de filtro prensa de cinta incluyen tres etapas operacionales básicas; el químico que condiciona el lodo de alimentación, el drenaje por gravedad, rapado y compresión del lodo desaguado. La figura 6-37 muestra una prensa simple de cinta y la ubicación de las tres etapas. El proceso de desaguado se ha hecho efectivo por el uso de dos correas sin fin de fibra sintética. Las correas pasan alrededor de un sistema de rodillos a velocidad constante y desempeñan la función de transmitir, desaguar y comprimir.

El buen acondicionamiento de químico es muy importante para el desempeño uniforme y exitoso de la prensa filtro de cinta. Un floculante (comúnmente un polímero orgánico) se agrega al lodo con anterioridad a ser alimentado a la prensa de cinta. El fracaso del químico que entra al proceso para cambiar las características del lodo puede ocasionar problemas operacionales. Si el lodo no es condicionado, ocurre un drenaje inadecuado en la sección de drenaje por gravedad, y/o la expulsión inadecuada de sólidos desaguados desde la sección de compresión o desborde no controlado de lodo puede ocurrir desde la sección de drenaje.

El desempeño del filtro de prensa es medido por el porcentaje de sólidos de la torta de lodo, el porcentaje de sólidos capturados, la carga hidráulica de sólidos y la dosis requerida de polímero. Varios elaboran variables incluyendo la velocidad de cinta y tensión de cinta.

La velocidad de cinta es un parámetro operacional importante que afecta la torta de sólidos, la dosis de polímero, recuperación de sólidos y la capacidad hidráulica. Las bajas velocidades de cinta resultan en tortas más secas de lodo. Con una dosis adecuada de polímero, las recuperaciones de sólidos son mejoradas por bajas velocidades de cinta. La capacidad hidráulica aumenta en velocidades más altas de cinta; sin embargo, los sólidos capturan reducciones. El desempeño deseado depende de la variación de la velocidad de cinta la cual produce una variedad de resultados diferentes.

La tensión de la cinta tiene un efecto sobre la torta de sólidos, los sólidos máximos cargados, y los sólidos capturados. En general una tensión más alta de cinta produce una torta más seca pero captura menos sólidos, para una dosis fija de polímeros. Una desventaja posible

de usar tensión más alta es que aumenta el desgaste de la cinta. Para fangos con una cantidad grande de WAS, la tensión de cinta debe reducirse para contener el lodo entre los cinturones. Debería usarse la tensión máxima que no ocasionara pérdidas de lodo desde los lados de los cinturones. Las zonas altas de presión sobre las prensas de cinta pueden ocasionar los problemas con algunas mezclas de WAS y pueden ser requerida una baja presión.

El tipo de cinta es importante para mejorar el desempeño total. La mayoría de los cinturones se tejen con filamentos de poliéster. Hay cinturones con diferentes tejidos de aspereza y diferentes fortalezas. Un cinturón con un tejido más fuerte y más burdo puede requerir dosis más altas de polímero para obtener una captura adecuada de sólidos. El cinturón requiere ser sometido a una presión típica de 690 kPa o más.

Los datos típicos de desempeño para desaguado de diversos tipos de lodos se muestran en la tabla 6-39 (USEPA 1987). En general la torta de lodo producida por desaguamiento sobre una cinta prensa filtro tiene una concentración alta de sólidos suficientes para cualquier tipo de método final de eliminación incluyendo incineración. Las prensas filtro de cinta tienen requerimientos de muy bajo poder. El requerimiento promedio de poder es de 8.2 (kW/m) de ancho de cinturón que es apreciablemente más inferior que el de otros tipos de equipo mecánicos de desaguado. Los requerimientos de personal son también bajos.

El costo de capital y mano de obra para la prensa filtro de cinta es similar a la centrífuga de escudilla sólida.

**Tabla 6-39. Datos de desempeño típico para varios tipos de desaguado de lodo usando filtro cinta**

Tipo de lodos	%Alimentación de sólidos	Velocidad de carga de sólidos	Polímeros	% Carga de sólidos
		kg / h / mbw	g / kg	
P	3-10	360-680	1-5	28-44
WAS	0.5-4	40-230	1-10	20-35
P+WAS	3-6	180-590	1-10	20-35
P+TF	3-6	180-590	2-8	20-40
<b>Digestión Anaeróbica de lodos</b>				
P	3-10	36-590	1-5	25-36
WAS	3-4	40-136	2-10	12-22
P+WAS	3-9	180-680	2-8	18-44
<b>Digestión Aeróbica de lodos</b>				
P+WAS	1-3	90-230	2-8	12-20
P+WAS	4-8	135-230	2-8	12-30
<b>Lodos Activados con</b>				

<b>Oxígeno</b>				
WAS	1-3	90-180	4-10	15-23
<b>Lodos Condicionados Termalmente</b>				
P+WAS	4-8	290-910	0	25-50

#### e) Filtro prensa de plato

Durante los últimos años ha habido un aumento en el uso de sistemas de filtración por presión en plantas de tratamiento. Los mejoramientos involucrados en el equipo con cantidades crecientes de lodos muy difíciles de tratar van en creciente aumento.

La prensa de filtro es un dispositivo batch, que se ha usado en la industria y en el tratamiento de aguas residuales en Europa desde hace muchos años. Hay varias variaciones en el diseño mecánico y presiones de operación. Para propósitos de ilustrar el concepto, un volumen fijo en un plato de prensa filtro se describirá. Tal prensa consiste de platos verticales que tiene lugar rígidamente en un marco y que se prensa entre un fin móvil y uno fijo como es ilustrada en la figura 6-38. Sobre la cara de cada plato individual se monta un paño de filtro. El fango se alimenta en la prensa y el agua pasa a través del paño, mientras los sólidos se retienen y forman una torta sobre el superficie del paño. La alimentación del lodo ocurre a presiones sobre 1600 (kPa) y se para cuando las cavidades o las cámaras entre las bandejas se llenan completamente. Los puertos de drenaje se proveen al pie de cada cámara de prensa. El filtrado se deposita en éstos, tomados al fin de la prensa, y despedidos al desagüe común. Al principio de un ciclo procesador, el drenaje de una prensa grande puede estar en el orden de 7.6 a 11.4 (m<sup>3</sup> /h). Este valor cae rápidamente a 1.9 (m<sup>3</sup> /h), cuando la torta comienza su formación. Cuando la torta llena completamente la cámara, el valor es virtualmente nulo. El paso de desagüe se completa cuando el filtrado está cercano a cero. En este punto la bomba de alimentación a la prensa se para y cualquier presión posterior en la cañería se libera mediante una válvula (bypass). El engranaje eléctrico de cierre se opera entonces para abrir la prensa. Los platos individuales más próximos son movidos a la vez sobre la brecha entre los platos. Esto permite que el filtro incrustado pueda caer fuera. El plato que mueve el paso puede ser o manual o automático. Cuando todos los platos se han movido y las tortas han sido liberadas, el paquete completo de platos se empuja y el dorso móvil es cerrado por el engranaje eléctrico. La válvula a la prensa se abre entonces, el lodo es alimentado por la bomba, y el próximo ciclo de desagüe comienza.

Para la prensa de diafragma, aunque la mayoría de la remoción de agua ocurre cuando el lodo está siendo bombeado a la prensa, una cantidad importante de agua se quita después de que el diafragma se infla. Cuando el diafragma se desinfla y la prensa se abre, la torta sale fuera. Las ventajas claves del diafragma incluyen el hecho que en un secado con un contenido de humedad relativamente uniforme se necesita un tiempo total de ciclo más corto.

Las prensas de filtro se instalan normalmente bien arriba del nivel de piso, para que las tortas puedan bajar en transportadores o los remolques sean ubicados bajo la prensa. Las presiones que pueden aplicarse al lodo para la remoción de agua por las prensas de filtro van

desde 5000 a 20000 tiempos de la fuerza de gravedad (g). En comparación con una centrífuga de escudilla sólida la cual provee fuerzas de 700-3500 G y un filtro de vacío 1000 G. Como resultado de estas mayores presiones, las prensas de filtro pueden proveer más altas concentraciones sólidas (30-50% sólidos) en dosis químicas reducidas.

La tabla 6-40 presenta resultados típicos de la filtración por presión. Como es fácilmente evidente, el proceso produce una torta más seca que por filtración al vacío o centrifugación. La tabla 6-41 presenta costos ilustrativos. Aunque los costos de desaguado sean más altos que para filtración al vacío o centrifugación; bajo condiciones comparables, la torta más seca producida puede resultar en ahorros en procesos río abajo que son más adecuados para contrarrestar los costos más altos. El consumo eléctrico es primariamente una función del influente y la concentración de sólidos desde 110-220 (kWh / ton. de sólido) en 4 % de influentes sólidos a 55-110 (kWh / ton.) en 8 % de influentes sólidos.

**Tabla 6-41. Costos estimados para desaguado por filtro prensa**

Item	Ton. por día de sólido seco			
	10	25	50	100
Costo construcción	820900	1085000	2170000	3498600
Estudios de ingeniería	156000	206200	412300	664700
<u>Total costo de capital</u>	<u>976900</u>	<u>1291200</u>	<u>2582300</u>	<u>4163300</u>
M & O (\$10/ h)	76000	120000	180000	310000
Mantenimiento (\$10/ h)	8000	17000	28000	51000
Mantenimiento mat.químico	46000	100000	180000	310000
Mantenimiento otros mat.	29300	38700	77500	124900
Costo M.& O. Anual	186800	345200	608000	1081700
<u>Costo anual capital</u>	<u>92200</u>	<u>121900</u>	<u>243800</u>	<u>393000</u>
Costo total anual	279000	467100	851800	1474700
<b>Costo por tonelada de sólido seco</b>	<b>76.4</b>	<b>51.2</b>	<b>46.7</b>	<b>40.4</b>

#### **f) Lagunas de secado**

El secado utilizando lagunas es de bajo costo, es un sistema simple para el desaguado de lodo. El secado utilizando lagunas es similar a las camas de arena en que el lodo se quita periódicamente y la laguna **refilled**. Las lagunas han raramente sido usadas en donde el lodo nunca se quita, porque tales sistemas se limitan en la aplicación a las áreas donde grandes cantidades de tierra barata son disponibles. El lodo se estabiliza para reducir los problemas de olor con anterioridad al desaguado en una laguna de secado.

Los problemas de olor pueden ser mayores que con los lechos de arena, porque el lodo en una laguna retiene más agua durante un período más largo que para un lodo sobre un lecho seco de arena convencional.

Otros factores que afectan el diseño incluyen consideraciones de control de acceso y protección a las aguas subterráneas. Los factores importantes de diseño incluyen clima, permeabilidad del subsuelo, profundidad de la laguna, velocidad de carga, y características del lodo.

La velocidad de carga de sólidos, sugeridos para lagunas secadoras, son de 35 a 38 (kg / m<sup>3</sup>) de la capacidad de la laguna. Las otras recomendaciones se extienden desde 0.1 (m<sup>2</sup> / cápita) para lodos primarios digeridos en un clima árido a tan alto como 0.3 a 0.4 (m<sup>2</sup> / cápita) para plantas de lodos activados donde la precipitación anual es 0.9 m. Las profundidades de lodo de 0.8 a 1.2 m pueden usarse en climas más cálidos donde períodos de secado más prolongados son posibles.

El lodo generalmente no desagua en ningún período razonable de tiempo. Un enfoque propuesto utiliza un ciclo de 3 años, en que la laguna se carga por 1 año, seca por 18 meses, se limpia, y permite que descanse por 6 meses. Los datos definitivos sobre las lagunas de secado son escasos. El lodo puede ser desaguado desde 5 % de sólidos a 40 ó 45 % sólidos en 2 a 3 años, en el cual se usan profundidades de lodo de 0.6 a 1.2 m.

Los limitados datos de costo sobre los sistemas grandes de laguna indican en 1978 costos en el rango de \$11-22 / tonne, privativa de costos terrestres.

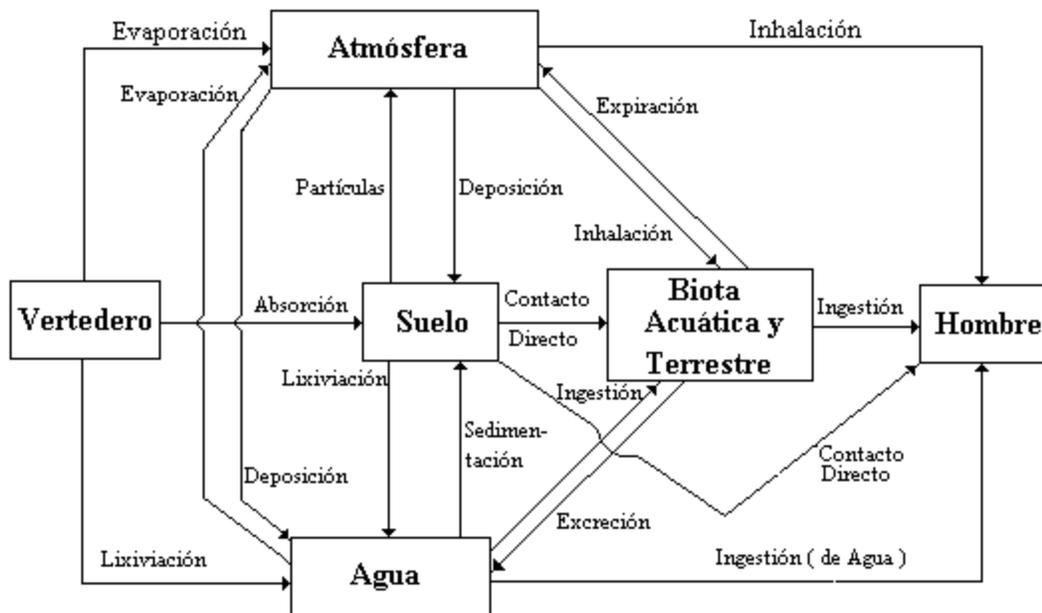
## CAPÍTULO IX

### Efectos En La Salud y El Ambiente De Los Residuos Peligrosos y Productos Tóxicos

#### 9.1. Rutas potenciales de los residuos al ambiente

Las rutas potenciales de los residuos peligrosos hacia el ambiente humano son los resumidos en la Figura 4.1. La importancia relativa de cada ruta depende no solo de las propiedades físicas o químicas sino que también en las características tanto del depósito de residuos como de la geología del suelo.

**Figura 9.1. Rutas físicas y biológicas de transporte de sustancias peligrosas, sus fuentes y disposición, y potencial de exposición humana**



#### 9.1.1. Contaminación de aguas subterráneas

Las características del ambiente bajo la superficie tiene una gran influencia sobre el transporte acuoso de los contaminantes químicos y microorganismos en los lugares de depósitos de residuos. Existen tanto una zona saturada como no-saturada bajo la superficie de disposición de residuos. En zona no-saturada donde el agua se mueve en forma vertical hasta que encuentra el agua subterránea donde se mueve en forma horizontal

### **9.1.2. Contaminación de aguas superficiales**

Los cuerpos de aguas superficiales cercanos a lugares de disposición de residuos pueden recibir residuos peligrosos directamente de aguas de desagüe. También las aguas subterráneas pueden ser fuentes de contaminantes a las aguas superficiales.

Las condiciones aeróbicas de las aguas superficiales, pueden facilitar la degradación biológica y química de los compuestos orgánicos, mientras que la volatilización será más pronunciada en aguas superficiales que en aguas subterráneas. Existe preocupación acerca de la posible bioacumulación y toxicidad de algunos residuos en bajas concentraciones sobre los peces de la biota acuática.

### **9.1.3. Otros mecanismos de contaminación**

Los compuestos orgánicos con altas presiones de vapor tendrán una gran tendencia a escapar a la atmósfera en lugares de disposición. Los incendios y el viento son factores que incrementan la vaporización de compuestos volátiles. La dispersión por efecto del viento también es un agente potencial de contaminación, afectando a la gente a través de la inhalación. Ciertos residuos sólidos, como el asbesto por ejemplo, son especialmente susceptible de ser dispersados por el viento. La movilización de suelos contaminados también pueden presentar un problema en particular, en sitios manejados pobremente o en lugares con movimientos de vehículos pesados.

La vegetación que crece en lugares cercanos a los sitios de disposición de residuos, absorberán productos químicos peligrosos vía las raíces o del propio contaminante, y podrán transportarlos a las partes superiores de la planta. La deposición de partículas de suelos contaminados en la superficie de las plantas es otra vía de exposición potencial particularmente en la vecindad de sitios de manejo de residuos.

## **9.2. Factores que afectan el comportamiento ambiental de los productos químicos**

### **9.2.1. Factores físicos y químicos**

Un número de factores físicos y químicos son importantes para determinar el comportamiento de las sustancias químicas en el ambiente. Ellos son:

- **Lixiviación;**
- **Adsorción / Desorción;**

- **Volatilización;**
- **Bioacumulación.**

Generalmente, mientras mayor es la solubilidad en agua de un compuesto, mayor es el potencial para lixiviar en un sitio de vertedero. Muchos compuestos orgánicos peligrosos son poco solubles en agua, pero la presencia de solventes parcialmente miscibles como cloroformo, pueden ayudar a la lixiviación de compuestos orgánicos.

La adsorción de compuestos a las partículas del suelo o en material de desecho es un fenómeno importante que tiende a restringir el movimiento de tanto productos orgánicos como inorgánicos en un vertedero. Además la adsorción es un factor importante en el retardo de la migración de residuos aceitosos.

La volatilización es una ruta potencial por medio de la cual los residuos pueden migrar en los vertederos. Es particularmente importante en ciertos compuestos orgánicos tales como cloroformo, los cuales tienen alta presión de vapor.

Las características del vertedero tales como temperatura, humedad del suelo, pH del suelo, solubilidad en agua de los compuestos, tienen gran influencia en la extensión de la volatilización.

Algunas sustancias como cloruro de metileno y dicloruro de etileno, tienen altas presiones de vapor y altas solubilidades y pueden ser perdidos por lixiviación y volatilización.

Para compuestos orgánicos, el coeficiente de partición  $P$  de octanol/agua es a menudo usado como un índice de bioacumulación potencial para un producto químico en un ambiente acuático. Este coeficiente está correlacionado con el peso molecular del compuesto, así por ejemplo compuestos como el DDT que tienen un coeficiente  $P$  alto, muestran un marcado potencial para bioacumulación en organismos acuáticos.

### **9.2.2. Degradación de productos químicos**

La persistencia de los productos químicos orgánicos peligrosos es muy importante para su efecto en el medio ambiente. Ciertos compuestos pueden sufrir degradación química o biológica en los sitios de disposición, mientras que otros son resistentes a cualquier transformación y pueden aún ser tóxicos a microorganismos del suelo.

Los principales procesos químicos asociados con la degradación de contaminantes orgánicos en sitios de disposición han sido identificados como hidrólisis, biodegradación, fotólisis, y oxidación, esta última es de especial importancia en la degradación de fenoles y aminas aromáticas.

En ciertas instancias, los reactivos químicos pueden ponerse en contacto en los mismos sitios de disposición o vertederos, resultando en fuegos o explosiones. La **Tabla 4.2** resume las reacciones indeseables que pueden ocurrir cuando residuos incompatibles conteniendo compuestos peligrosos se mezclan.

Estas reacciones incluyen:

- Reacciones exotérmicas que pueden resultar en fuegos o explosiones; estas pueden ser causadas por metales alcalinos y agentes oxidantes fuertes.
- Producción de gases tóxicos tales como **sulfuro de hidrogeno, cianuro de hidrógeno y cloro.**
- Producción de gases inflamables tales como **hidrogeno, metano, acetileno.**

Existen por lo tanto variados peligros asociados con ciertos tipos de residuos que son inestables bajo condiciones ambientales o en movimiento, tales como **metales hídridos, aleaciones de metales y álcalis y peróxidos orgánicos.** También hay otros mecanismo de degradación como la **Fotodegradación,** la **Transformación Biológica,** y la **Digestión Anaeróbica,** que producen cambios en los residuos. La Fotodegradación se identifica como un importante mecanismo de rompimiento de compuestos orgánicos. La transformación biológica puede conducir a la degradación de un contaminante hacia un producto inocuo o menos peligroso, pero también puede resultar en la biosíntesis de un producto persistente o un compuesto tóxico. Las condiciones anaeróbicas favorecen la reducción bacteriana de sulfatos, nitratos y carbohidratos, y son responsables de la producción de gas en los vertederos, cuyos constituyentes son principalmente dióxido de carbono y metano, pero pueden tener pequeñas cantidades de sulfuro de hidrogeno. El mayor riesgo asociado con la producción de gas por el proceso anaeróbico es el riesgo serio de fuego y explosión que ocurre cuando la concentración de metano está en el rango de 5-15 %.

**Tabla 9.1. Compatibilidad de residuos peligrosos**

1	Ácidos-Minerales Oxidantes	1											
2	Sustancias Cáusticas	C	2										
3	Hidrocarburos Aromáticos	C F		3									
4	Orgánicos Halogenados	C F GT	CG I		4								
5	Metales	GI C F			C F	5							
6	Metales Tóxicos	S	S							6			
7	Hidrocarburos Alifáticos Saturados	C F									7		
8	Fenoles y Cresoles	C F										8	
9	Agentes Oxidantes Fuertes		C	C F		C F		C			9		
10	Agentes Reductores Fuertes	C F GT			C GT					GI C	C F E	10	
11	Agua y Mezclas con Agua	C			C E		S					GI GT	11
12	Sustancias Reactivas con Agua	Extremadamente reactivas, no mezclar con ningún producto químico, material o residuo peligrosos										12	

<b>E</b>	<b>Explosivo</b>
----------	------------------

<b>F</b>	<b>Fuego</b>
<b>GI</b>	<b>Gas Inflamable</b>
<b>GT</b>	<b>Gas Tóxico</b>
<b>C</b>	<b>Generación de Calor</b>
<b>S</b>	<b>Solubilización de Toxinas</b>

### **9.3. Efectos de los residuos peligrosos en la salud y el ambiente**

La mezcla de residuos que contienen compuestos incompatibles pueden causar explosiones e incendios. El contacto con ácidos fuertes o álcalis pueden causar corrosión y daños en la piel así como severos daños en las corneas. La absorción de ciertos pesticidas pueden causar envenenamiento agudo. Los envases y contenedores de productos químicos peligrosos pueden, si no son adecuadamente descartados, resultar en severos accidentes de envenenamiento si se dejan sin cuidado en lugares como vertederos y depósitos. En los países en desarrollo, una de las mayores causas de la mortalidad infantil entre las edades de 1 a 10 años, son accidentes con envenenamiento accidental.

El derrame de residuos químicos al ambiente puede resultar en exposiciones de largo tiempo para la población, causando efectos adversos para la salud debido a envenenamiento. Los siguientes ejemplos son ilustrativos:

- Agua conteniendo grandes cantidades de **Cadmio** fue descargada desde la Mina de Zinc Kamioka en Japón en un río que se utilizaba para agua potable aguas abajo de la ubicación de la mina. Debido a las grandes cantidades de agua utilizada para beber e irrigación de plantaciones de arroz, la prolongada exposición de la población resultó en serios malfuncionamiento de riñones en gran parte de la población. Los efectos más severos fueron en mujeres embarazadas, e incluyeron descalcificación del esqueleto, múltiples fracturas de huesos, invalidez, y muertes (mal de Itai-itai).
- En otras áreas de Japón, el uso industrial de **catalizadores de Mercurio** resultó en la presencia de mercurio en los efluentes de las plantas de tratamiento de la zona costera. El mercurio fue convertido por microorganismos presentes en el agua, en **metilmercurio**, una forma altamente tóxica. En la Bahía de Minamata y en el río Agano, el metilmercurio se acumulo en los peces y mariscos. Como los mariscos y peces son una parte importante de la dieta japonesa, muchos habitantes locales sufrieron envenenamiento y severos síntomas neurológicos, como visión disminuida, pérdidas de audición y dificultades al caminar. Este es uno de los accidentes mejor documentados y sin embargo accidentes similares han ocurrido en otros países.

Algunos elementos químicos como el mercurio, son indestructibles y por lo tanto sólo pueden ser redistribuidos en el medio ambiente. Por el contrario los compuestos químicos orgánicos son a menudo degradados por el ambiente a componentes elementales o compuestos simples como dióxido de carbono y agua. Sin embargo algunos compuestos orgánicos clorinados o halogenados son extremadamente persistentes en el ambiente y tienden a acumularse en la cadena alimenticia o en la biosfera en general. Ejemplos de este tipo de compuestos incluyen: **Bifenilos Policlorinados (PCBs), Dioxinas e Hidrocarburos Clorinados**; estos últimos se han utilizados extensivamente en **pesticidas (DDT, Dieldrin, y Aldrin)**. Los PCBs y las dioxinas se pueden formar por incineración de residuos que contienen hidrocarburos y cloruros. Estos compuestos se trasladan con las emisiones atmosféricas y se precipitan en el ambiente llegando a través de la cadena de alimentos a los humanos almacenándose en los tejidos grasos de los humanos y animales. El significado en la salud de esta acumulación es aún incierta, pero la experiencia de niveles accidentales altos de exposición a estos compuestos ha demostrado que pueden causar serios efectos en los seres vivos.

Las fugas de vertederos o lugares de disposición a menudo contienen grandes cantidades de **nitratos**, lo cual resulta en altos niveles de estos compuestos en pozos de agua potable adyacentes. Los niveles de nitratos en agua potable superiores a 45 mg/l (ppm) podrían suponer un riesgo de meteglobinemia en infantes, enfermedad que interfiere con el transporte de oxígeno en la corriente sanguínea y que puede ser fatal.

Otros ejemplos de catástrofes de residuos tóxicos es el caso de Love Canal en el Estado de Nueva York, EE.UU., donde productos químicos y gases de un depósito bajo tierra de residuos tóxicos comenzaron a llegar a casas y escuelas provocando efectos adversos en la salud de la población y eventualmente resultó en la total evacuación de la ciudad. El Reino Unido, tambores conteniendo sales con cianuros fueron descubiertos en terrenos usados como parque de juegos infantiles

### **9.3.1. Identificación de sustancias peligrosas y evaluación de los riesgos**

Para prevenir y/o controlar los efectos adversos sobre la salud y el ambiente de los productos tóxicos, es necesario controlar todos los materiales químicos e infecciosos introducidos en el ambiente humano. La naturaleza química de cada producto debe ser determinada, junto con las impurezas, subproductos y residuos. Los efectos potenciales de estas sustancias sobre la salud y el ambiente deben ser establecidas junto con una estimación cuantitativa de los niveles presentes en el ambiente. Los niveles de exposición tanto de los seres humanos como otros organismos deben ser evaluados y se deben tomar medidas para asegurar que se eviten efectos adversos. Estas medidas de control deben ser monitoreadas continuamente.

#### **a) Identificación de las sustancias peligrosas**

Todo material peligroso o residuo debe ser evaluado con respecto a organismos que son patogénicos para el hombre y los animales, así como también la procedencia de los mismos. La composición química de los residuos debe ser determinada para evaluar la toxicidad potencial sistémica junto, con otros efectos tales como mutagénicos, citogénicos y carcinogénicos, así como también como efectos en la reproducción y crecimiento y desarrollo fetal/neonatal. En la mayoría de los casos, esta información se encuentra en la literatura, como documentos de la OMS, OIT u otras fuentes de literatura toxicológica. Cuando no exista información será necesario efectuar análisis de laboratorio como por ejemplo el TLCP (El Procedimiento de Toxicidad Característica de Lixiviado de Estados Unidos, U.S. Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP).

Todos los contaminantes estudiados en el TLCP son peligrosos en el agua potable debido a sus efectos adversos sobre la salud. Productos tales como arsénico, cadmio, cromo y plomo son de cuidado debido a su posible efecto cancerígeno, mientras que el bario afecta los músculos y puede causar gastroenteritis o parálisis muscular. El pesticida Endrin es una potente toxina teratogénica y reproductiva y una exposición crónica puede afectar el sistema nervioso, el corazón, los pulmones el hígado y riñones. La tabla siguiente entrega una lista de las 25 sustancias más frecuentemente identificadas en un gran número de sitios de disposición de sustancias tóxicas en EE.UU.:

**Tabla 9.2**  
**25 Sustancias identificadas en 546 sitios de disposición de residuos**

<b>Nivel</b>	<b>Sustancia</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	<b>Tricloroetileno</b>	<b>33</b>
<b>2</b>	<b>Compuestos de Plomo</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>Tolueno</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Benceno</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Bifenilos Policlorinados (PCBs)</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Cloroformo</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Tetracloroetileno</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Fenol</b>	<b>15</b>
<b>9</b>	<b>Compuestos de Arsénico</b>	<b>15</b>
<b>10</b>	<b>Compuestos de Cadmio</b>	<b>15</b>
<b>11</b>	<b>Compuestos de Cromo</b>	<b>15</b>
<b>12</b>	<b>1,1,1-Tricloroetano</b>	<b>14</b>
<b>13</b>	<b>Compuestos de Zinc</b>	<b>14</b>
<b>14</b>	<b>Etilbenceno</b>	<b>13</b>
<b>15</b>	<b>Xileno</b>	<b>13</b>
<b>16</b>	<b>Cloruro de Metileno</b>	<b>12</b>
<b>17</b>	<b>Trans-1,2-Dicloroetileno</b>	<b>11</b>
<b>18</b>	<b>Mercurio</b>	<b>10</b>

<b>19</b>	<b>Compuestos de Cobre</b>	<b>9</b>
<b>20</b>	<b>Cianuros (Sales Solubles)</b>	<b>8</b>
<b>21</b>	<b>Cloruro de Vinilo</b>	<b>8</b>
<b>22</b>	<b>1,2-Dicloroetano</b>	<b>8</b>
<b>23</b>	<b>Clorobenceno</b>	<b>8</b>
<b>24</b>	<b>1,1-Dicloroetano</b>	<b>8</b>
<b>25</b>	<b>Tetracloruro de Carbono</b>	<b>8</b>

## **b) Exposiciones al hombre y los animales**

Los residuos peligrosos pueden afectar a la salud del hombre y los animales a través de distintos mecanismos y vías de exposición. La ruta más obvia es el contacto directo con los agentes peligrosos durante el manejo de los residuos, o con los envases o material absorbente de residuos, o todo tipo de contenedores de sustancias tóxicas. Los niños son un grupo especial vulnerable, debido a que juegan alrededor de los sitios de disposición y ponen las manos en material contaminado así como también los llevan a la boca. La inhalación del polvo de estos lugares también constituye un peligro debido a los materiales con asbesto o la vaporización de residuos químicos.

Las aguas subterráneas pueden contaminarse a partir de vertederos o lugares de disposición. Agentes peligrosos como bacterias, virus, y productos químicos pueden ser transferidos al agua potable de esta forma. Ciertos virus y bacterias pueden sobrevivir entre semanas y meses en el suelo y/o en las borras de plantas de tratamiento, incrementando el riesgo de que estos agentes sean transferidos al agua potable.

El transporte de contaminantes a las aguas superficiales resulta en una dispersión extensiva y rápida, que puede ser causada por transferencia directa de los sitios de disposición o por animales como pájaros, ratas, insectos, etc. También se pueden producir transferencia de las descargas costeras de aguas servidas o plantas de tratamiento a los recursos de aguas potables.

## **9.4. La contaminación del aire y los problemas de salud asociados**

La contaminación atmosférica causa problemas a la salud por todos conocidos. A través del mundo son muchos los ejemplos que demuestran este efecto: Ciudad de México (20 millones de habitantes), la Ciudad de Los Ángeles en U.S.A., Santiago de Chile, y la ciudad de Talcahuano en Chile, se pueden indicar como ciudades de un nivel muy bajo de calidad de vida en función de la contaminación aérea. Por lo anterior se podría considerar que la contaminación aérea estaría asociada fundamentalmente con las fuentes de contaminación industriales y de transporte, pero como se demostrará a continuación las mayores fuentes de contaminación del aire corresponde al humo del cigarrillo. Más aún, es posible demostrar que los peligros para la salud a partir del aire contaminado dentro de nuestros hogares, oficinas, etc, es a menudo mayor que en el caso de aire exterior, aún en una ciudad industrializada.

### **9.4.1. Contaminación aérea y la salud**

La contaminación atmosférica principalmente causa problemas en los pulmones y vías respiratorias, aunque también se pueden producir daños a otros órganos del cuerpo humano. A pesar de que el famoso “smog” puede causar grandes trastornos, así como también la posible contaminación por elementos químicos (pesticidas, cloro gaseoso, amoníaco, etc.), es de mayor

preocupación los efectos causados por los contaminantes aéreos en espacios cerrados, en especial por la gran cantidad de tiempo que el ser humano está en estos lugares.

#### **9.4.2. El humo del cigarrillo y la salud**

El Cigarrillo es la causa particular de muerte que más se puede prevenir en nuestra sociedad. Una de cada seis muertes en los Estados Unidos se atribuye al cigarrillo, es decir alrededor de 390.000 por año. A cualquier edad mueren proporcionalmente más fumadores que no fumadores, contribuyendo el tabaco al 30 % de las muertes por cáncer al año, lo que incluye un 85 % de las muertes por cáncer al pulmón. Los fumadores en general tienen un 70 % más de muerte por infartos al corazón (la mayor causa de fallecimientos en el mundo) que los no-fumadores. Un número adicional de 10 millones de Norteamericanos sufren enfermedades que van en aumento, que son causadas por el cigarrillo, incluyendo **Bronquitis, Enfisemas, y Arteriosclerosis**. El inhalar el humo de los fumadores, es decir el "fumador pasivo" es una de las causas de enfermedades, especialmente cáncer al pulmón, entre los no-fumadores.

##### **a) Quiénes fuman y tendencias en los hábitos de fumar**

La tendencia mundial entre los adultos que fuman ha sido una disminución en los últimos años, y aunque las estadísticas indican que todavía fuman más hombres que mujeres, esta diferencia se está revirtiendo especialmente en las escuelas secundarias donde fuman más mujeres que hombres. El mayor aumento se ha producido en el sexo femenino entre las edades de 20 y 35 años y el progreso logrado en la reducción global del número de fumadores se debe principalmente a las personas que lo han dejado y no a un menor número de personas que comienzan con el hábito de fumar. Cerca de la mitad de los adultos que alguna vez fumaron han eliminado este hábito, pero la información más reciente indica que entre jóvenes la prevención primaria, (nunca fumar) está logrando un gran efecto en la disminución de la tasa de fumadores.

El nivel de educación tiene una gran importancia entre los fumadores y no-fumadores, ya que mientras mayor es el nivel de educación, menor es la posibilidad de ser un fumador. El fumar comienza principalmente durante la niñez y la adolescencia. Un 25 % de los estudiantes que han fumado, experimentaron su primer cigarrillo a nivel de 6° básico, y un 50 % a nivel de octavo básico. Para quienes comienzan a fumar antes de los 20 años, mientras más jóvenes sean, más posibilidades tienen de continuar con el hábito y de ser fumadores crónicos (por un periodo muy extenso). Lo anterior indica cuán importante son las campañas preventivas de educación a las edades más tempranas posibles.

##### **b) Enfermedades causadas por el cigarrillo**

El cáncer al pulmón es la enfermedad más identificada con el hábito de fumar. En 1985, el cigarrillo fue el causante de un 87 % de todas las muertes por cáncer al pulmón. Entre las mujeres, el cáncer al pulmón ha sobrepasado al cáncer a las glándulas mamarias como causa principal de cáncer fatal, como un resultado directo del aumento en las últimas tres décadas del número de mujeres que fuman.

Otras enfermedades que se conocen como causadas por el cigarrillo, incluyen infartos coronarios, problemas vasculares periféricos, cáncer de la laringe, de la boca, y del esófago; enfermedades crónicas obstructivas del pulmón; retardo de crecimiento fetal; y bajo índice de peso al nacer en niños. El cigarrillo es considerado actualmente en ser probablemente una de las causas principales de no fertilidad, aumento en la mortalidad infantil, y muertes por úlcera péptica; de ser un factor de contribución en el cáncer del bazo, páncreas, y del riñón, además de estar asociado con el cáncer al estómago. El humo del tabaco también interactúa con otras sustancias en los lugares de trabajo y con el alcohol en un aumento del riesgo de contraer cáncer.

Existen alrededor de **4000 compuestos** presentes en el humo del cigarrillo, muchos de los cuales se ha comprobado científicamente que son tóxicos o que causan cáncer y mutaciones. Un total de **43 compuestos carcinogénicos** se han identificados, incluyendo varias **nitroaminas, benzo[a]pireno, cadmio, níquel y zinc**. Entre otras sustancias presentes se encuentran el **Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno, y material particulado**.

### c) El “fumador pasivo” y la “exposición involuntaria”

Respirar el humo de cigarrillo producido cuando otras personas fuman se denomina el efecto del “fumador pasivo”. Prácticamente todas las sustancias inhaladas por los fumadores están presentes en los humos del cigarrillo o del humo exhalado por el persona que fuma. A pesar de que las concentraciones de productos tóxicos son menores debido al efecto de dilución en el aire, se ha establecido que estos humos tienen un efecto sobre la salud. En Estados Unidos, La EPA (Agencia de Protección Ambiental) ha clasificado al humo del cigarrillo como un agente cancerígeno de clase A (Clasificación que indicaría que existe suficiente evidencia de estudios epidemiológicos para corroborar la relación causa-efecto entre la sustancia y el cáncer). El cáncer al pulmón en personas no-fumadoras sanas es la mayor demostración de este efecto en familias de fumadores. Un aumento en las infecciones respiratorias y en los síntomas entre hijos de fumadores, aumento de síntomas de alergias, condiciones crónicas de los pulmones, y dolores del pecho son claros indicadores del efecto del fumador pasivo, así como también dolores de cabeza, e irritaciones de ojos y nariz.

La exposición involuntaria a sustancias producidas por el humo del tabaco se produce en el desarrollo del embrión de una mujer embarazada que ha fumado, y también en los infantes de mujeres que amamantan y fuman. Muchas de las sustancias pueden cruzar la placenta y llegar al feto; otras sustancias aparecen en la leche materna. Algunas de las consecuencias de estas

exposiciones incluyen pérdidas, nacimientos prematuros, bajo peso de los infantes, y retardo en el desarrollo.

El problema del fumador pasivo a ido incrementando las restricciones a los fumadores tanto a nivel casero como público, debido al mayor conocimiento de los efectos directos e indirectos del humo del cigarrillo.

Existen cada vez mayores regulaciones en escuelas, bibliotecas, restaurantes, medios de transporte, oficinas, etc., que impiden el uso indiscriminado de cualquier ambiente para emitir las conocidas sustancias tóxicas que produce el humo del tabaco.

### **9.4.3. Contaminación de ambientes interiores**

A mediados de los 70, algunos informes científicos comenzaron a plantear la posibilidad de que la contaminación del aire podría ser más peligrosa en cualquier cocina de una casa común, que en la que se podría encontrar en el aire de las ciudades más pobladas. Hoy en día, después de muchos trabajos efectuados sobre este tema, el problema de la contaminación de ambientes interiores está claramente establecido.

#### **a) Fuentes de contaminación interior**

Existen cinco tipos de fuentes de contaminación en un hogar común. La primera en ser reconocida fue la **combustión de combustibles para calentamiento y cocción de alimentos**. Los gases más utilizados como combustible son el **Gas Natural (Metano)** y el **Gas Licuado (Propano-Butano)**, que principalmente producen **Dióxido de Nitrógeno y Monóxido de Carbono** junto a otros productos de la combustión que no tienen efectos nocivos. Si se utiliza madera tanto para calefacción en chimeneas o para cocción (es el caso de muchos países en el mundo), en este caso además de los dos contaminantes nombrados se agregan material particulado y una serie de hidrocarburos potencialmente riesgosos para la salud. Estos hidrocarburos incluyen al grupo de los **benzo[a]pirenos** que son conocidos como **potentes cancerígenos**.

La combustión de **Carbón** o **Petróleo** produce todos los contaminantes anteriores además de la producción de **Dióxido de Azufre**. En la mayoría de los países desarrollados se utiliza petróleo de bajo contenido de Azufre como elemento de calefacción, por lo cual lo anterior no es un problema mayor. Sin embargo en muchos otros países como China por ejemplo, se utiliza en grandes cantidades Carbón en la mayoría de los hogares, y por lo tanto el espectro de contaminantes que se producen provocan una serie de daños a la salud de la población. En las naciones en desarrollo donde el uso de cocinas con mala ventilación y de uso común de combustión directa en el interior de las casas, la contaminación a partir de estos combustibles se cree que puede ser una gran fuente de peligro para la salud.

Una segunda fuente de contaminación interna es la resultante de **materiales naturales y sintéticos** utilizados en alfombras, aislantes de espumas, papeles de decoración interior, y muebles. Los pegamentos utilizados en maderas aglomeradas por ejemplo, producen **formaldehído**. Las alfombras de Látex son fuente de emisiones de fenil- cicloheno. **Asbesto**, utilizados en materiales de construcción por sus propiedades de resistencia al calor, pueden provocar la emisión de fibras de asbesto al aire interior si no están apropiadamente selladas. En oficinas algunos tipos de fotocopiadoras e impresoras de computadores son una fuente de sustancias orgánicas tóxicas tales **tolueno**. En efecto, el aire en muchos de los edificios modernos está particularmente contaminado debido a la combinación de equipos de oficina, alfombras sintéticas, y mala ventilación.

La tercera fuente posible de contaminación interna es la fuga de gases tóxicos a través del suelo bajo las casas o de los servicios de aguas servidas por posible contaminación en estos conductos. En Estados Unidos la mayor fuente de emisión de gases a través del suelo lo constituye las emisiones de **gas radioactivo Radón**. Cierta evidencia reciente ha demostrado que es posible que gases tóxicos emitidos de lugares de almacenamiento de desechos puedan afectar sitios poblados, y también hay casos documentados de problemas por emisiones a través de los servicios de alcantarillados.

Muchos de los productos comerciales utilizados domésticamente tales como **limpiamuebles, pegamentos, agentes de limpieza, cosméticos, desodorizantes, pesticidas, y solventes** utilizados en el hogar contribuyen a la toxicidad del aire ambiente interior. Más aún, las ropas limpiadas en seco, son una fuente de **tetracloroetileno**. Estos productos de usual consumo son la cuarta fuente de producción de contaminación interna. La quinta fuente de contaminación es el humo del cigarrillo. No solo es un contaminante por si solo, sino que aumenta los riesgos de enfermedades a partir de otros compuestos tóxicos presentes en los ambientes internos.

## **b) Reducción de la contaminación interna**

La contaminación interna de las cinco fuentes mencionadas puede ser reducida por medio del aumento de la ventilación de los ambientes interiores. Desafortunadamente, esta estrategia puede ser altamente costosa, especialmente en lugares de baja temperatura, donde se enfría rápidamente el ambiente interno, y los consumos de combustible aumentan notoriamente. Mucho del interés por la contaminación interna ha nacido de la preocupación de que al sellar las pérdidas de calor de para efecto de una mejor conservación de la energía, se produce a su vez la acumulación de gases contaminantes y de aire caliente.

Afortunadamente, existen otros caminos para reducir los niveles de contaminación interna en vez de permitir la excesiva infiltración de aire y consecuente pérdida de energía. Las cocinas interiores pueden ser ventiladas con campanas eficientes lo que aumenta la ventilación en la fuente directa de contaminación, que es donde más se necesita. Alternativamente, el uso de cocinas

eléctricas disminuye notablemente la contaminación interna, aunque esto puede significar una mayor fuente de contaminación externa si la producción de electricidad es a partir de **combustibles fósiles (petróleo, carbón)**. La contaminación interna producida por la calefacción puede ser reducida aunque no totalmente eliminada si se utilizan sistemas eficientes en las calderas y en los calefactores puntuales. La contaminación producida por materiales sintéticos puede ser evitada disminuyendo su uso, o eliminando por medio de buena ventilación las emisiones producidas por elementos nuevos. Los muebles nuevos, especialmente los que contienen espumas, son fuentes de mayor contaminación interna que los muebles usados. La razón es que a medida de que aumenta el uso de los muebles con espuma, la emisión de **formaldehído** disminuye. También es posible utilizar algunos compuestos sellantes de materiales de construcción de modo de prevenir la emisión de sustancias tales como el **formaldehído** o **asbesto**.

Recientes estudios hechos por la **NASA (Agencia Nacional de Administración y Aeronáutica, U.S.A.)** indican que existiría otra forma de reducir al menos parcialmente los niveles de contaminación interna. Los científicos de la NASA han demostrado que las plantas comunes de interiores pueden absorber algunos gases de compuestos como **formaldehído, benceno y monóxido de carbono** (New York Time, Julio 26, 1988). Es aparente de estos estudios de que algunas plantas están mejor adaptadas para este efecto que otras. los **Filodendros** son las que sería particularmente efectivas para remover estos gases. Otras plantas que muestran esta habilidad son la **planta araña** (remueve **monóxido de carbono**), la **aloe veras** (para **formaldehído**), y **las margaritas (gerbera daisies)**, (para **benceno**). Aunque los análisis se han efectuado para condiciones que se tienen en las cápsulas espaciales y no para situaciones interiores en tierra, los resultados sugieren que estas plantas pueden tener una utilidad alternativa a la ornamental.

A pesar de las estrategias que hemos descrito, el problema de la contaminación interna permanece latente en ciertas situaciones. Algunos lugares interiores contienen materiales de construcción que son grandes fuentes de contaminación tales como **asbesto**, los cuales no pueden ser extraídos sino es a grandes costos. Otras casas y edificios pueden estar localizados en lugares cercanos a acumulaciones de desechos tóxicos, de modo de que no existe una solución a corto plazo.

## **9.5. Grados del concepto de peligro**

En la identificación y clasificación de los residuos peligrosos, es importante reconocer que existen varios grados de peligrosidad asociados con los diferentes tipos de productos. Existen muchas formas de clasificar el grado de peligro, una de ellas es la siguiente, que define tres categorías:

- La primera categoría incluye aquellos residuos de principal preocupación (Categoría I) y que contengan concentraciones significantes de los constituyentes que son más tóxicos, móviles, persistentes o bioacumulables. Ejemplos de esta Categoría I incluyen los siguientes:
  - a) **Residuos de Solventes Clorinados** del desengrasamiento de metales. Estos son incluidos debido a su toxicidad, movilidad y también a su posible persistencia en el ambiente;
  - b) **Residuos de Cianuros** se incluyen debido a toxicidad aguda;
  - c) **Residuos de PCBs** están en la lista debido a su persistencia y propiedades bioacumulativas.
- En la segunda categoría (Categoría II) se incluyen los que no requieren especial atención, e incluyen las **borras de hidróxidos metálicos** (excluyendo cromo hexavalente) en las cuales los metales tóxicos están en una forma relativamente insoluble y una baja movilidad.
- La tercera categoría (Categoría III) incluye un gran volumen de residuos, incluyendo productos de bajo peligro y algunos materiales putrescibles, para los cuales el corte entre peligroso y no-peligroso es menos claro.

## **9.6. Efectos ambientales de la disposición de residuos peligrosos**

Efectos adversos en la biota pueden suceder en los lugares de disposición como resultados de actividades de construcción y la subsecuente entrega de químicos tóxicos al medio ambiente. Los animales y plantas que habitan en la vecindad de estos sitios pueden ser usados para evaluar la extensión e intensidad de la contaminación; esta actividad denominada monitores biológico, generalmente se fundamenta en la medición de la concentración de los contaminantes en las especies seleccionadas para la examinación. El monitoreo biológico tiene la ventaja que los niveles de contaminantes en la biota son mucho mayores que en el ambiente físico. Esto es de particular importancia en el ambiente acuático, donde la pronunciada bioacumulación resulta en niveles marcadamente elevados de ciertos compuestos orgánicos en peces, aún en aguas que contengan bajo niveles de estos compuestos. Un aumento de la mortalidad de biota, particularmente grandes animales, puede entregar un aviso importante de la contaminación por residuos tóxicos de algún lugar de disposición. Es el caso de la muerte de peces en entregas periódicas de productos químicos a las aguas superficiales o de bahías.

### **9.6.1. Efecto en el ambiente terrestre**

Los efectos en el ambiente terrestre usualmente son de naturaleza local. Uno efecto de importancia es que la producción de gases en los vertederos disminuye el suministro de oxígeno en las capas superiores del suelo, provocando la muerte de la vegetación. Los residuos ricos en metales también inhiben la vegetación, lo cual hace susceptible a los terrenos a la erosión por el viento y las inundaciones lo cual puede provocar escape de sustancias contaminantes. Si se cubren los terrenos con residuos industriales esto puede resultar en grandes cantidades de metales y compuestos orgánicos a terrenos agrícolas. Como ciertos metales son fototóxicos y pueden

reducir el rendimiento de cultivos, y aún acumularse en los propios cultivos lo cual puede causar problemas a los consumidores humanos o animales.

### **9.6.2. Efectos en el ambiente acuático**

La eficiente dispersión que ocurre cuando los contaminantes entran a las aguas superficiales es una importante característica del compartimento ambiental. La contaminación puede llegar desde una fuente puntual de descarga, particularmente en ríos, canales de drenaje, aguas costeras, etc. Como se menciona anteriormente, la muerte de peces es la forma más visible del impacto en el ambiente.

Se debe prestar especial atención a peces recogidos en zonas cercanas a lugares de disposición. Los efectos que se observan incluyen lesiones epidermales y neoplasmas del hígado; en algunas zonas costeras estos efectos se han relacionado con elevados niveles de hidrocarburos en los sedimentos.

### **REFERENCIAS**

- **Federal Register.1986. 51 (114) (Friday, June 13): 21685. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.**
- **Federal Register.1986. 51 (216) (Friday, November 7): 40643. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.**
- **USEPA. 1986. Superfund Public Health Evaluation Manual, EPA /540/1-86/060 (October). Washington, D.C.: Office of Emergency and Remedial Response.**
- **World Health Organization, WHO, 1984. Guidelines for Drinking-Water Quality, 3 Vols. Geneva, Switzerland.**
- **Toxics A to Z, A Guide to Everyday Pollution Hazards, John Harte, Cheryl Holdren, Richard Schneider, Christine Shirley, University of California Press, 1991.**

## 9.7 Reactividad Química de Sustancias Peligrosas

### 9.7.1 Factores Físicoquímicos

#### Enlaces Químicos

La estabilidad de un compuesto químico depende únicamente de la resistencia de los enlaces químicos entre los átomos o los iones de los que está formado.

Otro aspecto a considerar es la longitud de los enlaces, que disminuye con el número de los mismos. La fragilidad aumenta con la longitud. Si tiene lugar una excitación aumenta la longitud y la fragilidad.

**Tabla . Longitudes de Enlaces**

Tipo de Enlace	Longitud en Å	Tipo de Enlace	Longitud en Å
H-H	0.70	O=O exc	1.61
H-H-exc	1.06	O-O	1.32
F-F	1.28	C≡C	1.20
Cl-Cl	1.98	C=C	1.34
Br-Br	2.28	C-C	1.54
I-I	2.66	N≡N	1.10
O≡O	1.00	N=N	1.20
O=O	1.14	N-N	1.40

#### Fuentes de Energía en las Reacciones

##### Energía de Activación [ Ley de Arrhenius ]

$$k = A e^{-E/RT}$$

**A:** factor de frecuencia  
**E :** energía de activación  
**R :** constante de los gases

#### Energía Liberada por las Reacciones

La energía de enlace es la energía necesaria para romper un enlace químico entre dos átomos. La energía de enlace puede dar una idea de la estabilidad de los compuestos, aunque la energía total de una molécula no es exactamente la suma de energías de todos los enlaces.

**Tabla . Energía de Algunos Tipos de Enlaces**

Tipo de Enlace	Energía kcal/mol	Tipo de Enlace	Energía kcal/mol	Tipo de Enlace	Energía kcal/mol
C-F	116	C=O	192	O=O	119
C-Cl	81	C-C	59	O-O	35
C-Br	68	C=C	100	N≡N	170
C-I	51	C≡C	123	N=N	80
				N=N	20

### 9.7.2. Prevision de las reacciones químicas

#### Examen de los Grupos Químicos de las Moléculas

Cuando se conoce la fórmula química de un compuesto, el examen de los grupos químicos que lo constituyen puede dar una idea bastante aproximada de su reactividad.

**Tabla . Grupos Químicos de Caracter Inestable**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos acetilénicos</li> <li>• Hidroperóxidos, ácidos orgánicos peroxidados</li> <li>• Perácidos, persales, perésteres</li> <li>• Peróxidos de dialquilo</li> <li>• Peróxidos de diacilo</li> <li>• 1,2-Epóxidos</li> <li>• Peróxidos metálicos, sales de ácidos orgánicos peroxidados</li> <li>• Acido inorgánico peroxidado</li> <li>• Hipohalogenito, halogenito, halogenato, perhalogenato</li> <li>• Sales de perclorilo</li> <li>• Compuestos nitrosados</li> <li>• Compuestos Nitrados</li> <li>• Compuestos polinitrados</li> <li>• Nitritos de alquilo o acilo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitratos de alquilo o acilo</li> <li>• Fulminatos</li> <li>• Nitruros</li> <li>• Azoduros, compuestos azido</li> <li>• Compuestos azo</li> <li>• Compuestos diazo</li> <li>• Sales de diazonio</li> <li>• Diazirina</li> <li>• Compuestos N-nitrosado</li> <li>• Compuestos N-nitrado</li> <li>• Halógenoaminas</li> <li>• Nitraminas</li> <li>• Alquilmetales</li> <li>• Hidruros de alquilmetal</li> <li>• Halógenoalquilmetales</li> <li>• Hidruros metálicos</li> <li>• Borano, arsina, fosfina, silano</li> </ul>
---	---

#### **Cálculo Termodinámico del Nivel de Riesgo**

Se puede establecer un nivel de riesgo relativo al carácter inestable de un producto o de una reacción a partir de datos termodinámicos conocidos o medidos de los elementos, grupos químicos o moléculas que constituyen el producto o los reactivos.

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T \Delta S_r$$

$\Delta S_r$  = Entropía de formación

$\Delta H_r$  = Entalpía de formación

$\Delta G_r$  = Entalpía Libre de formación

Un valor muy negativo de  $\Delta G_r$  revela un producto muy inestable o una reacción muy exotérmica. Otros parámetros termodinámicos a tener en cuenta son :

$\Delta H_d$  = Entalpía de Descomposición : Se usa para los compuestos en los que se sospecha que pueden descomponerse espontáneamente bajo el efecto de un choque o del calor.

$\Delta H_c$  = Entalpía de Combustión : Se compara con la de descomposición en el caso de las sustancias explosivas

**Tabla :  $\Delta G_r$  de algunos Compuestos en Kcal/mol**

Formula	$\Delta G_r$ a 298 °K kcal/mol	Reactividad
MgH	+34	Inflamación espontánea
MgO	-136	Oxido muy estable
AgN <sub>3</sub>	+90	Compuesto muy explosivo
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-147	Compuesto muy estable
NH <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub>	+31	Compuesto muy reductor

Si se expresa  $\Delta G_r$  en kcal/g se puede juzgar aún mejor la estabilidad de un compuesto por la energía interna que se libera en el curso de su formación.

**Tabla :  $\Delta G_r$  de algunos Compuestos en Kcal/mol  
y en Kcal/g**

Formula	$\Delta G_r$ a 298 °K		Comentario
	kcal/mol	kcal/g	
CH <sub>4</sub>	-12	-0.75	Hidrocarburo inflamable
HCO <sub>2</sub> H	-80	-17.4	Producto de Oxidación parcial
CO <sub>2</sub>	-94	-21.4	Producto de Oxidación total

### **9.7.3. Reacciones químicas peligrosas**

Existen en la literatura un elevado número de reacciones peligrosas. Las tablas siguientes citan algunos ejemplos.

**Tabla . Compuestos que Reaccionan Fuertemente con el Agua**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acidos fuertes anhídros</li> <li>• Alquilmetales y metaloides</li> <li>• Amiduros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidróxidos alcalinos</li> <li>• Hidruros</li> <li>• Imiduros</li> </ul>
---	--

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anhídridos</li> <li>• Carburos</li> <li>• Halogenuros de ácido</li> <li>• Halogenuros de acilo</li> <li>• Halogenuros imorgánicos anhídridos ( excepto alcalinos )</li> <li>• Fluor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales alcalinos</li> <li>• Oxidos alcalinos</li> <li>• Peróxidos inorgánicos</li> <li>• Fosfuros</li> <li>• Siliciuros</li> <li>• Calcio</li> </ul>
---	--

**Tabla . Compuestos que Reaccionan Violentamente con el Aire u Oxígeno [ Inflamación Espontánea ]**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alquilmetales y metaloides</li> <li>• Arsinas</li> <li>• Boranos</li> <li>• Hidruros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales finamente divididos</li> <li>• Metales carbonilados</li> <li>• Nitruros alcalinos</li> <li>• Fosfinas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fosforo blanco</li> <li>• Fosfuros</li> <li>• Silenios</li> <li>• siliciuros</li> </ul>
--	---	--

**Tabla . Sustancias Incompatibles de Elevada Afinidad**

Oxidantes con :	Nitratos, halogenatos, óxidos, peróxidos, flúor
Reductores con :	Materias inflamables, carburos, nitruros, hidruros, sulfuros, alquilmetales, aluminio, magnesio y circonio
Acidos fuertes con :	Bases fuertes
Acido Sulfúrico con :	Azucar, celulosa, ácido perclórico, permanganato potásico, cloratos, sulfocianuros

**Tabla . Reacciones Peligrosas de los Acidos**

<b>Reactivo</b>	<b>Reactivo</b>	<b>Se desprende</b>
Acido Sulfúrico	Acido fórmico	Monóxido de carbono
	Acido oxálico	Monóxido de carbono
	Alcohol etílico	Etano
	Bromuro sódico	Bromo y CO <sub>2</sub>
	Cianuro Sódico	Monóxido de carbono
	Sulfocianuro sódico	Sulfuro de carbonilo
	Ioduro de hidrógeno	Sufuro de hidrógeno
Algunos metales	Dióxido de azufre	

Acido Nítrico	Algunos metales	Dióxido de nitrógeno
Acido Clorhídrico	Sulfuros Hipocloritos Cianuros	Sulfuro de hidrógeno Cloro Cianuro de hidrógeno

**Tabla . Sustancias Facilmente Peroxidables**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eteres</li> <li>• Compuestos isopropílicos</li> <li>• Compuestos alílicos</li> <li>• Haloalquenos</li> <li>• Compuestos vinílicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos diénicos</li> <li>• Compuestos vinilacetilénicos</li> <li>• Cumeno, estireno, tetrahidronaftalenos</li> <li>• N.alquilamidas, ureas, lactamas</li> <li>• 2-Butanol, metilisobutilcetona</li> </ul>
---	--

## CAPÍTULO X

### **PLANIFICACIÓN PARA EL MANEJO SEGUROS DE SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS**

#### **10.1. Localización y edificios**

Idealmente todo lugar de almacenamiento de sustancias peligrosas deberá estar ubicada alejada de zonas densamente pobladas, de fuentes de aguas potables, de áreas con posibilidad de anegamiento y de posibles fuentes externas de peligro.

La localización debe tener un fácil acceso a los servicios de transporte y emergencia sobre terrenos estables y que soporten edificios y caminos seguros. Se deben proveer servicios adecuados tales como electricidad con suministro de emergencia si es necesario, agua potable y red de agua contra incendio, sistemas de drenajes segregados de los públicos y de aguas lluvias para evitar toda posible contaminación.

#### **10.1.2. Ubicación en planta**

La ubicación en planta o en el lugar designado debe ser diseñado de tal manera de permitir la separación de materiales incompatibles utilizando edificios o lugares separados, murallas contrafuego u otras precauciones aceptables, así como también permitir movimientos y manejo seguro de los materiales peligrosos; debe existir espacio suficiente para las condiciones de trabajo y permitir el acceso expedito por varios lados.

#### **10.1.3. Seguridad**

Se debe proteger los lugares de almacenamiento de posibles robos mediante medidas de seguridad como rejas y alarmas. Las medidas de seguridad pueden variar según la localización del almacenamiento particularmente si se trata de lugares aislados o de lugares que forman parte de un complejo de almacenaje. Con respecto a los límites el lugar de almacenamiento debe estar rodeado por una cerca o muralla protectora que debe mantenerse en buen estado. La línea de la cerca debe dejar suficiente espacio para las posibles emergencias en caso de derrames. Durante la noche se debe tener personal de seguridad o sistema de alarmas o de iluminación.

El número de puertas de acceso deben ser las mínimas consistentes con una operación eficiente. Desde el punto de vista de seguridad el número ideal de puertas es uno, pero se debe tener en cuenta del manejo de emergencias donde se pueden requerir otras puertas que permitan el paso de vehículos de emergencia de diferentes direcciones.

En cuanto al acceso al lugar de almacenamiento este debe estar implementado con sistemas de rejas y candados para cuando no este en uso. Las partes bajas deben estar construidas de materiales seguros. Las llaves deben ser colocadas en un lugar conveniente como la portería o una oficina. Cada llave debe estar claramente identificada, y no deben ser de fácil acceso al público y se debe tener una llave maestra en caso de extravió de las principales. Debe existir un número limitado de llaves maestras para el personal que puede ser llamado en un caso de emergencia.

#### **10.1.4. Diseño de sitios de almacenamiento**

El diseño del lugar de almacenamiento debe ser hecho de acuerdo con la naturaleza de los materiales a ser almacenados y con adecuados lugares de salida. Si es necesario se debe dividir las áreas y el volumen almacenado en zonas compartimentalizadas en orden de efectuar la necesaria segregación de materiales incompatibles. Los lugares deben estar suficientemente cerrados y con la posibilidad de ser protegidos. Los materiales de construcción deben ser no inflamables y el edificio debe ser de concreto armado o acero. Si es de una estructura de acero, esta debe estar protegida por aislación.

- **Paredes Cortafuego:** Las paredes externas deben estar cubiertas con acero o planchas de metal, o cuando exista riesgo de fuego deben ser de material sólido. Los materiales aislantes deben ser de elementos no-combustibles, lana mineral o fibra de vidrio. Las divisiones internas, diseñadas para actuar como rompedores de fuego deben proveer al menos 60 minutos de resistencia y se deben construir con una altura de un metro sobre el techo o tener algún otro medio de impedir la propagación del fuego. Los materiales más adecuados para combinar resistencia al fuego con resistencia física y estabilidad son el concreto, ladrillos o bloques de cemento. Para lograr la deseada resistencia al fuego, las paredes reforzadas de concreto deben tener al menos 15 cm. de espesor y las paredes de ladrillos deben ser de al menos 23 cm. Los ladrillos huecos no son apropiados. Los bloques de concreto sin reforzamiento requieren de un espesor mínimo de 30 cm. para lograr la estabilidad y fuerza requeridas. Para lograr una mayor estabilidad estructural, se recomiendan columnas de reforzamiento (pilastras) en las paredes. Las paredes contrafuegos deben ser independientes de la estructura para evitar su colapso en caso de incendios. Cuando existen cañerías, ductos y cables eléctricos, se deben colocar con sustancias retardantes del fuego. Las puertas en las paredes interiores deben tener resistencia al fuego similar a las paredes y se deben cerrar automáticamente, es decir con un sistema de fusibles activados por el sistema de detección automático de incendio. El espacio requerido para cerrar debe mantenerse libre de toda obstrucción.
- **Salidas de Emergencia:** Deben existir salidas de emergencias distintas de las puertas principales. Al planificar estas salidas debe tomarse en cuenta toda posible emergencia, siendo el requisito primario que nadie pueda quedar atrapado en el lugar. Deben estar claramente indicadas y de un diseño consistente con la seguridad de un fácil escape en caso de emergencia. Deben ser fáciles de abrir en la oscuridad o con humo denso y equipadas con

pasamanos de emergencia. El escape debe ser posible de toda área cerrada al menos en dos direcciones.

- **Pisos:** Los pisos deben ser impermeables a los líquidos. Deben ser lisos, pero no resbalosos, y libres de hendiduras para permitir una limpieza fácil y estar diseñados para la contención de derrames y aguas contaminadas en caso de incendio.
- **Drenaje:** Los drenajes o desagües abiertos deben evitarse en los lugares que almacenan sustancias tóxicas para prevenir la liberación de aguas contaminadas en caso de incendio o derrames, ya que al estar conectadas directamente al alcantarillado o río pueden causar contaminación ambiental. Sin embargo se deben diseñar desagües para las aguas lluvias en los techos y lugares exteriores. Los ductos de aguas lluvias deben ser externos en lo posible y si son internos deben ser no combustibles. Los drenajes deben estar sellados y protegidos del posible daño de vehículos. Esto se puede lograr por medio de canalizaciones de ladrillos o concreto que protejan los ductos con una altura de la menos 20 cm. Todo drenaje debe estar conectado a un pozo colector que esté protegido de aguas lluvias, para una posterior disposición.
- **Terraplenes:** En el caso de un fuego mayor que implique productos tóxicos es esencial que el agua del combate de incendio sea retenida y que no se permita que se desparrame contaminando los cursos acuáticos adyacentes. Esto se logra por medio de terraplenes o embancamientos que se pueden definir como la retención física del agua de incendios o derrames. Todos los lugares de almacenamiento de productos tóxicos deben tener terraplenes, cuyos volúmenes de retención dependen de las características peligrosas de los productos almacenados. Los siguientes valores normalizados para grandes almacenes equipados con rociadores se pueden tomar como guía.

**Tabla 10.1. Volúmenes de retención de agua de incendio en el combate de sustancias peligrosas**

Características Peligrosas de los Productos Almacenados	Volumen de Retención de Agua de Incendio m <sup>3</sup> / ton, de material
Sustancias Explosivas, de fácil inflamación	3
Sustancia de posible combustión espontánea	5
Sustancias Inflamables con punto de inflamación menor a 55 ° C	5
Sustancias Ecotóxicas, ej.: Pesticidas, Preservantes de Madera, Derivados Organoclorados, etc.	5
Sólidos Inflamables	5

Referencia: NCh389.Of72: Sustancias Peligrosas - Almacenamiento de Sólidos, Líquidos y Gases Inflamables- Medidas Generales de Seguridad.

### **10.1.5. Almacenamiento exterior**

Cuando se almacenan productos peligrosos en áreas exteriores, se deben tomar precauciones para contener cualquier derrame con pretilos o sacos de arena, además de un techo o cubierta que proteja los productos del sol y la lluvia. Esto se efectúa debido a los siguientes problemas:

- a) El almacenamiento de sustancias químicas en lugares de clima caluroso exponen estos productos a altas temperaturas que pueden causar degradación o incendios. Se debe seleccionar los productos de acuerdo a la hoja de seguridad.
- b) Para evitar la contaminación del suelo o de las aguas, las superficie de almacenamiento debe ser impermeable, y resistente al calor y al agua, evitando el uso de asfalto por su reblandecimiento en climas cálidos y el efecto de solventes.
- c) Si se usan pretilos, estos deben estar conectados con drenajes controlados por válvulas.
- d) Los materiales almacenados en esta forma deben ser revisados constantemente en cuanto a fugas para evitar contaminación de los drenajes.

## **10.2. Manejo del almacenamiento de sustancias peligrosas**

### **10.2.1. Condiciones de la operación**

Para el manejo de sustancias peligrosas se deben tener instrucciones escritas para todo el personal que incluyan:

- a) Instrucciones de la operación segura y correcta de todos los equipos y del almacenamiento de los materiales peligrosos;
- b) Hojas de datos de Seguridad para todos los productos transportados y almacenados;
- c) Instrucciones y procedimientos sobre Higiene y Seguridad;
- d) Instrucciones y procedimientos sobre emergencias.

### **10.2.2. Recepción, despacho y transporte de sustancias**

Cuando se recepcionen sustancias peligrosas se debe tener una clara identificación de los productos por medio de la hoja de seguridad y por la especificación de la factura. Se deben incluir las características del producto, la cantidad y la condición de transporte. Si las sustancias o los envases no están en buenas condiciones y presentan un posible peligro, se deben tomar las

acciones necesarias para evitar accidentes. Los productos químicos peligrosos nunca se deben transportar junto a productos de otro tipo como alimentos por ejemplo.

Los vehículos que transportan sustancias peligrosas deben tener toda la documentación apropiada, como la hojas de seguridad, tarjetas de emergencia en transporte, etc.

Esta tarjeta debe incluir:

- a) La compañía que envía el producto, con su dirección, número de teléfonos y personas de contacto en caso de emergencia;
- b) el producto que se está transportando;
- c) los peligros básicos y las precauciones a ser tomadas;
- d) las acciones a tomar en caso de accidente o derrames de los productos.

Debe contar también el vehículo, con extinguidor de incendios, y con equipo protector para ser utilizado por el conductor.

### **10.3. Planificación del Almacenamiento de Sustancias Peligrosas**

Si se almacenan grandes cantidades de productos peligrosos, se debe dejar espacio entre las paredes externas y los envases o paquetes, para permitir un acceso a la inspección, un libre movimiento del aire y espacio para combate de incendios. Los productos se deben ordenar de manera que las grúas horquillas puedan moverse libremente y también los equipos de emergencia. Se deben marcar las rutas de movimiento de el piso claramente y mantenerlas libres de obstrucción para evitar accidentes.

La altura de los paquetes no debe exceder los tres metros a menos que se utilice un sistema de repisas con escaleras que evite que puedan caer los productos y asegure su estabilidad. Se debe prestar especial atención a los productos que tengan signos de “Este lado hacia arriba”.

Se debe tener una clara distribución de los productos almacenados y de la naturaleza de su peligrosidad en cada sección del almacenamiento; se deben separar por materiales con similares características y por números en cada sub-sección o área separada. Esta información se debe tener a mano en las oficinas principales y ser actualizada constantemente. Un inventario completo de los materiales almacenados y su ubicación se debe tener en forma actualizada y completa.

#### **10.3.1. Separación y segregación de productos**

La palabra “**separación**” significa la colocación de diferentes grupos de productos en áreas separadas en el sitio de almacenamiento. El uso de la palabra “**segregación**” significa la

separación física de diferentes grupos de productos, es decir en lugares de almacenamiento distintos o separados por una pared contra fuego en un mismo lugar de almacenamiento.

El objetivo principal de la separación y segregación de productos es para minimizar los riesgos de incendio o contaminación que a menudo se presentan en lugares a almacenamiento mixto de sustancias incompatibles. La correcta separación también minimizará las zonas de peligro y los requerimientos de pretilos y la instalación de equipo eléctrico protegido.

La regla básica en el almacenamiento de sustancias peligrosas es no mezclar envases o paquetes de diferentes tipos de riesgos de acuerdo a los símbolos de la Clasificación de Sustancias Peligrosas de las Naciones Unidas. Se debe considerar además:

- Los líquidos altamente inflamables y los cilindros de gas se deben almacenar o instalar en zonas externas;
- Los materiales que son posibles de explotar en un incendio (por ejemplo, cilindros de gases o aerosoles) deben mantenerse separados de otros materiales inflamables.

### **10.3.2. Transporte interno de sustancias**

Si se utilizan grúas horquillas para trasladar sustancias peligrosas estas pueden ser del tipo diesel, eléctricas o a gas licuado o gasolina. Por lo tanto se deben de tomar las precauciones adecuadas para la protección contra-llamas de estos equipos en los escapes y los motores. Los servicios de cambio de baterías para las grúas operadas eléctricamente deben estar ubicadas en áreas ventiladas y no cercanas a los productos almacenados. Esta área se debe mantener limpia y libre de todo tipo de combustible y estar ubicada en una área segregada de la instalación. La ventilación del área de recargo de baterías debe localizarse en la parte superior de las paredes para permitir la dispersión adecuada del hidrógeno que se genera durante la carga. Esto también es valido para grúas del tipo a gas licuado.

### **10.3.3. Higiene personal y equipamiento de seguridad**

Se deben tener las ropas adecuadas así como también las instalaciones de cambio y lavado de ropas en un área separada y limpia donde el personal pueda comer en forma segura. Se debe tener el cuidado de un lavado frecuente de las ropas contaminadas o sucias ya sea en la propia instalación o fuera de ella en entidades especiales.

**No se debe permitir comer, beber o fumar en las áreas de trabajos donde existan sustancias peligrosas.**

Para trabajo rutinario con sustancias peligrosas se debe contar al menos con el siguiente equipamiento de seguridad:

- a) Casco protector o gorro protector;

- b) Lentes de seguridad o anteojos de seguridad;
- c) Mascaras para polvo o gases peligrosos;
- d) Guardapolvo o traje de trabajo;
- e) Guantes de goma o plásticos;
- f) Delantal plástico o de goma;
- g) Zapatos o botas de seguridad.

El tipo de operaciones que se efectúan determinará que equipamiento de seguridad se debe utilizar. Equipo especial de emergencia debe mantenerse en la parte exterior de las instalaciones en proximidad a las entradas.

#### **10.3.4. Derrames y fugas de contenedores y envases**

Para minimizar los peligros, todos los derrames o fugas de materiales peligrosos deben atacados inmediatamente, con previa consulta a la hoja de seguridad de la sustancia. Para tratar con derrames, los siguientes equipos son recomendables:

- a) Equipo de protección personal;
- b) Tambores vacíos, de tamaño adecuado;
- c) Material autoadhesivo para etiquetar los tambores;
- d) Material absorbente: arena, polvo de ladrillo, aserrín;
- e) Soluciones con detergentes;
- f) Escobillones, palas, embudos, etc.

Todo el equipo de emergencia y seguridad debe ser revisado constantemente y mantenido en forma adecuada para su uso eventual. El equipamiento de protección personal debe estar descontaminado y debe ser limpiado después de ser utilizado.

Los derrames líquidos deben ser absorbidos en un sólido absorbente adecuado tales como arena, polvo de ladrillo o aserrín, los cuales no se deben usar sin embargo en el caso de líquidos inflamables ó líquidos fuertemente oxidantes. El área debe ser descontaminada de acuerdo a las instrucciones dadas en las hojas de seguridad, y los residuos deben ser descartados de acuerdo a instrucciones adecuadas.

Los sólidos derramados deben ser aspirados con aspiradoras industriales. Se pueden utilizar palas y escobillones pero minimizando la generación de polvo utilizando arena, etc.

#### **10.3.5. Disposición de residuos**

Todos los residuos incluyendo material de empaque, deberá ser desechado de una manera ambientalmente segura y responsable. Residuos potencialmente peligrosos incluyen productos obsoletos, productos fuera de especificación, material contaminado, residuos líquidos y

material absorbente que ha sido utilizado para limpieza de derrames. La disposición ambientalmente segura de estos residuos es a menudo difícil y se debe consultar personal experto o a las autoridades responsables. A menudo las Hojas de Seguridad pueden indicar la forma más adecuada de disposición de sustancias químicas. Todos los recipientes contaminados que no se reutilicen deben ser descontaminados y descartados en forma adecuada.

### **10.3.6. Primeros auxilios**

Toda instalación que maneje productos peligrosos debe tener servicios de primeros auxilios y personal entrenado en procedimientos de emergencia. Los equipos de primeros auxilios deben incluir:

- a) Duchas de emergencia y sistemas de lavado de ojos;
- b) Botiquines de primeros auxilios;
- c) Mantas de incendios;
- d) Alumbrado y linternas de emergencia.

El equipamiento de primeros auxilios debe ser frecuentemente revisado y en perfecta mantención para asegurar su uso. Se deben efectuar arreglos con hospitales locales para la asistencia inmediata en caso de emergencias, tales como intoxicaciones agudas. El hospital o los doctores deben estar informados de la naturaleza de los productos químicos manejados y deben manejar los antídotos necesarios. En caso de emergencia las etiquetas o las hojas de seguridad deben ser enviadas al doctor junto al paciente.

Para asesoría detallada sobre primeros auxilios en relación a productos determinados, se debe consultar la HOJA DE SEGURIDAD. Sin embargo lo siguiente se debe considerar como una guía general:

1. **Exposición a humos o vapores:** Remover la persona afectada inmediatamente al aire libre. Obtener asistencia médica.
2. **Contacto con ojos:** Lavar profusamente con agua por 15 minutos. Obtener asesoría médica.
3. **Contacto con la piel:** Lavar pronta y profusamente con agua, después de remover toda la ropa contaminada. Esta debe ser puesta en bolsas plásticas para posterior descontaminación o disposición. Obtener asesoría médica.
4. **Ingestión:** No induzca vómito a menos que sea indicado por asesoría médica o lo indique la hoja de seguridad.
5. **Quemaduras:** El área afectada debe ser enfriada lo más rápido posible con agua fría hasta que el dolor cese. Si la piel es afectada, cubrir con una gasa esterilizada. No se debe extraer la gasa adherida. Obtener asistencia médica.
6. En todos los casos, después del tratamiento de primeros auxilios se debe obtener asistencia médica profesional.

### **5.3.7. Entrenamiento, auditoría y permisos de trabajo**

Es fundamental efectuar un entrenamiento en seguridad y manejo seguro de productos peligrosos para todo el personal. Reuniones regulares de seguridad, sesiones de entrenamiento y prácticas de emergencia se deben efectuar como una oportunidad para revisar las instrucciones, los planes de emergencia y la información relevante que sea de utilidad para el personal.

Todos los miembros de la brigada contra incendios deben ser entrenados en el uso del equipamiento contra incendios así como en los planes de emergencias. Una buena auditoría minimizará los daños, las fugas y los riesgos de incendios así como también conducirá a una operación segura y eficiente.

Las siguientes prácticas se deben observar:

- a) Los materiales deben ser frecuentemente inspeccionados para localizar fugas o daños mecánicos;
- b) Los pisos deben mantenerse limpios y libres de polvo con particular atención en superficies grasosas;
- c) Toda el área debe mantenerse libre de polvo, trapos, basura, disponiendo de recipientes adecuados metálicos o plásticos para recoger los residuos en forma regular.
- d) Todos los envases vacíos de combustibles deben mantenerse fuera del área de almacenamiento de productos peligrosos;
- e) Después de todo trabajo, incluida la mantención, los materiales y equipos se deben limpiar adecuadamente;
- f) Todas las vías de evacuación, y equipo de emergencia se debe mantener en forma adecuada.

Un “**permiso de trabajo**” consiste en un documento escrito autorizando al personal para trabajar en una labor no rutinaria, advirtiendo los posibles daños o peligros y detallando las medidas de prevención a tomar para asegurarse de que el trabajo será efectuado en forma segura. Esto se aplica particularmente, al acceso a estanques, o acciones que puedan suponer peligros de incendios tales como, quemado de pinturas, soldaduras, u operaciones similares que se efectúan en la cercanía de material inflamable, así como también trabajo eléctrico. Este control también se debe aplicar a personal contratista.

### **10.3.9. Inspecciones de seguridad**

Es recomendable que inspecciones de seguridad se organicen regularmente para asegurar que los objetivos de seguridad son entendidos por el personal, y para que las deficiencias sean corregidas y para estimular la concientización y preparación para emergencias.

### **10.3.10. Señales y símbolos**

El uso de signos y símbolos indicando restricciones para fumar, localización de equipo de emergencia, teléfonos y vías de escape son recomendables. Las instrucciones de seguridad debe estar en un lenguaje claro y en el idioma adecuado. El uso de símbolos fáciles de entender es altamente recomendable.

#### **10.4. Procedimientos de emergencia generales**

Una emergencia en un laboratorio o cualquier lugar de almacenamiento de sustancias peligrosas, puede ser potencialmente una fuente de peligro para las personas, el ambiente y la población vecina, además de la pérdida de valiosos productos e instalaciones. Por ejemplo, un fuego o incendio que envuelva productos que pueden producir gases o humos nocivos o tóxicos o que puedan descomponerse cuando se calientan, pueden causar un alto riesgo, o al menos grandes trastornos a la comunidad. El uso excesivo de agua en el combate del incendio, puede también causar en caso de materiales tóxicos la contaminación de aguas superficiales, subterráneas o del suelo. Ocasionalmente, la correcta decisión puede ser la permitir el incendio total en vez de arriesgar una contaminación por el uso de un exceso de agua en el combate contra incendios.

La protección contra fuegos exitosa debe incluir los siguientes pasos:

- a) Una rápida detección del fuego;
- b) Una rápida alarma a los servicios de bomberos y de emergencia;
- c) Un rápido combate del fuego, pero sólo por personal entrenado.

En forma similar, una exitosa protección contra la contaminación ambiental ya sea por causa del fuego, derrames u otras causas, debe incluir:

- a) Una rápida detección de las emisiones/descargas (o riesgos);
- b) Una rápida contención de la descarga;
- c) Un rápido aviso a las autoridades;
- d) Una rápida absorción, neutralización, disposición del contaminante.

Debe efectuarse una eficiente coordinación con las brigadas de bomberos locales, en especial las de especialidad química, para tener una asistencia inmediata en caso de un incendio. Debe además contarse con una brigada contra incendio interna, de modo de tomar la responsabilidad de actuar en caso de incendio, de llevar inventarios o auditorías regulares, de estar informada de la naturaleza de los productos químicos o peligrosos existentes, además de conocer todos los riesgos asociados a la operación de las instalaciones.

El personal que trabaja en las instalaciones debe ser entrenado en el combate contra el fuego, debiéndose efectuar ejercicios o simulacros en forma regular para revisar las condiciones de los equipos de combate contra el fuego y familiarizar al personal en su uso.

#### **10.4.1. Planes de emergencia**

En conjunto con las Autoridades locales y el Cuerpo de Bomberos, el Plan de Emergencia debe incluir un sistema de alarma y un procedimiento de evacuación. Todo Plan de Emergencia debe incluir dos partes: un plan de emergencia interno y un plan de emergencia externo.

##### **a) Plan de emergencia interno**

Un conjunto de procedimientos diseñados para proteger el personal que trabaja en las instalaciones, y para combatir y manejar las emergencias que puedan poner en riesgo las vidas y las propias instalaciones. Este plan debe ser preparado por personal a cargo de las instalaciones o un comité de seguridad.

##### **b) Plan de emergencia externo**

Este plan comprende un conjunto de procedimientos diseñados para proteger a la población, las propiedades y el ambiente que rodea las instalaciones, de las posibles consecuencias de una emergencia originada en el interior de la propiedad. Este conjunto de procedimiento debe ser preparado por la autoridad local apropiada en cooperación con la autoridad interna que debe proporcionar toda la información necesaria que este en su posesión, como por ejemplo, listado de materiales peligrosos, lugares de almacenamiento, etc. Con respecto a lo anterior, una guía de mucha utilidad lo entrega el manual del PNUMA sobre Concientización y Preparación para Emergencias a Nivel Local, (APELL, Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level) diseñado para asistir a los niveles de gobierno local y personal técnico en mejorar la conciencia de la comunidad sobre las instalaciones peligrosas y en preparar los planes de respuesta en caso de que eventos no esperados en este tipo de instalaciones pueda poner en peligro vidas, la propiedad o el medio ambiente.

#### **10.4.2. Detección de incendios y equipo de protección**

Si se considera apropiado, se pueden instalar detectores de incendio que entregan un alarma temprana y que son particularmente útiles en instalaciones que permanecen sin personal durante los fines de semana o festivos o fuera de las horas de trabajo normal. Sin embargo, mucha de la ventaja inicial se pierde si las brigadas de bomberos llegan después de 15 minutos de iniciado el fuego al sitio de la emergencia.

##### **a) Detectores de incendio**

Existen distintos tipos de detectores de incendio, entre los que se pueden contar los **detectores de llamas**, que son del tipo infrarrojo o ultravioleta o ambos; **detectores de humo**, que son de dos tipos, por “ionización” o por “efecto óptico”, cada uno tiene su aplicación específica que debe ser consultada con un especialista; **detectores de calor**, que son generalmente menos afectados por falsas alarmas que los de humo, sin embargo, por definición solo responden cuando un fuego ha desarrollado suficiente calor y por lo tanto se pueden ver como de acción retardada.

### **b) Sistema de Rociadores (Sprinklers)**

Un sistema de rociadores consiste en una red de cañerías y válvulas sensibles al calor llamados cabezales rociadores. En un sistema automático de rociadores, cada cabezal está equipado con un sensor térmico o bulbo de vidrio de cuarzo el cual, a una temperatura predeterminada, permitirá la salida de agua o agua-espuma al área inmediata. Por este medio, un fuego puede ser automáticamente detectado, dada la alarma, y mantener el fuego controlado hasta el arribo de la brigada contra incendios. La ventaja de este sistema, comparado con los detectores de calor y de humo, es que entrega una protección continua contra el fuego, y simultáneamente, puede ser utilizado para iniciar una alarma para la brigada de bomberos. Es decir, un sistema automático de rociadores tanto detecta como combate el incendio. La principal desventaja es el costo. El alto costo de instalación solo justifica su uso en grandes instalaciones industriales o comerciales, o cuando el riesgo es de alta magnitud, o cuando los tiempos de respuesta de las brigadas contra incendio son muy prolongados. También se debe tener en cuenta el hecho de que el agua no es siempre el mejor sistema de extinción.

### **c) Sistemas de Respuesta**

Los sistemas de detección ya sean detectores de humo o de calor o de rociadores tienen un valor limitado si no gatillan una respuesta efectiva. Por lo tanto es esencial que la alarma este conectada a un punto de control, o mejor aún a una brigada del cuerpo de bomberos. Es particularmente importante en el caso de instalaciones que permanecen sin personas en horas de noche o en fines de semana. Es de vital importancia que los sistemas de detección sean revisados continuamente por personal especializado.

Donde existan grifos contra incendios, estos deben estar adecuadamente indicados de modo que todas las áreas de riesgo puedan ser alcanzados al menos por dos mangueras, de grifos distintos. Una fuente de agua alternativa puede ser una estanque de agua contra incendio.

Si se requiere por el tipo especial de productos almacenados, se puede contar con sistemas de mangueras retráctiles, pitones de agua a presión o con espuma, y otros tipos de equipos como monitores de televisión, mantas contra el fuego, polvos químicos, etc.

Los extinguidores de tipo portátil deben ser seleccionados de acuerdo con los materiales almacenados, y deben ser colocados estratégicamente en lugares apropiados. Todo el material de detección y protección debe ser regularmente inspeccionado por personal competente al menos una vez al año y se debe efectuar la mantención adecuada para asegurar que se puedan usar satisfactoriamente. Un diagrama indicando la distribución del equipo contra incendio debe mostrarse al menos en dos lugares de las instalaciones, y también en las oficinas del director del establecimiento.

#### **10.4.4. Medios de combate contra incendios**

Los medios de combate contra incendios deben escogerse de acuerdo a su modo de acción y su uso en el combate o prevención del fuego, y también dependiendo de los materiales que se almacenen en las instalaciones.

##### **a) Agua**

El agua actúa como un medio enfriante, es decir reduce la temperatura del producto que se quema hasta un punto por debajo del punto de inflamación y por lo tanto extingue el fuego. El agua debe ser usada preferentemente en forma de rocío fino o de neblina en vez de un chorro. Esto permite aumentar el potencial de enfriamiento y prevenir la extensión del fuego. Además del uso como elemento de extinción, el agua actúa como elemento de minimización de la extensión del fuego al usarse en el enfriamiento de materiales, estanques, equipos, cañerías, etc.

Se debe tener el cuidado sin embargo, al usar grandes cantidades de agua para atacar incendios con productos tóxicos debido al problema de la contaminación o de los reactivos que pueden reaccionar con agua de manera peligrosa. Agua nunca debe utilizarse con reactivos tales como carburo de calcio, isocianatos, óxido de calcio (caliza), ciertos compuestos de halógenos tales como cloruro de acetilo, cloruro de aluminio, y metales como sodio y calcio. Cuando se almacenen este tipo de materiales se debe discutir los riesgos especiales con las brigadas de bomberos. El uso de agua con extinguidores debe dirigirse directamente a la base del fuego.

##### **b) Polvos químicos secos**

Estos son efectivos generalmente sobre solventes inflamables, aerosoles, y productos que reaccionan adversamente con agua y también en incendios eléctricos. Sin embargo los polvos químicos secos se utilizan normalmente en forma portátil en extinguidores para tratar fuegos pequeños y por lo tanto aunque se consideran de alto valor, son básicamente de uso en una

primera etapa solamente. El uso de los polvos químicos se debe dirigir a la base del fuego y moverlo hacia arriba en el incendio.

### c) Dióxido de carbono y halones

Los extinguidores de dióxido de carbono y los halones son generalmente efectivos para solventes inflamables y productos que reaccionan con agua y en incendios eléctricos. Sin embargo, al igual que los polvos químicos, solo se usan como ayuda primaria. Además debido al efecto de la destrucción del capa de ozono por los fluoroclorocarbonos (halones), el uso de los halones será progresivamente disminuido. En el uso de CO<sub>2</sub> y halones se debe descargar lo más cerca posible del fuego y moverlo de arriba hacia abajo.

### d) Espumas

Un número de diferentes tipos de espumas existen en forma comercial y son recomendables para ciertas clase de productos químicos, pero se requiere una destreza especial para su aplicación, siendo preferible en la mayoría de los casos utilizar polvos químicos.

Para productos que son inmiscibles en agua, tales como petróleo, kerosene, petróleo combustible e hidrocarburos en general (hidrocarburos solventes, benceno, estireno, etc.) estos son atacados eficientemente con espuma de fluoroproteínas o espuma de film acuoso. Para productos que son miscibles en agua las espumas son efectivas en incendios en que intervengan productos tales como alcoholes, cetonas, éter glicol, etc.

Espumas resistentes al alcohol se recomiendan para incendios en que intervengan pesticidas. Sin embargo debido a que contienen agua, las espumas no deben utilizarse en productos que reaccionan con agua o en incendios eléctricos. Para el combate con espuma no se debe dejar caer la espuma en el líquido en fuego. Permitir que la espuma caiga sobre el fuego.

**Tabla 10.2 Resumen del Uso de Extinguidores**

<b>Decida la Clase de Fuego que se esta Atacando</b>		<b>Coordine Extinguidor con Clase de Fuego indicado a la izquierda</b>					
<b>TIPO DE EXTINGUIDOR</b>							
<b>Clase de Fuego</b>	<b>Espuma</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Agua</b>	<b>Estanque bomba</b>	<b>Cartucho de Gas</b>	<b>Polvo Químico Multipro pósito</b>	<b>Polvo Químico Ordinario</b>
<b>CLASE Combustibles</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>

<b>Madera, Papel Textiles, Orgánicos</b>								
<b>CLASE Líquidos Inflamables Gasolina, Pinturas Aceites, etc.</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	
<b>CLASE Equipo Eléctrico Motores, Circuitos Eléctricos, etc.</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	

#### **10.4.5. Ubicación de extinguidores y mangueras**

Los extinguidores para la protección general deben ser ubicados lo más cerca posible de las salidas de emergencia de los edificios. Sin embargo, donde existan riesgos específicos, los extinguidores apropiados deben ser ubicados cerca de estos riesgos, como por ejemplo extinguidores de CO<sub>2</sub> en asociación con unidades de recarga de baterías.

Donde existan áreas no divididas extensas y se necesiten varios extinguidores, estos se deben colocar en puntos intermedios en las rutas de escape. Se deben colocar unidades a 30 metros una de la otra excluyendo cualquier extinguidor instalado para riesgos especiales. Los extinguidores deben estar ubicados en posiciones claves y estar accesibles para su uso inmediato. Deben estar suspendidos en ganchos, de modo que el tope del extinguidor no esté a más de 1 metro del nivel del suelo. Se deben colocar avisos en las paredes para indicar claramente su posición.

Los extinguidores para protección general (de agua y/o polvo seco) deben estar distribuidos a través de las instalaciones en base a una unidad por cada 200 metros cuadrados, con un número no menor a dos unidades.

Los extinguidores llenos con agua deben tener una capacidad no menor a 9 litros (peso total 12-15 kg.) mientras que los de polvo seco no deben ser de menos de 10 kg. de capacidad (peso total 15-20 kg.). Estas unidades tendrán un tiempo de descarga de 60 y 20 segundos respectivamente.

Donde se instalen mangueras contra incendio, estas deben poder llegar a cualquier parte de las instalaciones.

#### **10.4.6. Combate del fuego**

En el caso de incendio, se deben efectuar las siguientes acciones en forma inmediata, y simultáneamente según el tipo de emergencia:

- a) Sonar la alarma y despejar el área de todo el personal excepto de los que participan en la emergencia;
- b) Llamar a las brigadas contra incendio especiales del cuerpo de bomberos;
- c) Tratar de extinguirlo, si es posible, y si no lo es, al menos limitarlo y prevenir que se extienda a otras instalaciones adyacentes hasta el arribo de bomberos, sin provocar el riesgo a las vidas humanas;
- d) Asegurarse que los encargados de las instalaciones sean avisados y estén pendientes de la llegada del cuerpo de bomberos;
- e) Considerar la posibilidad de evacuar las instalaciones y actuar de acuerdo a los riesgos envueltos;
- f) Avisar a los servicios médicos correspondientes;

Para combatir el incendio, se deben tomar las siguientes medidas:

- a) Trabajar con el viento a favor y no en contra.
- b) Trabajar lo más lejos posible de la fuente del fuego en caso de una posible explosión, y enfriar las instalaciones adyacentes con agua.

En incendios de gran tamaño, si no se puede contener el incendio y existe un serio riesgo de contaminación de los cursos de aguas, siempre que no exista posible daño a las personas u otras propiedades cercanas, la decisión de detener el combate del fuego puede causar un daño global menor. Si así se hace existe un menor riesgo de contaminación ambiental debido a aguas contaminadas y como no efectúa enfriamiento, la combustión de los productos tóxicos es más completa.

#### **10.4.7. Protección ambiental y de la comunidad**

Cuando se produce un incendio en instalaciones que almacenan sustancias peligrosas, los principales riesgos ambientales se deben a las emanaciones de gases de combustión, flujos de aguas de incendio contaminadas y contaminación del suelo por agua contaminada o por residuos de la combustión. Cuando existe el riesgo de contaminación ambiental por humos pesados, gases tóxicos u otros productos, las autoridades de bomberos pueden decidir pedir a la población que se quede en sus casas con puertas y ventanas cerradas, o dependiendo de la situación o del posible riesgo de explosión pueden decidir la evacuación. Este tipo de decisiones deben discutirse previamente entre las autoridades locales y bomberos de acuerdo a los planes de emergencia existentes.

La posible inundación de los drenajes con las aguas contaminadas del combate del incendio, puede producir contaminación de aguas superficiales o subterráneas y daño al medio ambiente. Es esencial por lo tanto que en estos casos se retengan las aguas del incendio por

medio de pretilos o se utilicen cantidades limitadas de agua. Par prevenir una mayor contaminación del suelo y aguas subterráneas, toda el área de incendio debe ser cuidadosamente limpiada.

#### **10.4.8. Operaciones de limpieza**

Después de un incendio, se debe efectuar una limpieza total por personal experto para protección de las personas y para prevenir una mayor contaminación ambiental.

##### **a) Acciones iniciales**

El área afectada debe ser aislada y protegida para que no entre ninguna persona no autorizada. Se deben colocar señales de advertencia y solo se permitirá personal de limpieza en el área. Se deben tomar precauciones para asegurar que no se muevan productos tóxicos fuera del área, y que el personal físicamente envuelto en la limpieza esté en conocimiento de los riesgos y toxicidad de los productos y que cuente con la ropa de protección adecuada. Si existe una probabilidad de contaminación del agua de combate del incendio el área debe cercarse con un sistema de retención o pretilos de sacos de arena o tierra.

##### **b) Procedimientos de limpieza**

El objetivo inicial debe ser el de separar los restos del incendio en las siguientes categorías:

- a) Agua retenida del combate al incendio;
- b) Residuos o productos sólidos y líquidos;
- c) Restos de material contaminados;
- d) Objetos dañados y no dañados.

El segundo objetivo es la disposición segura de los restos del incendio, lo cual se debe efectuar por personal especializado, así como también el traslado del material no dañado. El agua retenida en el incendio debe ser analizada por una posible contaminación. Si está limpia, puede ser descargada en los drenajes, pero debe hacerse con la aprobación de las autoridades locales. Si está contaminada, debe descontaminarse, por medio de métodos adecuados y conforme a las indicaciones de las hojas de seguridad respectivas. Una forma de descontaminación puede ser por evaporación (climas cálidos) siempre que el contaminante no sea volátil, recolectando las borras obtenidas en contenedores especiales para ser tratados como residuos peligrosos.

Los residuos sólidos deben ser recolectados y puestos en contenedores herméticos, mientras que los productos líquidos deben ser absorbidos y recolectados y colocados en envases seguros y tratados como residuos peligrosos. Los productos químicos dañados deben ser decantados en contenedores especiales, etiquetados y tratados como material obsoleto, mientras que los productos químicos ni dañados deben ser re-localizados adecuadamente.

Siempre que sea posible, se debe utilizar equipamiento mecánico para manejar los restos del incendio y minimizar el contacto humano con los materiales contaminados. Se debe efectuar la notificación de las Autoridades respectivas, del plan de limpieza a efectuar,. En muchos casos la cooperación y ayuda de las autoridades es de muy útil, y deben estar completamente informadas. Se deben analizar todas las aguas superficiales o subterráneas posiblemente contaminadas así como también la contaminación aérea para determinar posibles productos tóxicos en el área afectada.

### **c) Descontaminación de instalaciones y equipos**

Los equipos, herramientas, e instalaciones deben ser descontaminadas con una solución al 5 % de soda cáustica o una solución al 10 % de carbonato de sodio, y lavadas profusamente hasta que queden limpias.

### **d) Protección personal**

Para la protección personal en las operaciones de limpieza, se deben tomar las siguientes precauciones:

- a) Entregar las ropas de protección limpias y el equipamiento adecuado;
- b) Cuando se abandone el área se debe lavar y utilizar duchas de lavado con abundante jabón y agua para remover todas las trazas de productos químicos tóxicos y cambiarse por ropas limpias;
- c) Lavar todas las ropas personales;
- d) Verificar todo posible síntoma de envenenamiento o intoxicación, ya que estos efectos pueden no aparecer inmediatamente.

## **10.5. Planificación del Manejo Seguro de Residuos Peligrosos**

Una vez que los problemas de residuos peligrosos han sido reconocidos será necesario formular políticas y estrategias para atacarlos. Se debe desarrollar la legislación, regulaciones y planes para los lugares de reciclo, tratamiento y disposición de los residuos.

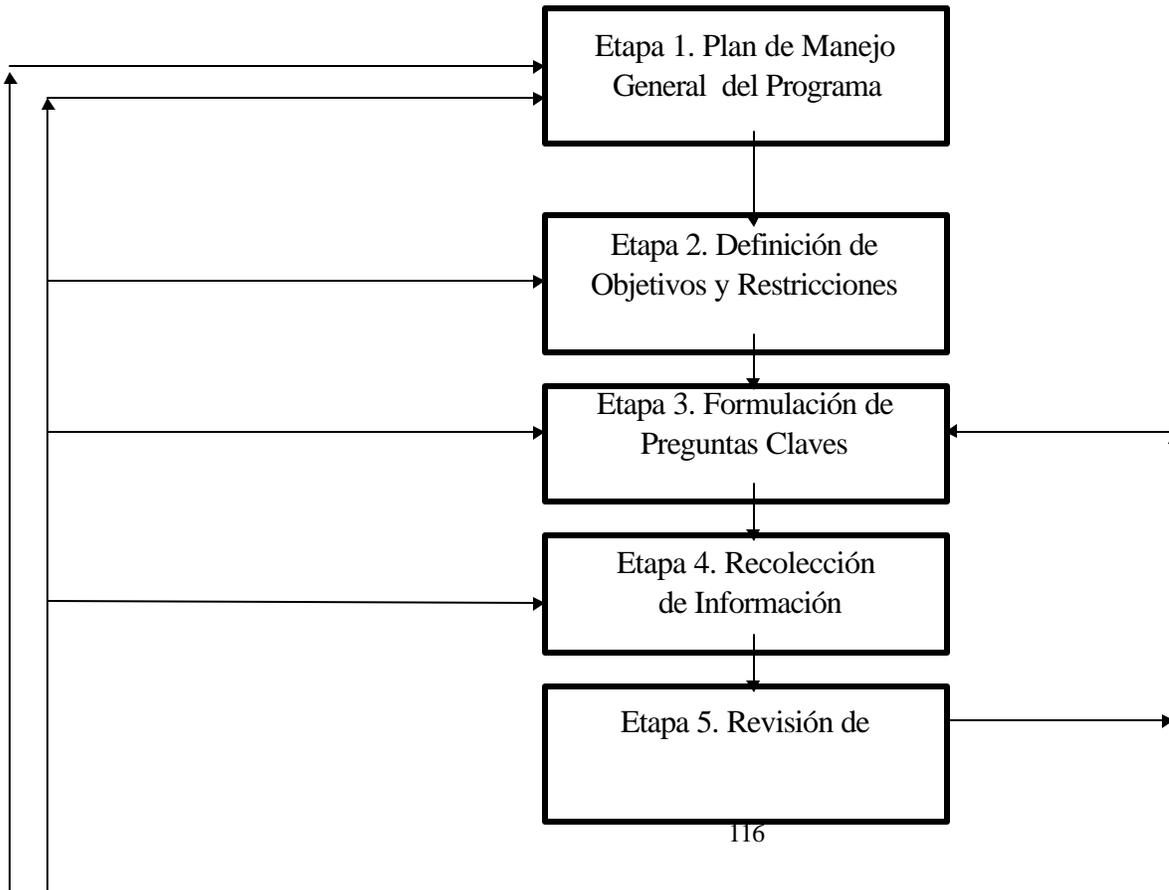
### **10.5.1 Planificación sistemática**

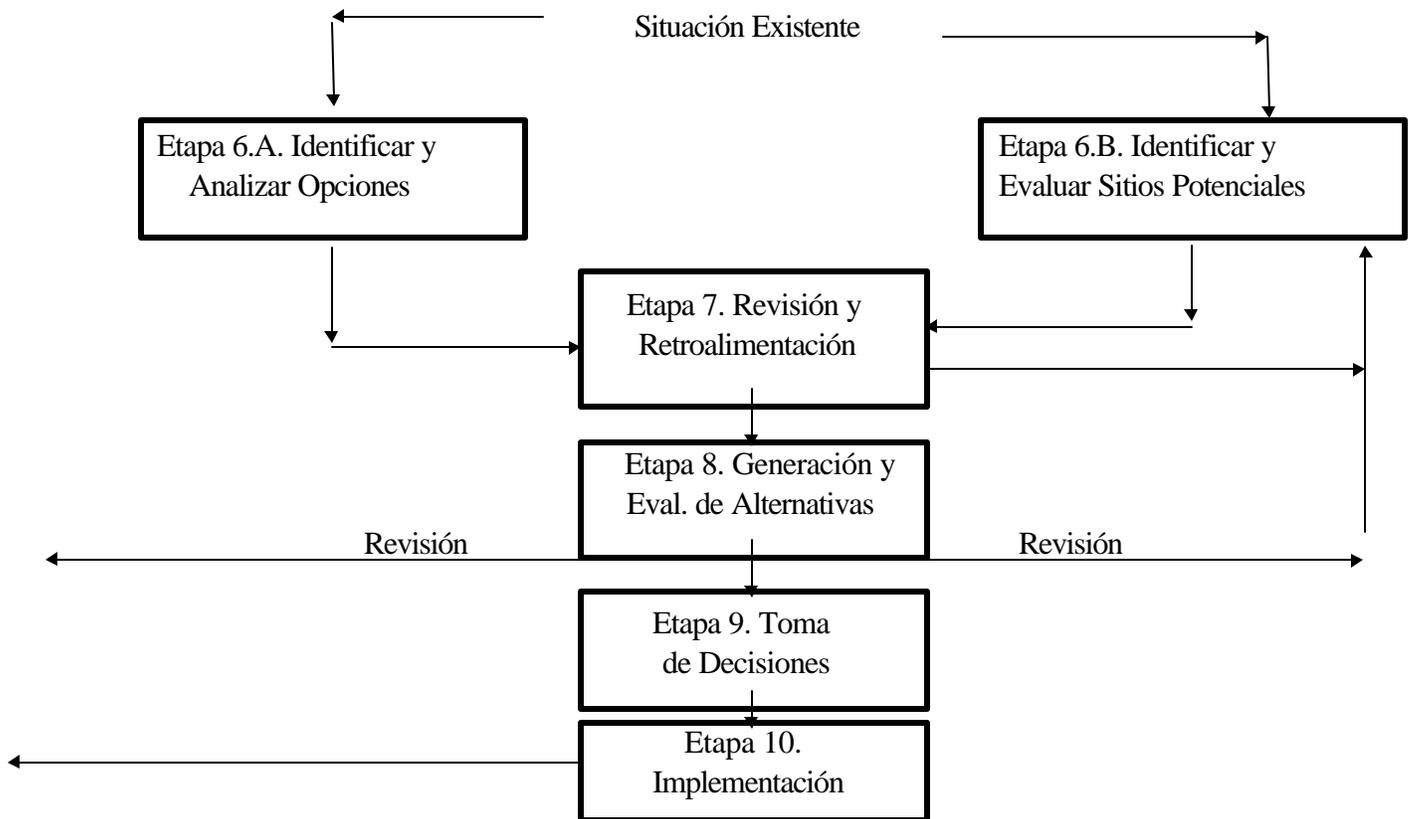
Los pasos o etapas que intervienen en un plan de manejo de residuos peligrosos son los siguientes:

- Etapa 1.** Plan de Manejo General del Programa
- Etapa 2.** Definición de Objetivos y Restricciones
- Etapa 3.** Formulación de Preguntas Claves
- Etapa 4.** Recolección de Información
- Etapa 5.** Revisión de Situación Existente
- Etapa 6.A.** Identificar y Analizar Opciones
- Etapa 6.B.** Identificar y Evaluar Sitios Potenciales
- Etapa 7.** Revisión y Retroalimentación
- Etapa 8.** Generación y Evaluación de Alternativas
- Etapa 9.** Toma de Decisiones
- Etapa 10.** Implementación

El siguiente diagrama muestra las interacciones entre las distintas etapas:

**Figura 5.1. Etapas de un plan de manejo de residuos peligrosos**





### **Etapa 1. Plan de manejo general del programa**

Existe un gran número de elementos básicos que necesitan ser considerados para desarrollar el plan general. Estos incluyen:

- Cantidades y tipos de residuos a ser cubiertos;
- Componentes del sistema de manejo (ej.: almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición) a ser incluidos en el plan;
- Área geográfica para la cual debe prepararse el plan;
- El tiempo ha ser analizado;
- Responsabilidad del Gobierno versus Sector Privado.

### **Etapa 2. Definición de objetivos y restricciones**

#### **a) Criterios de evaluación de objetivos**

Es importante desde un comienzo del proceso de planificación tener una clara idea de los objetivos que se desean lograr por medio de un plan de manejo de residuos peligrosos. Estos objetivos deben ser transformados en criterios simples y claros a ser utilizados para evaluar las opciones y planes alternativos.

El objetivo principal de cualquier plan de manejo de residuos peligrosos es asegurar la segura, eficiente y económica recolección, tratamiento y disposición de los residuos; y asegurar que el sistema es confiable ahora y en el futuro.

Este amplio objetivo significa tener en cuenta una serie de criterios entre los cuales se cuentan:

- **Efectos de Salud:** Reducir los riesgos asociados con el almacenamiento, recolección, tratamiento y disposición de residuos.
- **Impacto Ambiental:** Reducir los riesgos de contaminación ambiental asociados con el tratamiento y disposición de residuos.
- **Seguridad Técnica:** Asegurar que las tecnologías de tratamiento sean probadas, seguras, flexibles y duraderas en las condiciones locales.
- **Aceptación Política:** Pueden ser objetivos locales, una maximización del número de trabajos creados; y la aceptación pública de las instalaciones.
- **Recuperación de Recursos:** Para maximizar la utilización de tanto los materiales como el valor de combustible de los residuos. Minimizar el uso de terrenos o recuperar terrenos de poca calidad.
- **Viabilidad Económica:** Tratar de minimizar costos comparado con otras alternativas.
- **Conservación de Recursos:** Para minimizar la cantidad de residuos generados y asegurar que todos los residuos son recogidos, tratados y dispuestos apropiadamente.

## b) Restricciones

Existen una variedad de restricciones a considerar en países en desarrollo:

- **Restricciones Financieras**
- **Restricciones de Recursos Técnicos y Humanos**
- **Restricciones de Uso de Terrenos**
- **Restricciones Ambientales Locales**
- **Restricciones de Tiempo**

## Etapa 3. Formulación de preguntas claves

Habiendo definido el plan general, los objetivos a realizar y las restricciones principales, es posible formular una serie de preguntas claves que se necesitan analizar en el plan.

- ¿ Cuales son las cantidades existentes, que composición y localización tienen los residuos que requieren tratamiento y disposición ?
- ¿ Pueden ser segregados los residuos ?

- ¿ Como están actualmente almacenados, como son recolectados y transportados estos residuos ? ¿ Cuales son los principales problemas y dificultades de estos residuos ?
- ¿ Como son reciclados, tratados o dispuestos estos residuos ?
- ¿ Qué opciones de reciclado, transferencia, tratamiento o disposición existen para evitar estos problemas ?
- ¿ Qué número de instalaciones deben proveerse ? ¿ Deben servir a industrias individuales o a grupos de industrias ? ¿ Donde deben estar localizadas ?
- ¿ Es la organización actual adecuada para el manejo de residuos ? ¿ Es la legislación adecuada ? ¿ Existen suficientes recursos para implementar el uso de estas instalaciones ?

#### **Etapa 4. Recolección de información**

##### **a) Información inicial**

Información es requerida en todas las etapas de la preparación del plan de manejo de residuos. Cinco áreas en particular se identifican donde se requiere de información:

- Fuentes actuales, cantidades y composiciones de los residuos;
- Predicción futura de la producción de residuos;
- Instalaciones existentes y prácticas actuales de manejo de residuos;
- Información sobre alternativas de tratamiento y disposición de residuos, es decir instalaciones industriales existentes (hornos de cemento, incineradores, etc.) que puedan ser adaptadas para el tratamiento de residuos;
- Mercado actual potencial para la recuperación de materiales y energía a partir de residuos peligrosos.

##### **b) Información sobre generadores de residuos**

Siempre existe poca información sobre las fuentes, cantidades y tipos de residuos peligrosos producidos en el área. Cuatro formas de recolectar antecedentes se pueden tomar:

- Un estudio preliminar puede entregar valores de orden de magnitud, basados en experiencia internacional;
- Los residuos pueden ser monitoreados en las instalaciones de tratamiento o disposición;
- Una encuesta simple de generadores de residuos puede efectuarse usando un cuestionario por correo, en entrevistas o una combinación de ambas;
- Una encuesta exhaustiva se puede efectuar, pero solo cuando se ha implementado un sistema de regulación para controlar los residuos peligrosos.

#### **Etapa 5. Revisión de situación existente**

Después de una recolección primaria de información, se requiere un revisión objetiva de la situación actual, con el propósito de focalizar la planificación en los problemas significativos y ver lo inadecuado de las instalaciones. El recolectar información es a menudo significa consumo de

tiempo y recursos. Para mejorar el manejo de residuos, a menudo se requieren algunos gastos. Estos incluyen:

- Costos de capital para terrenos, equipos e instalaciones;
- Costos de mantención y operación asociados con los sistemas de manejo de residuos, incluyendo los recursos humanos y programas de capacitación;
- Costos administrativos y de control de regulación asociados con el sistema de manejo escogido.

#### **a) Consideraciones económicas**

- A. Costos y beneficios
- B. ¿Quién Paga: El que Contamina o la Sociedad ?

#### **b) Consideraciones Financieras**

- A. Análisis Financiero
- B. Desarrollo de Datos de Costo
- C. Fuentes y Métodos de Financiamiento
  - Acciones
  - Leasing
  - Impuestos
  - Cargos, permisos
- D. Identificar Responsabilidades de las Agencias
- E Preparación de un Plan Financiero
- F. Privatización
- G. Sistemas de Recolección de Ganancias

### **Etapa 6.A. Identificar y analizar opciones**

#### **a) Jerarquía de opciones**

Para cualquier flujo en particular de residuos, es posible definir una jerarquía de opciones preferidas, que pueden ser consideradas con el fin de limitar la cantidad de los residuos que necesitarán ser descartados en forma final. En general la secuencia jerárquica será:

- Evitar el residuos o reducción en la fuente;
- Reciclo o recuperación de recursos;
- Tratamiento por medios físicos, químicos o biológicos para destruir, convertir o inmovilizar los constituyentes peligrosos de los residuos;
- Incineración para destruir los residuos orgánicos;
- Disposición en tierra; y
- Disposición en océanos.

## b) Opciones practicables

En esta etapa se debe hacer un esfuerzo para identificar y discutir un número de opciones simples que pueden utilizarse cuando las cantidades de residuos son pequeñas o los recursos no son suficientes para justificar instalaciones convencionales. Ejemplos de estas opciones son:

- Lagunas de evaporación solar para secar o desaguar borras;
- Usar pozos de evaporación para cantidades pequeñas de solventes, cuando su recuperación o incineración no es posible;
- Encapsulación en cemento de pequeñas cantidades de residuos muy peligrosos, antes de enterrarlos en vertederos;
- Adaptación de hornos de cemento o caliza, o de hornos industriales para quemar residuos peligrosos;
- Uso de Incineradores en áreas aisladas para quemar pequeñas cantidades de residuos peligrosos;
- “Estabilización” de borras de aceites mezclándolas con arena o materiales similares. El producto se puede usar como sustituto de asfalto.

## **Etapa 6.B. Identificar y Evaluar Sitios Potenciales**

### a) Principios generales

Las instalaciones mayores para el manejo de residuos deben ser ubicadas de acuerdo a una planificación que incluya criterios de: seguridad, ambientales, sociales, políticos y restricciones técnicas. Las metas de la elección del lugar deben incluir:

- Minimizar los riesgos de salud ; Maximizar la aceptación de la comunidad;
- Minimizar el impacto ambiental ; Minimizar los costos.

### b) Factores de elección de lugares de disposición

Un ejemplo de factores para elegir los lugares de disposición de residuos peligrosos se entregan en la siguiente tabla.

**Tabla 6.1. Factores de lugares de disposición**

#### **Restricciones Físicas**

Tipos de Suelos  
Geología y acuíferos  
Topografía  
Aguas Superficiales  
Inundaciones  
Estabilidad Sísmica  
Estabilidad Terreno

#### **Restricciones Ecológicas**

Flora y Fauna  
Valor de Conservación  
Valor Habitacional  
Valor Paisajista  
**Valores Humanos**  
Estética  
Valor Recreacional

Dirección de Vientos

Caminos y accesos

**Uso de la Tierra**

Valor Agrícola

Industria Minera

Suministro de Agua

(Superficial o subterránea)

Desarrollos Potenciales

Servidumbres / transporte

Uso residencial/industrial

Histórico/Arqueológico

Cultural

Densidad Población

Empleos

**Disposición de Residuos**

Proximidad a usuarios

Acceso a transporte

Disponibilidad de servicios

Zonas adyacentes

Modificaciones de terrenos

**Etapa 7. Revisión y retroalimentación**

El proceso de planificación del manejo de residuos no es una secuencia lineal de etapas, sino que una estructura compleja donde se aprende por experiencia y se utiliza la información para reevaluar los pasos precedentes.

En este punto del procedimiento, es posible puntualizar los problemas críticos a los que se enfrenta la región o área de estudio, y hacer una lista de las opciones técnicas para resolver estos problemas.

La retroalimentación será necesaria para:

- Revisar los alcances del plan;
- Reexaminar los objetivos y las restricciones;
- Obtener una mejor información en ciertos aspectos claves.

**Etapa 8. Generación y evaluación de alternativas**

A continuación de la revisión y retroalimentación, el planificador debe formular una corta lista de tecnologías para el manejo de residuos peligrosos que son potencialmente atractivas en términos de necesidades y circunstancias locales.

Para evaluar los planes alternativos, es importante considerar la facilidad de implementar los diferentes sistemas. Las preguntas que se deben considerar incluyen:

- ¿Que regulaciones se requieren para asegurar que el sistema funcione ?
- ¿ Cuán fácil será utilizar este sistema ?
- ¿ Existen diferencias significantes en el sistema organizacional requerido ?
- ¿ Como se comportará el sistema total si falla en alguna parte ?

- ¿ Como se financiará el sistema ?

### **Toma de decisiones e implementación [ Etapas 9 y 10 ]**

En principio, una vez que los planes alternativos han sido evaluados, es posible para los planificadores escoger entre las ventajas y desventajas y seleccionar el plan preferido.

La implementación de un plan de manejo de residuos peligrosos no depende simplemente del mandato de las autoridades. Debe ser un ejercicio cooperativo entre las autoridades, los productores o generadores de residuos y aquellos que operan las instalaciones, incluso incluyendo al la comunidad.

## **10.6 Respuesta de Emergencia en el Transporte de Materiales Peligrosos**

### **10.6.1 Introducción a la Respuesta de Emergencia**

Los despachadores de materiales peligrosos y transportistas se supone que se han ejercitado en extremo en la preparación, manejo y transporte de materiales peligrosos, de tal forma de asegurar el cumplimiento de todas las regulaciones, y así asegurar su reputación, y de la mano de esto, controlar los probables riesgos de exposición a estas sustancias. Sin embargo, por mas que se tomen las precauciones pertinentes y se adopten estrictas regulaciones, cuando se trata de

transportar materiales peligrosos siempre existe el riesgo inherente de que ocurra un accidente, hecho ante el cual se necesita de una respuesta inmediata. Estos riesgos incluyen daños a los contenedores causados por incidentes en el manejo, en los procesos de carga y descarga, o debido a la colisión o movimiento abrupto del vehículo de transporte. Afortunadamente, los modernos vehículos y sistemas de transporte como los materiales de los envases usados para las sustancias peligrosas son diseñados, construidos y regulados para minimizar estos hechos y para proteger la carga de daño alguno. Un profesional del transporte debe adoptar importantes reglas para el traslado seguro de la carga. Por ejemplo, debe abstenerse de realizar partidas y paradas súbitas, conducir a altas velocidades ni tener una conducción con movimientos erráticos que causen una innecesaria inestabilidad de la carga. Siempre debe utilizar las herramientas adecuadas en el manejo de los envases y controlar cualquier pérdida o goteo de los envases tales como cilindros o tambores y siempre asegurar y bloquear bien la carga. Todas estas medidas han nacido de la experiencia y la enseñanza de manejo de estos productos.

Sin embargo, en limitados casos, ocurren daños en la carga transportada fallando el envase que los contiene, dando como resultado derrames o fugas del contenido. Cuando esto ocurre, es el conductor la primera persona en la escena del accidente y su actuación puede ser determinante en la protección de la vida humana, la propiedad y el medio ambiente. Una instrucción adecuada con el equipo apropiado puede ser la principal diferencia entre un incidente menor y una catástrofe. En algunos casos, el tipo y la cantidad de material involucrada en el derrame puede requerir una inmediata notificación para sumar la asistencia de profesionales y así proporcionar una adecuada respuesta. Para un control de la renovación del ambiente, de la protección de la seguridad y la salud de las personas, en ciertas fugas de materiales peligrosos transportados se requieren de regulaciones específicas que promuevan una evaluación de los accidentes en dirección de un plan preventivo.

La principal responsabilidad en la escena de una posible fuga de un material peligroso es la protección de la vida del conductor y de las personas expuestas al peligro o daño a la salud. Cualquier respuesta indebida a la emergencia puede derivar en un riesgo innecesario y en consecuencias serias.

### **Información de Respuesta de Emergencia**

En el Decreto 298 y otras Normas chilenas, se describen requerimientos que proporcionan y mantienen una información de respuesta de emergencia durante todas las fases del transporte, incluyendo la carga, traslado, almacenamiento, o cualquier otro manejo de tales materiales, y aplicarlas a todas las personas con tales obligaciones, incluyendo a los conductores. La información requerida debe estar inmediatamente disponible para usarla en cualquier momento, y

debe estar disponible en una agencia gubernamental representativa que responda a la escena de un accidente o incidente o que conduzca una investigación. Los conductores deben asegurarse que las hojas de despacho proporcionadas tengan información referida a respuesta de emergencia, o en documentos anexos, priorizando la aceptación de materiales peligrosos en consignación. Los conductores sujetos a inspección por parte de la autoridad, o en la escena de un accidente, serán los responsables de dar toda la información disponible inmediatamente.

Muchas hojas de despacho de materiales peligrosos, las cuales acompañan estos envíos, deben contener suficiente información para proporcionar una mitigación más efectiva de un accidente y debe contener como mínimo la siguiente información:

- requiere de una descripción de partida
- inmediato peligro a la salud
- riesgo de fuego o explosión
- precauciones inmediatas en caso de accidente o incidente
- métodos inmediatos para manejo de incendios
- contención inicial del derrame o fuga
- primeras medidas de auxilio

La información debe ser proporcionada:

- en una hoja de despacho
- en una Hoja de Datos de Seguridad del Material (siglas en inglés, MSDS) la cual incluye la descripción básica requerida por el DOT, o
- en conjunción con la hoja de despacho requerida, para proporcionar una guía de respuesta de emergencia (en inglés, ERG) o las páginas con las propiedades de tal guía tomadas como referencia del DOT

Para mayores detalles con respecto a la información que debe contener una Hoja de Seguridad (MSDS) y la guía de despacho, consultar las “Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas” de las Naciones Unidas, 8a De. , 1984.

La información de respuesta de emergencia debe ser mantenida por el conductor en la cabina, así como también la guía de despacho, y ambas deben estar accesibles inmediatamente.

Toda esta información es la mínima que debe enviar el despachador cuando ofrece materiales peligrosos para el transporte. Estos documentos podrían ser la primera fuente de información considerada por el conductor que empaquea o transporta en vehículo un material peligroso que ha sido dañado ocurriendo una fuga de este material. En el caso de una emergencia en el transporte, el conductor debiera chequear la entrada del o los materiales involucrados, para determinar el número de teléfono de respuesta de emergencia del o los despachadores, en caso de una inmediata llamada en caso de ser necesario para determinar los contenidos o peligros o

más detalles descriptivos de la carga en el envío. Los papeles de envío deben estar escritos para cada material peligroso, incluyendo el nombre del propietario del envío, en caso que sea necesario llamarlo inmediatamente para conocer más detalles del contenido, peligros y descripción de la carga enviada. La descripción de los papeles de envío para cada material peligroso, incluyendo el nombre del propietario del envío, clase(s) de peligro subsidiario y la división(s), número de identificación, y la cantidad, la cual puede estar escapando o se ha escapado. Con toda esta información y los documentos de Información de Respuesta de Emergencia establecer las acciones a seguir.

Sería apropiado examinar el documento de respuesta de emergencia para determinar los peligros y hacer evaluaciones de la respuesta inicial, si la hay, la cual podría intentar razonablemente el conductor. Por lo tanto estos documentos podrían estar disponibles para los que responden a la emergencia cuando ellos llegan a la escena. La información de respuesta de emergencia requiere ser proporcionada por el que despacha, suministrándosela al que responde con las recomendaciones de acción, incluyendo métodos contra incendio, síntomas de exposición y tratamiento médico, datos de reactividad, consideraciones de posibles evacuaciones, etc. Estos documentos pueden incluir una **Material Safety Data Sheet (MSDS)**, una **Emergency Response Guidebook (ERG)** o referencias de páginas de la **ERG**, u otros papeles, los cuales proporcionan un complemento a las regulaciones.

## Uso de la Guía de Respuesta de Emergencia

Muchas empresas que despachan materiales peligrosos usan la Guía de Respuesta de Emergencia (ERG) o una página de ella, para satisfacer los requerimientos en cuanto a proporcionar información de respuesta de emergencia. Los conductores debieran familiarizarse con la Guía de Respuesta de Emergencia (ERG) con el propósito que en un tiempo breve actuar en una emergencia. La ERG esta pensada para ser usada como una guía en cuanto a las decisiones concernientes a los procedimientos propios del manejo de emergencias.

Las *páginas amarillas* en la parte frontal del libro contienen un listado secuencial de los Números de Identificación asignados a los materiales peligrosos (números de la UN o NA). Cada número I.D. es seguido por el número de guía recomendada y el nombre del material. Cuando el número de identificación de un material peligroso puede ser determinado mediante la revisión de los papeles de envío, marcas del envase, marcas del vehículo en las placas o carteles naranjas, u otra fuente, entonces será útil identificarla por el nombre y obtener el Número de Guía.

Las *páginas azules* de la ERG contienen un listado alfabético de muchos químicos. Si es útil determinar el nombre del material de los papeles de envío, marcas del envase, u otra fuente, se mira de arriba en el listado alfabético en las páginas azules y determinar el Número de Guía recomendado y el número de identificación.

Las páginas de la ERG que se distinguen por un *borde naranja* y que están numeradas con los Números de Guía. Después de determinado el Número de Guía recomendado por las páginas amarillas o azules, hojear hasta las páginas de borde naranja en el cual se despliega el número correspondiente. La página del Número de Guía apropiado proporcionará información de los peligros potenciales, acciones de emergencia, contra incendio, y primeros auxilios. Estos materiales listados destacados con un asterisco seguido del nombre del embarque son también incluidos en una tabla de aislación y distancia de evacuación al final de la ERG.

Los conductores están prevenidos de que la información en la ERG es una guía general y se debiera usar en lugar de que se dispongan de mayores datos técnicos. La ERG sólo debiera ser usado como una información inicial para asistir hasta que llegue personal profesionalmente entrenado en la respuesta de emergencias.

A **CHEMTREC** se le menciona a menudo como una fuente de información de respuesta de emergencia. CHEMTREC es una sigla que corresponde a *Chemical Transportation Emergency Center*, el cual es un servicio público de la Chemical Manufacturers Association (CMA) en Washington, D.C. CHEMTREC también se contrata para proporcionar un contacto telefónico de respuesta de emergencia, requerido para cualquier regulación. CHEMTREC esta funcionando las 24 horas del día, los siete días a la semana como una fuente de información

técnica, aconsejando y asistiendo a profesionales en la identificación de los peligros materiales, sus propiedades, medidas de mitigación en la escena que involucra una emergencia química. El número CHEMTREC esta libre de la tarifa de llamada de larga distancia, y su número es el **800-424-9300**. También las empresas productoras de materiales peligrosos deben tener un número telefónico que atienda las 24 horas del día, los siete días a la semana. En el caso de OXY-Chile se cumple plenamente este requisito, siendo su teléfono de emergencias el

### **Respuesta a una Emergencia Actual**

Una respuesta pronta a una emergencia en el transporte de materiales peligrosos depende antes que nada del entrenamiento y de la inmediata disponibilidad de equipos. En ausencia de instrucción y equipo alguno esencial para el incidente específico, la inmediata respuesta puede ser simplemente **mantenerse alejado del peligro** y llamar a un supervisor y/o a una autoridad. Una persona que ha recibido un extenso entrenamiento y que ha sido provisto de equipo contra incendio de líquidos inflamables puede actualmente ser equipado y necesitar suficiente entrenamiento para responder a emergencias que involucran materiales radioactivos, explosivos, corrosivos o gases agudamente tóxicos. Agencias gubernamentales (ONEMI, por ejemplo) pueden también ejercer jurisdicción sobre conductores y puede también requerir de un nivel mínimo de entrenamiento para emplearlo en la tarea de respuesta de emergencia. Las regulaciones de estas pueden requerir personal con equipo de protección específico para el nivel de respuesta de emergencia el cual no va más allá de una prevención o contención inicial del derrame o incidente. **RECONOCER LAS LIMITACIONES!. NO INTENTAR RESPONDER A UN NIVEL MÁS ALLÁ DE SU CAPACIDAD!. SIEMPRE INSPECCIONAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y LOS PROPIOS NIVELES DE PROTECCIÓN POR LOS PELIGROS APLICABLES ANTES DE USAR EQUIPO DE RESPUESTA DE EMERGENCIA!**

### **Exigencias de los Informes de Emergencias**

Existen regulaciones que proporcionan una guía específica para el informe de accidentes e incidentes de materiales peligrosos. Las exigencias para el informe de las cantidades de material peligroso en el lugar del incidente ocurrido, aseguran ciertas facilidades, pues mientras el material peligroso se está transportando, incluyendo carga, descarga y de almacenamiento casual o cualquier medio de violación de la carga, están sujetas a las exigencias de informe del Decreto 298 del Ministerio de Transporte y telecomunicaciones . Del instante que los materiales se transportan están bajo el control del transportista, y por tanto se le aplica este decreto.

## **Notificación Inmediata**

Las regulaciones requieren que lo más rápido posible, prácticamente en el momento (lo cual significa dentro de lo razonablemente posible), el transportista **DEBE** notificar al organismo encargado. En Estados Unidos se debe notificar al US Department of Transportation al teléfono 1-800-424-8802 a cualquier hora durante el curso del transporte que:

1. Como un resultado directo de los materiales peligrosos:
  - ◆ una persona murió o una persona está herida y requiere hospitalización; o
  - ◆ los daños a la propiedad exceden los US\$50000; o
  - ◆ una evacuación del público, una o más horas de duración en el lugar; o
  - ◆ una o más rutas o medios de transporte mayor están suspendidas por una o más horas;
  - ◆ o los planes de vuelo o la rutina del avión se cambió
2. Un envío de material radiactivo (Clase 7) está envuelto en un incendio, escape, derrame, o se sospecha contaminación; o
3. Una sustancia infecciosa (División 6.2) está envuelta en un incendio, fuga, derrame, o se sospecha contaminación; o
4. Ha ocurrido el escape de un Contaminante Marino de una cierta cantidad (400 kg o 450lt); o
5. Una situación peligrosa continúa saliendo, y que no corresponda a alguno de los criterios aquí listados.

Cuando se reporta un accidente con materiales peligrosos, la información requerida debe ser lo más específica. Esta información debe incluir:

1. El nombre de la persona que llama.
2. El nombre y dirección de la empresa transportista involucrada.
3. El número telefónico donde el que reporta puede ser contactado.
4. Día, hora, y ubicación del accidente.
5. Algún herido(s).
6. El nombre del envío, clase de peligro, y la cantidad de material(es) involucrada.
7. Tipo de incidente, en el que están envuelto los materiales peligrosos y si hay un constante peligro a la vida.

### **5.6.2 Fuga y Contención de Derrames Líquidos de Materiales Peligrosos**

Contener el derrame de un material peligroso reduce los daños al ambiente, facilita las operaciones de limpieza, y previene o minimiza la dispersión en los cursos de agua. Cuando se idea una estrategia de contención, se deben considerar los movimientos vertical y horizontal del derrame. Suelen presentarse problemas de limpieza como resultado de no considerar los movimientos laterales del derrame contenido pero donde se pasó por alto su filtración vertical.

Hay muchas técnicas y herramientas para la contención, pero las acciones más efectivas serán determinadas por las características de la sustancia química, el volumen derramado, y parámetros específicos del sitio tales como las condiciones climáticas y la proximidad de cursos de agua. Es útil familiarizarse con algunas estrategias y equipos de contención y entonces adaptarlas a las condiciones del sitio y del químico derramado.

### **Contención en Tierra**

Los derrames que ocurren en tierra son, en muchos casos, más simples de contener que en el agua. Donde posiblemente, un derrame se podría aislar enteramente de un curso de agua o drenar el área, mientras que en el agua aumentan las dificultades de limpieza y contención.

En algunos casos, la maquinaria pesada se puede necesitar para crear diques o tranques o traer consigo materiales adicionales. La primera consideración podría estar dada a lo que es la seguridad de los operarios quienes podrían tener que trabajar muy próximos al derrame. De aquí que sería necesario proporcionar ropa de protección y equipo de respiración para realizar cualquier procedimiento de descontaminación necesario.

**Tabla 10.3: Métodos de Contención. Derrame en tierra.**

Técnica	Consideraciones
Diques de tierra	<p>a. Método- levantar una barrera de tierra o rápidamente improvisar el material disponible y empacar con maquinaria pesada.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- retroexcavadoras y palas o bien equipo pesado, dependiendo del tamaño del derrame; también pueden ser útiles sacos de arena y expertos operadores de maquinaria pesada.</p> <p>c. Recomendaciones para su uso- desviar el derrame en excavación lo más lejos de alcantarillas, entradas de hombre, cursos de agua; aislar y confinar el derrame.</p> <p>d. Limitaciones- el suelo puede absorber parte del material derramado; algunos suelos no son apropiados; el equipo pesado puede no estar disponible inmediatamente.</p> <p>e. Volumen Derramado- cualquiera sea el tamaño.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- puede incrementarse el volumen de material contaminado.</p>
Excavación	<p>a. Métodos- derrame confinado en depresión, concavidad, charca, acequia; si es posible, limitar el área contaminada y cubrir el producto contenido.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- retroexcavadoras y palas o bien equipo pesado en grandes derrames; plásticos, lonas, cubiertas de material vinílico; expertos operadores de maquinaria.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- emplee las acequias de drenado disponible o depresiones para confinar el derrame, minimizando la extensión lateral; cubra para reducir las fugas de vapor, limite el área contaminada para minimizar la filtración por el suelo.</p> <p>d. Limitaciones- el terreno puede ser inaceptable para excavar; los líquidos pueden filtrarse por el suelo; grandes cantidades de material tendrían que ser movidas para hacer una excavación adecuada.</p> <p>e. Volumen Derramado- grandes derrames requieren de las más grandes áreas de retención, posiblemente más equipamiento y mayores tiempos de excavación, a menos que se disponga de depresiones naturales.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- puede incrementarse el material residual; debe redepósitoarse el material excavado.</p>
Diques Comerciales	<p>a. Método- confinar o desviar el material derramado materiales comerciales compatibles.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- arcilla de bentonita granular mezclada con agua espuma de poliuretano de contenedores presurizados; generación en conjunto de espuma portátil; no requiere de especialistas.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- desviar los derrames de sistemas de drenaje, cursos de agua, derrames confinados de pequeño tamaño.</p> <p>d. Limitaciones- la espuma de poliuretano unida tiene limitaciones de almacenaje y baja temperatura, y no se adherirá a la superficie húmeda; el material arcilloso granular debe estar mezclado con agua, material seco; los productos comerciales no están disponibles.</p> <p>e. Volumen Derramado- para grandes derrames primeramente hay que desviar lo más alejado de las vertientes de aguas.</p>

## **Contención en Agua**

Los derrames que entran en los corrientes de agua pueden presentar algunas dificultades problemáticas a la hora de la contención. Esto es especialmente válido si se presentan movimientos rápidos del agua. El material derramado puede ser transportado muy rápidamente y esparcirse sobre una extensa área. Algunos materiales son más duros que el agua y desciende hasta formar una capa insoluble la cual se mueve a lo largo del fondo de la corriente o río. Otros materiales son solubles en agua y se mezclan completamente con el agua. Otros derrames de materiales son cualquiera de los dos insoluble o sólo moderadamente insoluble, de tal forma que flotan en la superficie del agua.

Las siguientes dos tablas describen algunas técnicas de contención para materiales derramados sobre el agua.

**Tabla 10.4: Métodos de Contención. Derrames en agua.**

Técnica	Consideraciones
Excavación	<p>a. Método- excavación de tranques o depresiones y diques en el fondo del canal navegable más allá de los movimientos del producto derramado (figura 9, Apéndice 4), construcción de bermas o diques corriente abajo en un ángulo de excavación que permita recoger el producto y restringir los movimientos corriente abajo; la recuperación debería comenzar inmediatamente.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- palas, retroexcavadoras, draga cavadoras dependiendo del tamaño y la profundidad del curso de agua y del volumen derramado; pueden ser útiles los sacos de arena como bermas; operadores expertos, y posiblemente incluir buzos.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- el confinamiento de derrames pequeños más pesados que el agua, entorpecen los movimientos en canales navegables.</p> <p>d. Limitaciones- grande, los cuerpos de agua profunda lo hacen logísticamente difícil; las velocidades de flujo rápidas previenen el encierro; el equipo puede no estar disponible inmediatamente, los movimientos del derrame deben ser rastreados; los materiales del fondo pueden no ser adecuados para la excavación.</p> <p>e. Volumen Derramado- dependerá del área de excavación para el confinamiento.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- el material excavado puede haber sido redepositado; el material suspendido de la excavación aumenta la turbidez del agua.</p>
Natural	<p>a. Método- los naturales son barreras preexistentes o depresiones que contienen los derrames más pesados que el agua.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- ninguno</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- Reconocimiento de estos sitios importantes para el despliegue de estos aparatos.</p> <p>d. Limitaciones- no siempre en el área derramada</p> <p>e. Volumen Derramado- depende del tamaño de la depresión, de la efectividad de la barrera.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- ninguno.</p>

Tabla 10.5: Métodos de Contención. Derrames en el agua. Materiales que son solubles.

Técnicas	Consideraciones
Obstrucción mediante barreras	<p>a. Método- collar de flotación inflado con aire de material de plástico reforzado con fibra, cortina plástica de 25 pies, e inflable y con sello en el fondo y ancla o soporte para proporcionar una completa aislación en círculo del agua contaminada. Está repleto de agua hasta el fondo.(figura 10, Apénd. 4)</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- empaque con barreras de obstrucción; compresor de aire, bomba de agua; 1 a 2 botes con motor; 5 hombres entrenados en el despliegue.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- aguas tranquilas, menos de 25 pies de profundidad, el tiempo para el despliegue puede ser prolongado, afectando eso sí su utilidad.</p> <p>d. Limitaciones- disponibilidad limitada, dificultad para desplegarla en 0.75 millas por hora o mayores; 25 pies de profundidad máxima; despliegue en un tiempo prolongado, dificultad para obtener buenos sellados.</p> <p>e. Volumen Derramado- las secciones de las barreras pueden ser unidas cuando están a 200 pies de distancia y a 25 pies de profundidad.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- puede ser peligrosa para la navegación.</p>
De Desviación	<p>a. Método- aislación del agua contaminada, desviación de lo <b>no contaminado</b> (del "agua limpia") alrededor del área contaminada vía bombeo de <b>agua</b> o canales.(figura 11, Apénd. 4)</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- un volumen alto de bombeo con un soporte capaz de controlar el flujo de agua; equipos de movimiento de tierra para cavar canales y desviar las aguas; operarios entrenados</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- pequeños cuerpos que fluyen en el agua y donde lo que esta contaminado puede ser identificado y aislado.</p> <p>d. Limitaciones- grandes cantidades de material pueden haber sido excavada; tan altos volúmenes de bombeo pueden no ser alcanzados; las velocidades de flujo rápidas pueden conducir a áreas extremadamente grandes de contaminación para ser aislada y tratada; las áreas contaminadas deben ser identificadas.</p> <p>e. Volumen Derramado- no hay límite.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- el material excavado puede haber sido redepositado; se pueden tratar grandes volúmenes de agua contaminada.</p>

Técnicas	Consideraciones
Contención	<p>a. Método- sacos de arena, tierra, existiendo aparatos de control de enteros tales como esclusas, compuertas, para aislar cuerpos enteros del agua contaminada.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- equipo de movimiento de tierra; sacos de arena; operadores entrenados; ciudadanos u oficiales gubernamentales encargados del control de los aparatos existentes.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- pueden ser usados en grandes cuerpos de agua, materiales que estén realmente disponibles, fáciles de construir.</p> <p>d. Limitaciones- los cuerpos de agua deben ser contenidos, al fluir en canales navegables hacen que sea una medida temporal o impracticable; el suelo es permeable al material.</p> <p>e. Volumen Derramado- no hay límite.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- se pueden tratar grandes volúmenes de agua contaminada.</p>

Los materiales que flotan en el agua son normalmente más fáciles de detectar y monitorear y relativamente fáciles de contener. Muchas de las tecnologías para la contención han provenido de la limpieza en la industria de derrames de aceite, adaptándose apropiadamente para varios tipos de materiales peligrosos.

**Tabla 10.6: Métodos de Contención. Derrames en el agua.  
Materiales que flotan.**

Técnica	Consideraciones
---------	-----------------

Comercial	<p>a. Método- colocación de una barrera flotando en una trayectoria de obstrucción del derrame para contener o desviar.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- cerca comercial, circular, obstrucción mediante barreras tipo inflables; líneas clasificadas, flotadores, anclas, puede o no puede requerir bote y motor para el desplazamiento; personal con algunos conocimientos en el manejo recomendado.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- todo tipo de agua, condiciones del agua; variedades disponibles para corrientes rápidas, actúa con olas altas, las barreras de obstrucción inflables son mejores para olas altas, chequear al compatibilidad del elastómero con los materiales peligrosos.</p> <p>d. Limitaciones- puede impedir la navegación; puede no estar disponible lejos de los canales navegables mayores; contendrá desechos flotantes; las corrientes rápidas disminuyen la utilidad de la contención; las olas altas disminuyen la eficiencia.</p> <p>e. Volumen Derramado- no hay límite; los segmentos se pueden reunir.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- peligros de navegación</p>
Neumáticos	<p>a. Método- creación de turbulencia en el agua y la cresta de la ola se levanta barriendo las burbujas de aire para contener el derrame flotante. (figura 12, Apénd. 4)</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- compresores grandes de aire, mangueras, tubos perforados; entrenamiento nada especial; equipamiento de los operarios; personal numeroso para hacer un despliegue inicial de varios tubos con un tamaño y longitud determinada.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- aguas que estén quietas, de poca profundidad, con un estrato de contaminantes delgada y que no peligre la navegación.</p> <p>d. Limitaciones- requiere de compresores grandes, no es efectivo en corrientes mayores de 0.5 nudos.</p> <p>e. Volumen Derramado- mejora el trabajo si la capa de producto es delgada. (esto puede no ser una identificación de el volumen derramado)</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- no contendrá desechos contaminados flotando.</p>

Técnica	Consideraciones
Drenaje	<p>a. Método- usa una cañería o tubo a través de la barrera de tierra para controlar el flujo de agua pero mantener flotando el producto (figura 13, Apénd. 4); la tubería esta inclinada de tal forma que corriente arriba es más baja que corriente abajo y de esta manera elevar el nivel de agua y drenar sólo el agua de abajo.</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- palas, retroexcavadoras, equipo para movimiento de tierra, tubos, una manguera de alta succión lo suficiente como para controlar el volumen de agua que fluye; 3 a 5 personas para grandes derrames; personal entrenado.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- en diques, lagos, lagunas y corrientes quietas o de poco movimiento; el volumen de agua debe ser controlado a través del conducto.</p> <p>d. Limitaciones- los canales navegables que fluyen rápido limitan su utilidad; el suelo puede no ser adecuado para la excavación</p> <p>e. Volumen Derramado- derrames superiores a los 5000 galones hacen el impracticable este método.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- se puede incrementar la cantidad de desechos materiales.</p>
Vertedero	<p>a. Método- construcción de una barrera impermeable de separación del agua superficial y dividir la capa de material flotante en con un espesor de agua como para continuar el paso por debajo del vertedero. (figura 14, Apénd. 4)</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- tablones o maderos, postes, herramientas; el trabajo no requiere de expertos.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- para cursos de agua de poco movimiento, pequeños y de poca profundidad.</p> <p>d. Limitaciones- el agua no debe ser muy profunda, ni rápido, ni agitado.</p> <p>e. Volumen Derramado- para volúmenes pequeños. (menores de 5000 galones)</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- no contendrá desechos contaminados flotando.</p>

Filtro	<p>a. Método- se construye una barrera para contener y una valla para absorber los materiales peligrosos flotantes. (figura 15, Apénd. 4)</p> <p>b. Equipamiento, Materiales, Personal- postes, ropa de trabajo; material absorbente; personal calificado.</p> <p>c. Recomendaciones para su Uso- que sea pequeño, canal navegable con poco movimiento.</p> <p>d. Limitaciones- las velocidades de flujo rápidas limitan su empleo; el material absorbente puede llegar a saturarse y dejar fugas si no se reemplaza regularmente.</p> <p>e. Volumen Derramado- para pequeños derrames, menores de 5000 galones.</p> <p>f. Impacto en la Limpieza- se puede incrementar la cantidad de desechos materiales.</p>
--------	---

Para que cualquiera de las técnicas arriba mencionadas sean efectivas, se necesita un adecuado despliegue. Para materiales peligrosos flotantes, las pruebas y aplicaciones actuales han demostrado que las barreras de contención comerciales y otras barreras desplegadas en un ángulo de 90° (perpendicular al borde de la playa) contendrá los productos efectivamente sólo si la velocidad del agua no excede los 0.75 mph. A mayores velocidades los productos empiezan a pasar por debajo de la barrera perpendicular.

Una de las técnicas más efectivas en la reducción del arrastre y que permite que las barreras y obstrucciones sean eficientes en corrientes rápidas, es la que reduce el ángulo de despliegue, en algunos casos a menos de 90°. En una corriente de 2.0 mph las barreras están en una línea directa, en un ángulo de alrededor de 24° lo que permitirá que el producto se mantenga con poco arrastre. Cualquier receptáculo con la barrera de obstrucción crea un ángulo mayor en la dirección del flujo de agua y permite que el producto entre.

### **10.6.3 Características de las Espumas Empleadas en el Control de Derrames**

Las espumas contra incendio han sido usadas durante muchos años. Estas espumas son esencialmente una masa llena de burbujas de gas formada cuando una solución acuosa de un agente espumante es mecánicamente mezclada con aire. La espuma de burbujas sirve para transportar agua al fuego, pero de un modo controlado. Las burbujas de gas de llenado son menos densa que los líquidos inflamables y flotan en lo alto, liberando agua lentamente en un periodo de tiempo prolongado.

Hay numerosas formas por las cuales la espuma extingue el fuego. Los siguientes son algunos de los mecanismos primarios identificados:

1. supresión de vapores inflamables
2. separación de las llamas del fuego
3. generación de vapor el cual diluye el oxígeno disponible
4. enfriamiento del combustible y superficies circundantes; y
5. impedir que el aire se mezcle con los vapores.

Existen muchos tipos de espumas disponibles cada una con ciertas ventajas y desventajas para extinguir fuegos y suprimir vapores.

### *8.3.1 Tipos de Espumas*

#### **Espuma de proteína**

Se hace de proteínas de animal hidrolizadas y agentes estabilizantes. Produce espumas viscosas densas las cuales son altamente estables y resistentes al calor. Las espumas de proteína se usan sólo en baja extensión y pueden estar sujetos a ataque bacteriano dando una limitada forma de vida.

#### **Espumas surfactantes**

Tienen agentes de superficie activa sintética de alta espuma y son capaces de extenderse desde 100-1000 a 1. Esta alta extensión permite una total inundación del espacio confinado y desplaza vapores humos, etc. Se pueden construir capas muy gruesas para suprimir grandes masas de vapores pero fuera de las puertas. En condiciones de exposición al viento limitan su efectividad.

#### **Espuma acuosa en forma de película (A triple F, AFFF)**

Contiene hidrocarburos fluorados y surfactante, se aplica como espuma de baja extensión y su baja tensión superficial permite desarrollar una capa acuosa en lo más alto del combustible. La película acuosa se produce no obstante, sacrificando la resistencia al fuego por la parte posterior y la aptitud de enfriamiento.

#### **Fluoroproteínas**

Es una mezcla de espuma de proteína fluorocarbono surfactante. Se ocupa en bajas extensiones. Esta mezcla permite que la espuma se esparza en el combustible, siendo inyectado al tanque o sumergiéndolo en las llamas del combustible. Tiene una mayor resistencia al fuego por la parte posterior y un mejor sello que las espumas de proteínas.

### **Espumas tipo solvente polar**

Son resistentes a la destrucción por componentes polares solubles en agua, lo cual produce un rápido deterioro de otros tipos de espuma. Contiene un polímero soluble en agua el cual forma una membrana en contacto con componentes polares. Esta membrana flota en el combustible y sirve como una barrera para prevenir la destrucción de la espuma. Las espumas tipo solvente polar pueden contener una base Surfactante o AFFF o ambos y son aplicados en un modo de baja extensión. Sobre hidrocarburos se comportan como espuma convencional; así este tipo tiene la más grande diversidad, comparada con todas las otras.

Estos tipos de espumas han demostrado su efectividad en el control de incendios y fugas de vapor desde hidrocarburos volátiles por algún tiempo, pero su efectividad en el control de fugas de vapores desde otros materiales está aún siendo evaluada. Su habilidad para cubrir y liberar el agua lentamente tendría una aplicación muy útil.

El trabajo con espumas para controlar derrames ha proyectado ciertas formaciones que han sido desarrolladas y las cuales son compatibles con ciertas clases de materiales peligrosos tales como ácidos y bases. Para producir una espuma estable que cubra materiales como amoníaco anhídrido, cloro, ácido nítrico, y ácido clorhídrico anhídrido causando una reducción de la vaporización en ambiente aéreo y del calor solar. La reducción de la vaporización permite mayor tiempo para la evacuación y medidas de control establecidas.

Estas nuevas formulaciones de espumas no son de las típicamente usadas en servicios de incendio, pero pueden encontrar su lugar en la capacidad de respuesta en la industria, agencias de gobierno y terceras personas cuando su utilidad sea mejor conocida.

El uso de espumas contra incendio como un modo de mitigar la fuga de vapor de los derrames de materiales peligrosos se ha sugerido en un sin número de ocasiones. De hecho es una práctica común aplicar espumas contra incendio a derrames no incendiados de líquidos combustible o inflamables, como una forma de prevenir su ignición. La ignición se previene debido a la supresión de la fuga de vapor desde el líquido, presentando una acumulación insuficiente de vapor como para poder formar una mezcla inflamable. Debido a esto es lógico esperar que las espumas contra incendio o similares podrían tener el mismo efecto benéfico en los derrames de materiales que presenten peligros distintos de los de inflamabilidad.

Se han probado varios tipos de materiales peligrosos, y se ha encontrado que se requiere las espumas especiales para materiales peligrosos que son altamente ácidos o altamente alcalinos o que tengan puntos de ebullición bajo los 20 grados centígrados (ref. 8). Algunos materiales peligrosos que son altamente reactivos con el agua no se pueden cubrir exitosamente con espumas acuosas de ningún tipo.

Como ya se explicó anteriormente, las espumas contra incendio son útiles para mitigar los escapes de vapor de una amplia gama de productos químicos. Se han desarrollado, además, espumas especiales para usar en amoníaco y cloro, después de estudiar las espumas contra incendio convencionales y descubrir que tienen una mejor utilidad marginal en éstos químicos.

Los resultados de los laboratorios a menudo no se pueden extrapolar al campo mismo de la acción real frente a un escape. Esto complica la existencia de los encargados de controlar los derrames de materiales peligrosos. Por ello se ha sido muy afortunado en probar los resultados de alguna de estas espumas especiales en derrames de cloro, amoníaco, ácido nítrico y ácido hidrófluorico en incidentes reales.

## **Acción de las Espumas Especiales en Derrames de Cloro**

El cloro es un producto químico peligroso que a temperatura ambiente existe como gas. Su punto de ebullición a temperatura ambiente es de  $-34.5^{\circ}\text{C}$ , es 2.5 veces más denso que el aire, por lo tanto en un derrame tiende a dispersarse a nivel del suelo. Esta característica, adicionada a su toxicidad, lo convirtieron en una munición química, pues ataca los pulmones, las membranas mucosas y la piel disolviendo los fluidos del cuerpo en una hidrólisis, originando los ácido clorhídrico e hipoclorhídrico.

El cloro es enviado y almacenado como gas licuado en envases a presión. Muchas de los derrames de cloro han ocurrido por fallas en las conexiones de carga/descarga de estos envases. Las fisuras en el espacio de vapor de estos estanques son usualmente de menores consecuencias. Como la presión de los estanques es aliviada, el líquido sufre un rápido enfriamiento adiabático, reduciendo el flujo de gas. Este punto posibilita, en muchos casos, el remiendo del estanque.

Las fisuras bajo la superficie del líquido son mucho más serias, debido a que la presión en el interior del estanque arroja el contenido de líquido, bajando el nivel de líquido hasta el del orificio. La poza de cloro líquido resultante sirve como una fuente constante de vapor y de grandes nubes de vapor que probablemente serán fatales para todo el personal desprotegido.

Las investigaciones acerca de la acción de las espumas contra incendio han tenido resultados variados. Dow Chemical Co., ha recomendado por muchos años el uso de espumas contra incendio de Fluoroproteínas para suprimir los derrames de cloro. A esta conclusión llegaron luego de realizar varias pruebas, en las que compararon esta espuma con otra especial para cloro (CHF-784).

Las espumas comparadas fueron evaluadas mediante el Método "globo ocular". Las espumas de Fluoroproteínas definitivamente producen un declive de la velocidad del vapor que se escapa. Sin embargo, la cubierta de espuma desarrolló muchas chimeneas a través de las cuales el vapor se escapó.

Al aplicar la espuma CHF-784 a través de un boquerel convencional, se produjo una mayor reducción de los vapores que las Fluoroproteínas, incluso mejoraron estos resultados al utilizar un prototipo de boquerel especialmente diseñado para esta espuma.

La vida efectiva de las carpetas de espuma fue de entre 20 y 30 minutos, lo que sugiere la necesidad de realizar reaplicaciones de la misma.

## **Acción de las Espumas Especiales en derrames de Amoniac**

El amoniac anhidro también es un químico peligroso, el cual existe como gas a temperatura ambiente. Su punto normal de ebullición es de  $-33^{\circ}\text{C}$ . Tiene una densidad de  $3/5$  de la del aire, y puede formar falsas nubes bajas que no se dispersan a nivel del piso, como ocurre con el cloro. El amoniac es extremadamente irritante en ojos y membranas mucosas. Se almacena como líquido en estanques atmosféricos refrigerados, y se suele despachar en estanques a presión como gas licuado.

Investigaciones realizadas en 1975 han demostrado la total inutilidad de las espumas contra incendio convencionales para controlar los derrames de amoniac, mientras que otras espumas acuosas se pueden usar como extintoras de vapor.

De investigaciones y pruebas posteriores obtenidas en derrames en pequeña escala, pero posibles de extrapolar a grandes derrames, se determinó que el la espuma CHF-413 suprime las emanaciones de vapor desde los derrames de amoniac anhidro.

En general, las espumas acuosas se pueden utilizar para mitigar las emisiones de vapores desde los derrames de materiales peligrosos. En cuanto a las espumas convencionales contra incendio, pueden ser útiles en muchas sustancias químicas que existan como líquido a temperatura ambiente. Tanto los gases licuados, materiales ácidos o alcalinos y materiales reactivos al agua, requieren de espumas especiales, tales como: CHF-784 que es adecuada para el cloro y para algunos materiales ácidos; y la CHF-413 apropiada para amoniac anhidro y aminas.

### MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS - UNA ESTRATEGIA CLAVE EN EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS

#### 11.1. Introducción

La minimización de residuos como sinónimo de la aplicación de “Tecnologías Limpias” es muy importante en el manejo de residuos en los países en desarrollo. Esta estrategia ilustra la habilidad de ingenieros y técnicos en países en desarrollo para conceptualizar y desarrollar tecnologías de minimización apropiadas a las condiciones locales de cada país.

#### 11.2. Programa de minimización de residuos

##### 11.2.1. Definición del concepto de minimización de residuos

“Cualquier actividad como **Reducción en la Fuente**, **Sistema de Reciclaje** o **Sistema de Tratamiento** que reduce el volumen y/o la toxicidad de cualquier residuo peligroso”.

- **Reducción en la Fuente:** Cualquier actividad que reduce o elimina la generación de residuos peligrosos en un proceso.
- **Sistema de Reciclaje:** Cualquier actividad que reduce el volumen y/o toxicidad de residuos peligrosos con la producción o generación de un material valioso el cual es subsecuentemente utilizado.
- **Sistema de Tratamiento:** Cualquier actividad que reduce el volumen y/o la toxicidad de residuos peligrosos sin la producción o generación de un material valioso.

Existe una serie de conceptos asociados con la minimización de residuos que se presentan en la Tabla 11.1.

### **Tabla 11.1. Definiciones relacionadas con minimización de residuos**

- **Minimización de residuos:** La reducción hasta una extensión posible, de los residuos peligrosos que son generados o subsecuentemente tratados, almacenados o desechados. Incluye toda fuente de reducción o actividad de reciclaje realizada por un generador que resulta en: a) la reducción del volumen total o de la cantidad de residuos peligrosos o b) la reducción de la toxicidad de los residuos peligrosos, o ambas, de modo que esta reducción sea consistente con la meta de minimizar la amenaza presente y futura a la salud humana y el ambiente.
- **Reducción del volumen o cantidad total:** La reducción en la cantidad total de residuos peligrosos generados, tratados, almacenados o desechados, definidos ya sea por volumen, peso, masa u otra medida apropiada.
- **Reducción en toxicidad:** La reducción o eliminación de la toxicidad de un residuo peligroso por medio de a). alterando los constituyentes tóxicos del residuo a forma menos o no tóxica o b). bajando la concentración de los constituyentes en el residuo por medios distintos a la dilución.
- **Reducción en la fuente:** Cualquier actividad que reduce o elimina la generación de un residuo peligroso dentro de un proceso.
- **Sustitución de productos:** El reemplazo de cualquier producto destinado para uso como intermediario o final por otro producto con las mismas características y para el mismo uso intermediario o final.
- **Reciclado:** Un material es “reciclado” si se reutiliza, es decir si se emplea como un ingrediente (incluido el uso como producto intermediario) en un proceso industrial para fabricar otro producto; sin embargo, un material no satisface esta condición si distintos componentes del material son recuperados como productos finales distintos (como el caso de metales recuperados de materiales secundarios); también son reciclados cuando son empleados en una función o aplicación particular como un sustituto efectivo de un producto comercial. También un material es reciclado, si es procesado para recuperar un producto valioso o si es regenerado. Como ejemplos se tiene la recuperación de plomo de baterías y la regeneración de solventes usados.
- **Tratamiento:** El tratamiento, como parte de la minimización de residuos, es cualquier actividad o serie de actividades que reducen el volumen y/o la toxicidad de los residuos peligrosos sin la recuperación de material valioso que sea subsecuentemente empleado en la manufactura de productos comerciales (por ejemplo, un incinerador para la disposición de solventes clorinados con absorción y neutralización de cloruro de hidrógeno de los gases).

#### **11.2.2. Reducción en la fuente**

La reducción en la fuente es el componente más importante de la minimización de residuos y consiste en la sustitución de productos y el control en la fuente de acuerdo a los siguientes conceptos:

### **a) Sustitución de productos**

- Alteración de la composición del producto;
- Alteración del uso del producto.

La sustitución de productos significa, el reemplazo de un producto original por otro producto que tenga como característica el mismo uso final, o la alteración del uso de un producto original que resulta en un descenso o eliminación de la generación de residuos peligrosos. Como ejemplos podemos citar el reemplazo de maderas tratadas por concreto en construcción marina, el reemplazo de caucho sintético por caucho natural, o el reemplazo de pinturas por pinturas plásticas de mayor duración.

### **b) Control de la fuente**

El control en la fuente significa la reducción o eliminación de la generación de residuos peligrosos en un proceso a través de la alteración de materias primas, de tecnologías o de cambios en procedimientos o institucionales (prácticas de buena operación o manejo del proceso).

#### **1. Alteración de Materia Prima:**

- Purificación de Materia Prima
- Sustitución de Materia Prima

#### **2. Alteración Tecnológica:**

- Cambios en el Proceso;
- Cambios en equipos, cañerías o diagramas;
- Automatización adicional;
- Cambios en los valores operacionales;
- Conservación de Energía
- Conservación de Agua.

#### **3. Cambios de Procedimientos:**

- Medidas de procedimiento;
- Prevención de Pérdidas;
- Prácticas del Personal;
- Segregación de Efluentes;
- Manejo de Materiales;
- Aumento de eficiencia.

### **11.2.3. Reciclaje**

Visto en forma general, “reciclaje” significa el re-uso o recuperación de productos. Las actividades de reciclaje se refieren tanto a la recuperación de materiales como de energía. La decisión de reciclar un material depende de las características del residuo o mezcla de residuos. Donde se debe efectuar el tratamiento del residuo (ya sea interna o externamente a la planta) es una función de las prácticas de manejo de la empresa generadora de residuos lo cual incluye:

- Proximidad a las instalaciones de reciclado;
- Costo asociado al transporte de los residuos;
- El volumen de residuos disponibles para procesar;
- Costos relativos al almacenamiento interno o externo de los residuos.

El reciclaje esta caracterizado por tres grandes aplicaciones: (1) el uso directo o re-uso de un residuo en un proceso; (2) la recuperación de un material secundario para un uso final separado tal como la recuperación de un metal de una borra, y (3) la remoción de impurezas de un residuo para obtener una sustancia relativamente pura reutilizable.

#### **a) Recuperación de materiales**

Aunque inicialmente el reciclaje interno ha sido el más utilizado, el reciclaje externo se está haciendo cada vez más común, con el desarrollo de empresas de reciclaje y con la transferencia directa de residuos de los generadores a otras empresas que reutilizan los residuos. Los residuos reciclados se usan como materias primas en ciertos procesos o como sustitutos de algunos productos químicos comerciales. Como ejemplos podemos citar:

- El re-uso de solventes para limpieza de equipos;
- El reciclado de polvos de pesticidas recolectados;
- El re-uso de residuos de cloruro férrico de la fabricación de dióxido de titanio para el tratamiento de aguas.

La proporción de residuos que son reciclados dependen tanto del tipo de industria como del tipo de residuo. En general residuos tales como solventes tienden a ser más reciclados que otros como pesticidas por ejemplo. Los factores que influyen si una industria recicla o no sus residuos incluyen; el tipo de proceso de generación de residuos; el volumen, composición y uniformidad de los residuos; si se han identificado usos o reutilizaciones de los residuos; y disponibilidad y precios de materiales puros comparados con los costos de reciclar y almacenar los residuos. La toxicidad de los residuos no aparece como un factor directo en la reciclabilidad de los residuos generados, aunque grandes volúmenes de residuos que son menos tóxicos son reciclados más a menudo.

Los solventes tienden a ser recuperados en mayor proporción que otros residuos. Esto se debe a que existe tanto la tecnología como el mercado para los solventes reciclados. La tecnología disponible (destilación por ejemplo) es relativamente fácil de operar y puede entregar

altas puridades (95 % o mayor). En otros casos los procesos de producción generan residuos cuya recuperación no es práctica puesto que no tienen usos directos en la producción.

### **b) Recuperación o conservación de energía**

Hasta los fines de los 80 el reciclaje de materiales ha sido más popular que el reciclaje de energía o de combustibles. Esto se debe a que los residuos que pueden ser reciclados para la recuperación de energía también pueden ser reutilizados o recuperados varias veces, mientras que el uso en recuperación de energía destruye el material. Solamente cuando el residuo es demasiado “sucio” o contaminado se considera para recuperar energía. Actualmente existen nuevas tecnologías para la recuperación de energía, y residuos que contienen solventes están siendo usados por su alto valor energético. Una gran cantidad de residuos con alto poder calorífico se están utilizando en plantas de producción de cemento y en hornos de calcinación.

### **c) Otras tecnologías de reciclaje**

Los residuos que se seleccionan para su recuperación o reciclaje deben tener usualmente altas concentraciones, además deben ser uniformes, es decir no contener más de un contaminante. Otros factores que deben cumplirse para ser reciclados incluyen:

- Un mercado para el material reciclado que sea económicamente viable;
- El material reciclado debe cumplir con requisitos de pureza para los procesos de manufactura.

Debido a que los residuos reciclables deben ser competitivos con los materiales originales que reemplazan, estos deben a menudo ser procesados antes de ser reutilizados. La recuperación de residuos incluyen procesos tales como separaciones químicas, físicas y electroquímicas. Algunas de las tecnologías que se usan incluyen:

- Destilación de residuos con solventes;
- Decoloración de residuos halogenados;
- Concentración de metales con técnicas tales como lixiviación, extracción por solventes, intercambio iónico, precipitación, cristalización y evaporación para tratar residuos diluidos de borras metálicas.

### **11.3. Incentivos y desincentivos en países en desarrollo**

Con sistemas de regulación gubernamentales insuficientes para el control de la contaminación del agua y del aire y sin regulaciones efectivas para controlar residuos peligrosos, los costos asociados con la disposición de residuos en los países en desarrollo tienden a ser despreciables. Por lo tanto no existe un incentivo económico para el generador de residuos para emprender un programa de minimización de residuos a menos que el residuo contenga un material valioso que pueda ser rápidamente recuperado, tal como oro y plata.

El requisito más importante para la minimización de residuos es la implantación de estrictas regulaciones para el control de la contaminación aérea y de aguas así como regulaciones sobre el manejo de residuos peligrosos.

Otras barreras para un programa efectivo de minimización de residuos pueden incluir:

- Falta de información de los beneficios de la minimización de residuos;
- Falta de personal técnico;
- Miedo a provocar problemas en la calidad de los productos;
- Inercia en los estamentos organizacionales;
- Política interna de la organización, que no incentiva programas de minimización de residuos;
- Falta de interés por inexperiencia en el campo.

#### **11.4. Auditoría de minimización de residuos**

Un procedimiento que puede ayudar a vencer alguna de las barreras mencionadas es la Auditoría de Minimización de Residuos.

Los objetivos de la auditoría son:

- Generar un listado de medidas de minimización u opciones aplicables a un proceso industrial específico;
- Efectuar un ordenamiento de todas las opciones de reducción de residuos identificables y permitir un análisis más profundo de estas opciones.

Una auditoría de minimización de residuos puede contemplar los siguientes pasos:

- Selección del personal auditor;
- Listado de flujos de residuos;
- Generación de opciones de reducción para cada flujo de residuos;
- Ordenamiento de cada opción de reducción en tres categorías: efectividad, aplicación potencial y usos;
- Preparación de documentación sobre opciones seleccionadas;
- Presentación, discusión y revisión con personal de planta de las opciones y su ordenamiento;
- Análisis por personal auditor de las opciones; y
- Preparación del informe final.

## **Tabla 11.2. Metodología de reducción de residuos en procesos de producción**

### **a) Para todo proceso de producción**

1. Use materiales de alta pureza
2. Use materiales menos tóxicos
3. Use materiales no corrosivos
4. Pase de proceso no-continuo a proceso continuo
5. Estricta inspección y mantención de equipos
11. Mejorar entrenamiento de operadores
7. Supervisión más estricta
8. Practicar un buen manejo del proceso
9. Eliminar o reducir agua de lavados
10. Implementar medidas apropiadas de limpieza de equipos
11. Usar sistemas de monitoreo
- 12 Usar bombas con doble sellos mecánicos

### **b) Productos producidos en forma continua**

1. Acrilonitrilo
2. Refinación de Pétroleo
3. 1,1,1 Tricloroetano
4. Tricloroetileno/Percloroetileno
5. Cloruro de Vinilo Monómero
11. Epicloropidrina

### **c) Producción de hidrocarburos livianos y pesados**

1. Use catalizadores más selectivos
2. Optimizar variables de reacción y diseño de reactor
3. Use rutas de proceso alternativas
4. Use recuperación de calor

### **d) Uso y disposición de catalizador**

1. Desarrolle un soporte adecuado del catalizador
2. Use filtros internos en reactor
3. Regenere y recicle el catalizador gastado

### **e) Limpieza de residuos en equipos**

1. Aumente el tiempo de drenaje en equipos

2. Use materiales resistentes a la corrosión
3. Agitar y/o aislar estanques de almacenamiento
4. Re-examinar necesidad de limpieza química
5. Use nitrógeno para reducir la oxidación

#### **f) Derrames y fugas**

1. Use válvulas con sellos especiales
2. Use bombas con sellos adecuados
3. Maximizar el uso de juntas soldadas versus enflanchadas

### **11.5. Evaluación de costos y beneficios en la minimización de residuos**

En la práctica, el valor potencial de la mayoría de los proyectos de minimización de residuos están basados en ahorros en las siguientes áreas:

- Costos de materias primas
- Costos de mano de obra, servicios, y de mantención
- Obtención de ganancias por la creación de productos comercializables
- Costos de disposición de residuos
- Impuestos o costos por generación por cada unidad de residuo
- Costos de transporte de residuos
- Costo de almacenamiento y manejo
- Costos de tratamiento antes de la disposición
- Costos de permisos, informes y estadísticas
- Responsabilidades en seguridad y contaminación

Para el propósito de evaluar un proyecto para reducir las cantidades de residuos, algunos tipos de costos son mayores y más fácilmente de cuantificar: estos son los costos de disposición, de transporte, de tratamiento, de materias primas y de operación y mantención.

Los costos de disposición varían de acuerdo al tipo de residuos; si son sólidos o líquidos, el tipo de contenedor en los que están almacenados (tambores o a granel) y la cantidad de residuo involucrado. La tabla siguiente indica valores de disposición en EE.UU. de algunos residuos sólidos y líquidos en tambores o a granel y para desechos de laboratorios.

**Tabla 11.5. Costos típicos de manejo de residuos industriales**

<b>Disposición de:</b>	Residuos en Tambores	
	Sólidos.....	US \$ 50 - \$ 75/tambor
	Líquidos.....	US \$ 75 - \$ 160/tambor
	Residuos a Granel	
	Sólidos.....	US \$ 150 - metro cúbico
	Líquidos.....	US \$ 0.95-\$2.5/galón
	Laboratorios.....	US \$ 100/tambor
<b>Análisis de Laboratorio:</b> .....		US \$ 200 - \$ 300
<b>Transporte de Residuos:</b> .....		US \$ 65- \$ 85/hora

## **CAPÍTULO XII**

# **INFRAESTRUCTURA DE SISTEMAS DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS**

### **12.1. Introducción**

La necesidad de un sistema de manejo de los residuos peligrosos comienza directamente con la generación de los residuos y continua a través de todas las etapas siguientes en el tratamiento y la disposición final. Este sistema consiste en una serie de acciones de manejo y control de residuos entre diferentes personas y grupos de personas. En la forma más simple un sistema de manejo de residuos consiste en tres unidades:

- Almacenamiento después de la generación;
- Recolección/transporte; y
- Tratamiento final/disposición.

En este capítulo revisaremos los elementos de un sistema global de manejo que se aplica tanto al manejo interno como externo de los residuos peligrosos.

### **12.2. Almacenamiento de residuos**

La primera etapa de esta infraestructura es almacenar los residuos después que son generados. El generador de residuos necesita tener un sistema seguro para almacenar los residuos hasta un posterior almacenamiento, tratamiento o disposición. Típicamente, este almacenamiento se efectúa en contenedores o estanques a granel. El tipo de almacenamiento depende de como es y como se generan los residuos y el estado físico de los mismos.

#### **12.2.1. Contenedores**

Los contenedores ofrecen la ventaja de ser muy portátiles, y disponibles para cualquier estado físico de residuos, y además son flexibles para ser llenados. Pueden mantenerse cerca del proceso de generación de residuos hasta que se llenen, para ser movidos posteriormente en forma fácil al área de almacenamiento antes de ser transferidos.

La mayoría de los contenedores son adecuados para distintos tipos de residuos, en forma de líquidos, borras o sólidos a granel. Los contenedores pueden ser llenados por distintos métodos, tales como bombeo, por paladas, por bolsas, etc. Los contenedores vacíos que han sido usados para materias primas pueden ser usados para almacenar residuos, dependiendo de la compatibilidad del residuo con el contenedor y con los residuos propios dejados en el

contenedor. Esta compatibilidad es importante de modo que no se deteriore el propio contenedor. Por ejemplo, un contenedor plástico no debe ser usado para guardar residuos de solventes. Se debe tener la precaución de que los residuos previos del receptáculo no reaccionen con los nuevos residuos que se desean almacenar; por ejemplo un contenedor que ha almacenado sales de cianuros, no debería ser usado para almacenar residuos ácidos.

Las desventajas de los contenedores son:

- Pueden ser fácilmente dañados o derribados;
- Debido a que son fácilmente movidos y almacenados, se pueden acumular fácilmente y provocar un atochamiento del área.
- Grandes grupos de contenedores son difíciles de inspeccionar para determinar fugas y derrames.

### **12.2.2. Estanques**

Los estanques son útiles para almacenar o acumular residuos que son manejados en grandes cantidades o por sistemas tales como tuberías, correas transportadoras, etc. Los estanques ofrecen un sistema más rígido e integral que los contenedores y son fáciles de inspeccionar en el caso de fugas y derrames.

## **12.3. Recolección y Transporte**

### **12.3.1. Empacado/etiquetado**

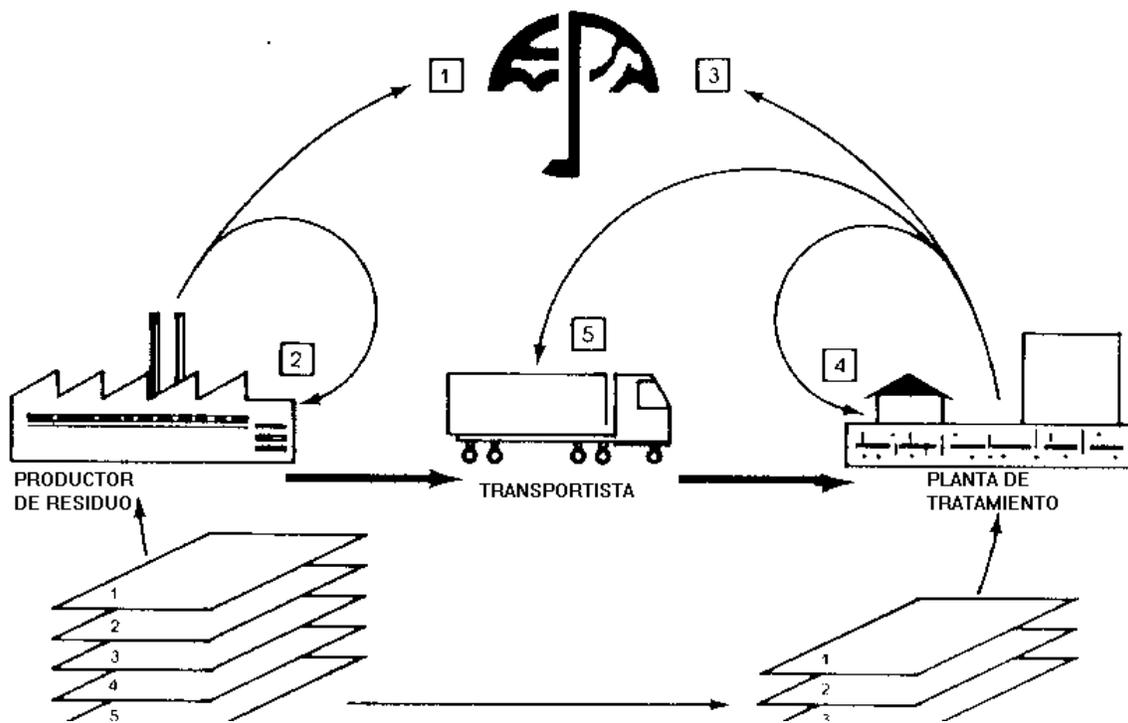
Todo contenedor o estanque conteniendo residuos destinados a transporte debe estar claramente etiquetado con el tipo de residuo y sus peligros. El empaquetado debe ser seguro para prevenir fugas, derrames y vaporización durante el transporte. Los siguientes tipos de envases se sugieren:

- Residuos de aceites o solventes: tambores de acero de 200 l. ó estanques de acero.
- Residuos orgánicos sólidos o semi-sólidos: tambores de 200 l. con tapas con ganchos o grapas.
- Residuos líquidos inorgánicos: Envases plásticos de 30, 45, 200 l. o tambores de polietileno.
- Borrás de sólidos inorgánicos: Tambores de acero o plásticos de 200 l. con tapas con ganchos o grapas.

### **12.3.2. Sistema de información de manejo de residuos**

En muchos países se han adoptado un sistema de información o documentación del manejo de residuos peligrosos desde la generación, los procesos de tratamiento, hasta la disposición final. La documentación acompaña al transporte del residuo y entrega un registro o récord del movimiento del residuo desde el productor del residuo, en cada etapa intermedia, o cada tratamiento intermedio, hasta la disposición final. La documentación sirve como una “cadena de custodia”, es decir cada vez que el residuo cambia de manos la persona responsable firma el documento. A menudo alguna agencia gubernamental responsable recibe una copia de los documentos en las etapas cruciales de las transferencias de los residuos.

Un ejemplo de la documentación utilizada en Australia se muestra en las Figuras 12.1 y 12.2 .



**Figura 12.1 . Sistema de documentación de residuos peligrosos**

### **12.3.3. Transferencia directa/estación recolectora**

Los residuos pueden ser transferidos fuera del lugar de generación ya sea directamente o por medio de la recolección en una estación de transferencia.

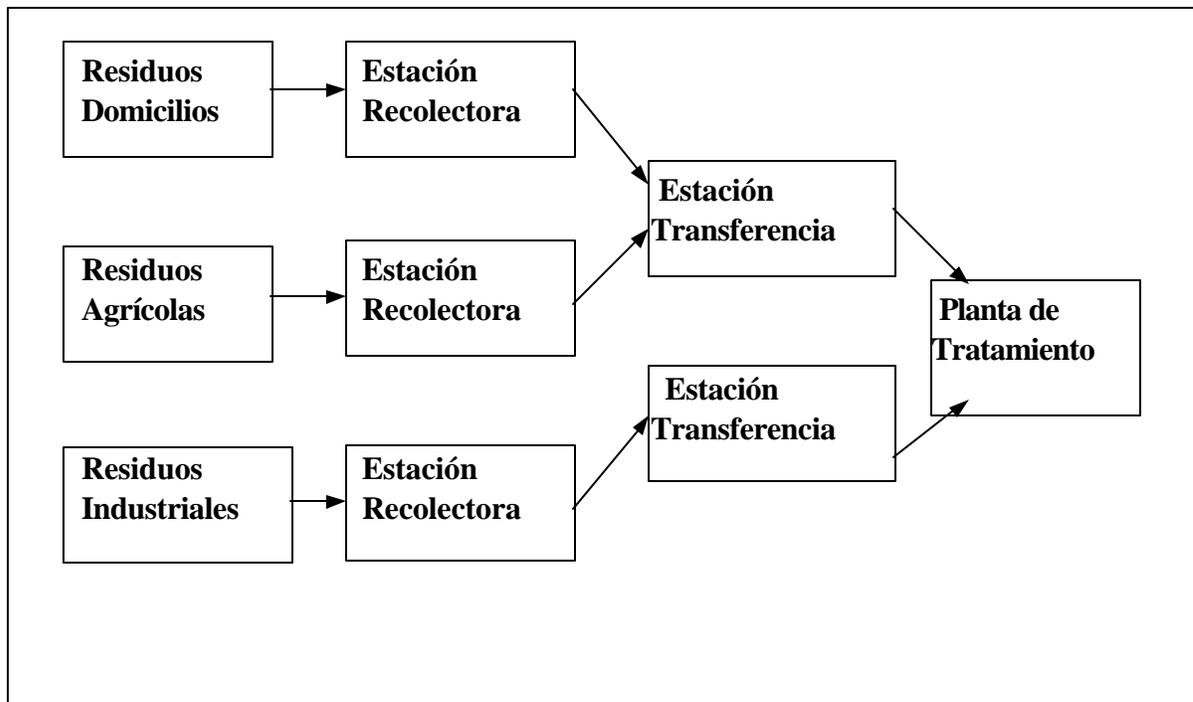
La transferencia directa es más económica si es posible transportar grandes cantidades de residuos de un solo productor, o si un camión puede recolectar residuos de más de un productor.

Un ejemplo modelo de un sistema para recolección y estaciones de transferencia es el de la Planta Kommunekemi, en Dinamarca, el cual recibe residuos domiciliarios, de la industria y de zonas agrícolas en una planta central de tratamiento.

Cada municipalidad tiene una estación de recolección, diseñada para recibir residuos químicos domiciliarios. Estas estaciones son instalaciones de 4m x 5m x 2m provistas de murallas a prueba de fuego, con piso de concreto y con sistema de circulación de aire que previene la acumulación de gases explosivos o tóxicos. Dentro de la estación hay dos tambores de 200 l. para residuos líquidos, dos tambores de 200 l. con tapas con ganchos para residuos en paquetes o sólidos y cajas para guardar residuos tóxicos.

La municipalidad transporta desde las estaciones de recolección a un número de estaciones de transferencia, que pertenecen y son operadas por las municipalidades. Los productores de residuos industriales y agrícolas informan a las autoridades locales de la acumulación de residuos, y las notifican cuando estos serán transportados en documentación ad-hoc. El transporte a las estaciones de transferencia es efectuado por los propios generadores o por contratistas privados. El esquema de estaciones de recolección y de transferencia se muestra en la Figura 12.3

**Figura 12.3. Sistema de recolección y transferencia de residuos planta kommunekemi-dinamarca**



En Dinamarca, los lugares de las estaciones de transferencia fueron seleccionados de modo de que el sistema pudiese utilizar la red existente de ferrocarril. Una estación de transferencia consiste de estanques para almacenamiento de líquidos, un sistema de separación de aceites y áreas especiales cubiertas para el almacenamiento de tambores de residuos y material sólido. Existe personal entre 1-2 hombres que trabajan 8 horas por día. Además de manejar las entregas de residuos y la carga de estos en los vagones de ferrocarril, se efectúa control y trabajo administrativo del manejo de residuos. Para cada recepción de residuos, se exige un documento de transporte el cual se revisa para asegurarse de que la información es correcta, y se deja una copia en la estación y otra en manos del transportista.

Los residuos son enviados por ferrocarril desde la estación de transferencia a las plantas de tratamiento central. Las empresas también pueden enviar directamente sus residuos a las plantas de tratamiento con un procedimiento y documentación similar a la anterior. La organización de una estación de transferencia se muestra en la Figura 12.4.

El sistema Kommunekemi de Dinamarca también recibe residuos en pequeñas cantidades. Por ejemplo para residuos de medicamentos domiciliarios, de clínicas y de hospitales, estos son recibidos por un Químico-Farmacéutico, el cual los entrega a las estaciones de recolección para su transporte y disposición. Lo mismo se efectúa con baterías usadas de mercurio para los importadores y productores de estos productos, a los cuales se les suministra cajas especiales para la recolección. Las Figuras 12.3 y 12.4 indican como funcionan estas estaciones.

#### **12.3.4. Transporte de residuos peligrosos**

La forma más común de transporte de residuos químicos peligrosos es por las rutas camineras. Los peligros asociados con las actividades de carga y descarga presentan un peligro aún mayor que el propio transporte. Siempre y cuando los conductores tengan una buena preparación, se empleen los vehículos apropiados, y los residuos estén adecuadamente empacados, los riesgos a la comunidad son menores. Sin embargo los riesgos del transporte dependerán de otros factores externos (carreteras, tráfico, planes de emergencia, etc.). Los siguientes controles son deseables:

- El transporte de residuos peligrosos debe estar sujeto a un permiso entregado por la autoridad reguladora a los contratistas que deben contar con conductores entrenados y vehículos apropiados;
- Cada vehículo que transporte residuos peligrosos debe estar identificado con los símbolos de peligro apropiados;

- Todo transporte de residuos en carreteras públicas debe requerir de un certificado de transporte indicado su origen y destino.
- El conductor o contratista debe asegurarse de que tiene la información necesaria sobre el material que transporta, y que tiene formulado un plan de emergencia en el caso de una fuga o derrame.

## **12.4. Planes y programas de manejo**

Todo tipo de instalación de manejo de residuos peligrosos, ya sea una planta de tratamiento centralizada o una simple instalación de almacenaje, necesita planes y programas para las operaciones diarias y para prevenir incidentes que pueden causar problemas de salud o ambientales. El nivel de complejidad de estos planes variara de acuerdo con el tipo de actividad, pero los elementos esenciales siempre son los mismos.

### **12.4.1. Caracterización de residuos**

La caracterización de residuos juega un papel crucial en la operación diaria de cualquier instalación de manejo de residuos. Antes de aceptar un residuo para su manejo, la instalación debe caracterizar completamente el residuo. La caracterización apropiada comienza con la obtención de una muestra representativa del residuo, lo cual puede ser difícil debido a que un residuo puede no ser homogéneo. Pueden presentarse anomalías tales como varias fases, diferentes tamaños de partículas, gradientes de concentración, y “bolsones de contaminación”. Deben diseñarse planes de muestreo para descubrir estas anomalías y recoger una muestra que sea representativa. Todo plan de análisis debe incluir procedimientos analíticos, equipos, métodos de calibración, y procedimientos de control de calidad.

Los procedimientos de muestreo y de análisis deben satisfacer al menos tres metas:

- Identificar los peligros inherentes del residuo;
- Caracterizar el residuo de modo de poder manejarlo efectivamente;
- Encontrar una característica de modo de identificar fácilmente los envíos de residuos a medida que llegan.

Los peligros inherentes de un residuo se deben conocer, de modo de tomar las precauciones para prevenir accidentes causados por los residuos. Por ejemplo: los residuos que son inflamables, reactivos, corrosivos, o incompatibles con ciertos materiales requieren un especial cuidado y manejo; residuos que contienen contaminantes altamente solubles deben ser protegidos contra la lluvia; residuos que producen polvos explosivos deben ser manejados de modo de minimizar la producción de polvo. Las especificaciones de los residuos son de particular importancia para diseñar un programa de tratamiento y disposición efectiva de los residuos. Un

residuo que contiene metales pesados y cianuros requiere de un tratamiento diferente del que requiere un residuo con soda cáustica.

Los envíos de residuos que llegan a las instalaciones deben ser identificados para asegurarse de que son los mismos que la instalación ha acordado aceptar. La instalación debe decidir las pruebas que en forma fácil y rápida identificaran los residuos. Estas pruebas pueden incluir por ejemplo, pH, punto de inflamación, cloruros, sulfatos, TOC, valor calorífico, cianuros, metales pesados, etc.

#### **12.4.2. Seguridad de las instalaciones**

Las instalaciones deben mantener una adecuada seguridad para prevenir el acceso no autorizado al lugar. Existen tres razones para mantener la seguridad. Primero, para prevenir que la gente u otros seres vivos entren al lugar y puedan sufrir un daño por contacto con los residuos o los equipos. Segundo, para proteger los equipos de posibles daños. Tercero, para prevenir que mendigos se expongan a material contaminados y puedan extraer materiales peligrosos. La seguridad se puede mantener por medio de rejas, barreras naturales, o guardias.

#### **12.4.3. Inspección y mantención de equipos**

La instalación debe establecer un programa de inspección que debe chequear las condiciones de los equipos de proceso, estanques de almacenamiento y contenedores, sistemas de control, equipos de emergencias, y otros equipos necesarios para la operación de la instalación. La lista de inspección y la frecuencia dependen de factores tales como la velocidad de deterioro, la sensibilidad y lo factible de accidente que pueden ser los equipos. Por ejemplo, los equipos de monitoreo para controlar los residuos requieren una inspección más frecuente que el área de almacenamiento de tambores. El programa de inspección debe incluir un programa de reparación y mantención de los equipos que se encuentran deficientes durante las inspecciones.

#### **12.4.4. Entrenamiento del personal**

Un entrenamiento apropiado del personal es necesario para una operación efectiva de las instalaciones. Deben existir procedimientos de entrenamiento que muestren para cada trabajo, el nivel y tipo de entrenamiento necesario para ese trabajo y como se debe efectuar el entrenamiento. La capacitación se puede efectuar de diferentes formas: desde supervisión directa en el trabajo hasta clases formales de entrenamiento. El objetivo del entrenamiento es asegurar que los empleados conocen como efectuar sus funciones de una manera efectiva y segura y como responder en una emergencia, y debe incluir como mínimo: prácticas de trabajo seguro, los peligros de los residuos que manejan, y los procedimientos de emergencia tanto internos como externos.

### **12.4.5. Archivos de operación**

Los archivos de la operación de las instalaciones deben documentar lo que ha hecho la instalación y reflejar el estado actual de la misma. Como ejemplos de lo que debe aparecer en estos archivos son: datos de control de procesos, tipos y cantidades de residuos, localización de residuos, y datos de monitoreo ambiental. Se debe mantener archivos actualizados y exactos de los residuos recibidos, los procesos de tratamiento y la planificación de la instalación.

### **12.4.6. Prevención y preparación para incidentes**

Los materiales peligrosos, incluyendo los residuos, presentan peligros que pueden causar incidentes tales como fugas, incendios, y explosiones. Identificando estos peligros y preparándose para los incidentes que pueden producirse, se puede prevenir que ocurran muchos accidentes y minimizar los efectos de estos. El análisis de riesgos es una forma útil para identificar los peligros y los potenciales incidentes. La preparación para los incidentes depende del tipo de peligro y del incidente potencial identificado. Si el fuego a partir de residuos inflamables se ha identificado como potencial incidente, una medida de preparación será la instalación de equipo de combate contra el fuego cerca de la localización donde el fuego puede ocurrir. Las medidas de protección contra el fuego deben ser diseñadas en cada sitio por personal experto y ser revisadas continuamente. Si el derrame de líquidos es un problema potencial, el uso de pretilas puede prevenir un incidente de contaminación.

### **12.4.12. Planificación de emergencias**

Toda instalación de manejo de residuos debe tener un conjunto de procedimientos para los empleados en el caso de que ocurra una emergencia. Estos procedimientos deben identificar el tipo de emergencia, el tipo de residuo, y que se debe hacer para minimizar el efecto del incidente.

Un análisis de seguridad es una herramienta útil para el diseño de estos procedimientos, y se debe enfatizar lo siguiente:

- Como proteger a los empleados durante el incidente;
- Como minimizar el efecto del incidente sobre el ambiente;
- La protección de los equipos y las instalaciones;
- La interacción con los servicios de la comunidad (policía, bomberos, servicios de salud) para desarrollar planes de emergencias en conjunto.

Se deben efectuar reuniones y simulacros en forma regular para revisar la preparación de los empleados.

## **12.5. Centrales de tratamiento de residuos**

### **12.5.1. Conceptos básicos**

La Planta Central de Tratamiento que se discutirá corresponde a la Planta Kommunekemi en Dinamarca, la cual efectúa tratamiento químico de residuos inorgánicos, e incinera un amplio rango de residuos orgánicos. La Figura 12.5 muestra la distribución de esta planta.

Puesto que la finalidad de una planta central de tratamiento es la de proteger el ambiente por medio de instalaciones seguras de disposición, el diseño y la operación de este tipo de plantas deben incorporar medidas de prevención de todo tipo de contaminación ambiental que pudieran resultar de las operaciones. Entre estas se pueden mencionar.

- Los efluentes acuosos derivados de las operaciones de tratamiento deben cumplir con las especificaciones de descarga;
- Las emisiones gaseosas de las operaciones de incineración deben también cumplir con las normas. Los equipos de limpieza de gases son componentes esenciales en el diseño del incinerador.
- Los sólidos que resulten de los procesos de tratamiento deben ser suficientemente inertes, para ser enviados en forma segura a vertederos.
- En el interior de la planta de tratamiento, debe minimizarse la posibilidad de contaminación del subsuelo debido a operaciones de transferencia, o fracturas de cañerías o estanques, inundaciones, etc., y se deben adoptar las prácticas seguras y los sistemas de tratamiento de cualquier derrame o fuga.
- Se deben tomar las medidas para el tratamiento de los derrames y fugas, y se deben formular los planes de emergencia en forma anticipada para atacar cualquier problema de incendio, explosión, etc.

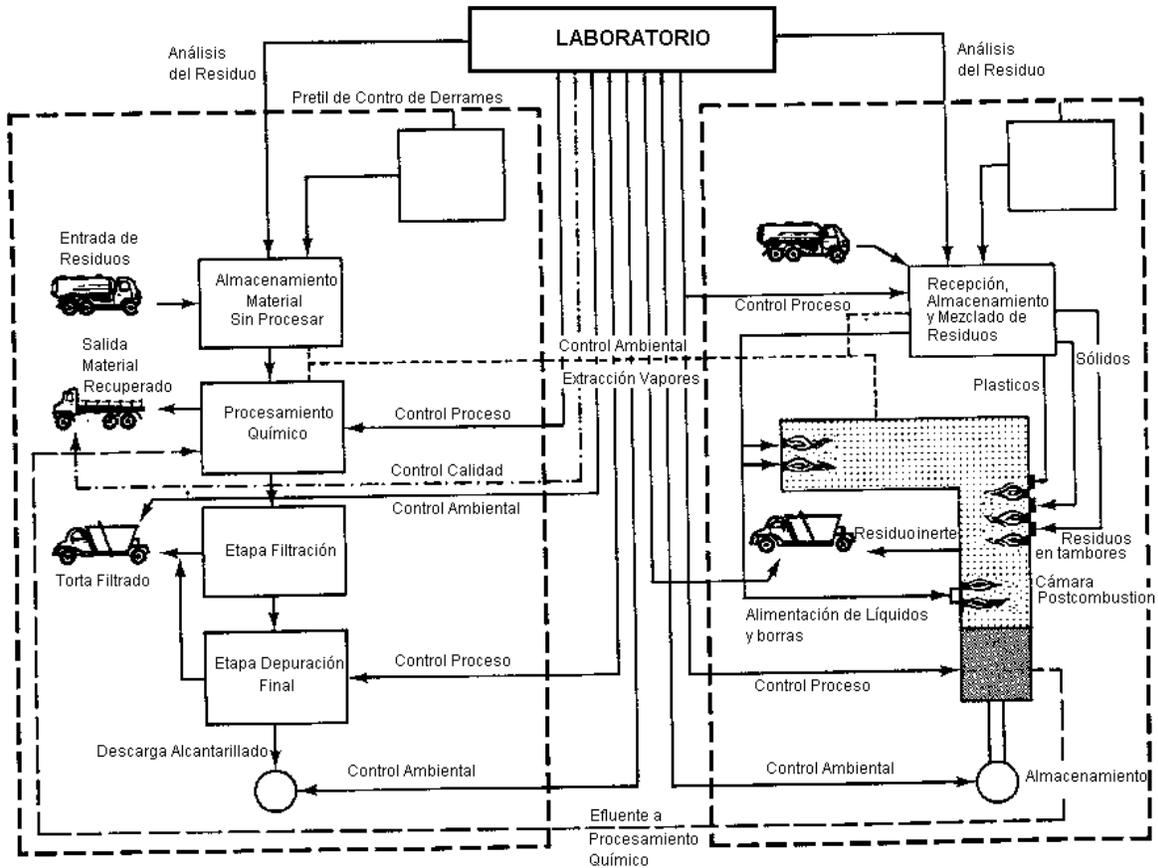
### **12.5.2. Diseño de centrales de tratamiento**

Debido a que los peligros asociados con una planta de tratamiento de residuos son similares a los de la industria de procesos químicos, se deben aplicar los mismos criterios, pero teniendo en cuenta que como se manejan sustancias peligrosas, la localización de este tipo de plantas debe considerar un área donde un posible malfuncionamiento o posibles emisiones no afecten el ambiente o sectores poblados.

El diseño conceptual de una planta de tratamiento se muestra en la Figura 12.6 para el caso de tratamiento químico de residuos inorgánicos, e incineración para los residuos orgánicos. La secuencia del paso de un residuo en este tipo de planta es la siguiente:

- Recepción

- Inspección
- Ensayos
- Test de tratabilidad, etc
- Almacenamiento/Mezclado
- Separaciones Sólido/Líquido
- Incineración
- Tratamiento Químico
- Disposición de Residuos



**Figura 12.6 Diseño Conceptual de Planta de Tratamiento**

### 12.5.3. Descripción de procesos de tratamiento

#### **a) Procesamiento químico de residuos inorgánicos**

La recepción de los residuos se efectúa en el área de pre-procesamiento. La recepción puede en forma a granel en estanques de ferrocarril o en lotes de recipientes de 30, 45, ó 200 l. Los residuos sólidos se pueden recibir en diferentes tipos de vehículos o contenedores; incluso en tambores de diferentes tamaños. Es esta etapa el laboratorio efectúa los ensayos químicos para asegurarse que los materiales está de acuerdo a la información entregada, y además efectúa una

caracterización de los residuos. La característica de los residuos tales como concentraciones, determinan tipo y cantidad de productos químicos para tratar los residuos.

Después de los análisis, el residuo se planifica para el procesamiento químico y el tratamiento químico necesario se efectúa en forma discontinua. En esta etapa, el laboratorio efectúa los controles del proceso monitoreando las etapas de reacción. Este monitoreo se hace ya sea por instrumentación directa o por análisis selectivo. Para eliminar la posibilidad de olores, los vapores son extraídos de las unidades de reacción y enviados ya sea al incinerador o a un sistema de absorción separado.

El queque inerte resultante se remueve del filtro prensa y se envía a cajones de disposición. Después que el laboratorio certifica que estos materiales son insolubles en agua, se envía para despacho a un sitio de vertedero. La fase acuosa del sistema de filtración es analizada por el laboratorio, y si se encuentran altos niveles de componentes tóxicos, el efluente se somete a un proceso de retratamiento para remover la contaminación. Toda fase sólida resultante se envía a la zona de filtración.

La calidad del efluente final se somete a una especificación de acuerdo a las normas locales. Por lo tanto es esencial que el laboratorio certifique cada operación de tratamiento antes de efectuar la descarga del efluente.

## **b) Incineración**

Como se muestra en la Figura 12.6, la primera etapa de la planta de incineración consiste en la recepción y almacenamiento del material. Como en el caso de los residuos inorgánicos, el material es recibido a granel vía estanques en camiones o en una variedad de paquetes incluyendo contenedores con envases plásticos. Nuevamente el laboratorio debe efectuar los análisis por las mismas razones. Los materiales se programan desde el almacenamiento para cumplir con los requisitos en términos de viscosidad, valor calorífico, contenido de humedad y tipo de material. Los líquidos y borras después del mezclado son introducidos al sistema de alimentación líquida y son encendidos en las cámaras apropiadas, de acuerdo a la planificación de cargas. Los tambores de residuos orgánicos son perforados justo antes de ser alimentados al incinerador de tambor rotatorio.

Los gases de combustión pasan a la cámara de post-combustión para asegurar una combustión completa y posteriormente a la cámara de lavado de gases para remover los gases ácidos, tales como ácido clorhídrico producido en la combustión de plásticos clorados, y el material particulado de los gases de salida. La acidez del agua de lavado es monitoreada por el laboratorio. Desde la cámara de lavado de gases, los gases limpios se envían a la chimenea de descarga. En esta etapa, el laboratorio monitorea la calidad de los gases de descarga.

## **c) Control de olores**

El área abierta de almacenamiento de tambores está equipada con sistemas de extracción para recolectar y controlar los humos. Los humos son recolectados y alimentados al incinerador para prevenir problemas de olores en las instalaciones. En forma similar, sistemas de extracción de aire

se instalan en los estanques de almacenamiento para controlar los olores en las descargas y almacenamiento de materiales tóxicos en esa área.

#### d) Control de fugas y drenajes

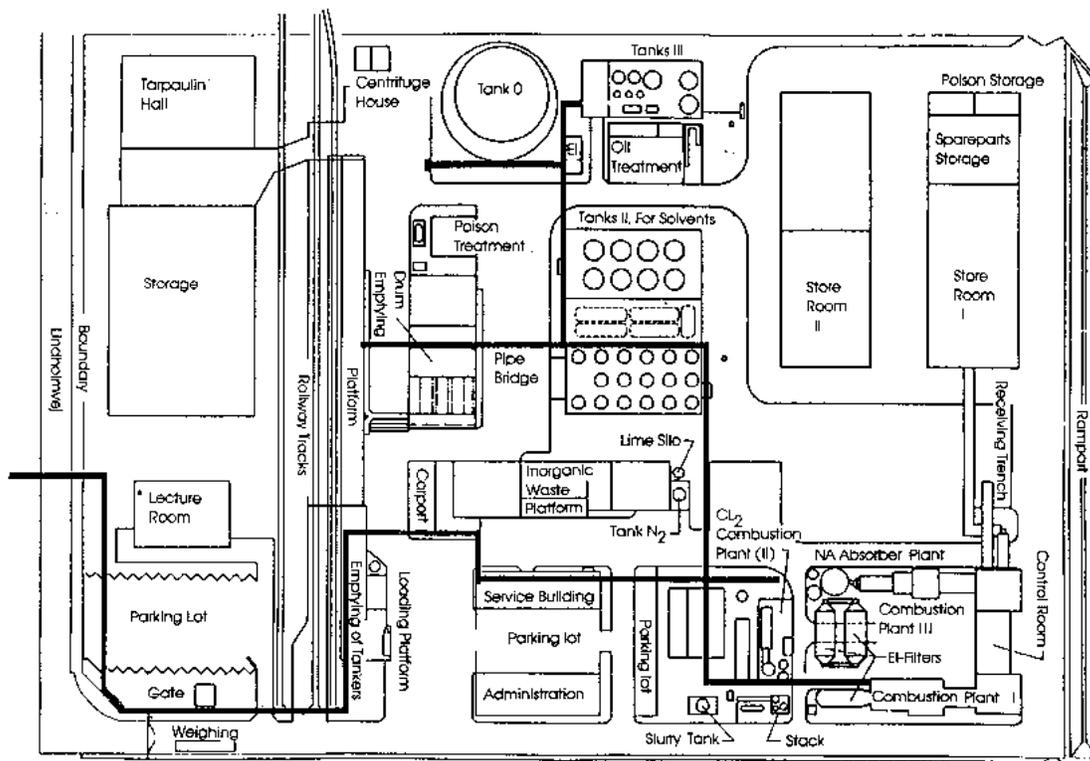
Finalmente, del diagrama se puede ver que ambas instalaciones están rodeadas por drenajes de derrames o fugas, los cuales están conectados con un pozo para cada función. En caso de un eventual derrame, el área puede ser limpiada, y los líquidos del derrame y de las aguas de lavado se bombean de los respectivos pozos al área de almacenamiento para ser procesado de manera correcta.

#### e) Instalaciones anexas

La instalación debe contar con sus respectivas oficinas de recepción, ventas, contabilidad, administración y mantenimiento.

### 12.5.4. Descripción de diagrama de planta

Se mostrarán dos esquemas de plantas reales: La planta Kommunekemi de Dinamarca, y la Rechem International Limited de Inglaterra. La Planta Kommunekemi de Dinamarca que se muestra en la Figura 12.5, cubre un área de 6.5 ha..



Source: Palmark, Mogens. 1984. Paper presented at the 2nd International Symposium on Operating European Centralized Hazardous (Chemical) Waste Management Facilities in September, Odense, Denmark.

La Planta de Kommunekemi procesa por incineración 33,000 ton/año, y 2,500 ton/año en la planta química, y contiene almacenamiento de residuos sólidos, oficinas de administración y laboratorios, balanza de pesaje, edificio de mantenimiento, etc. Las principales secciones son :

- Sección de recepción y vaciado de residuos;
- Zona de estanques;
- Planta de recuperación de aceites residuales;
- Planta de tratamiento químico de residuos inorgánicos;
- Planta de incineración para residuos orgánicos.

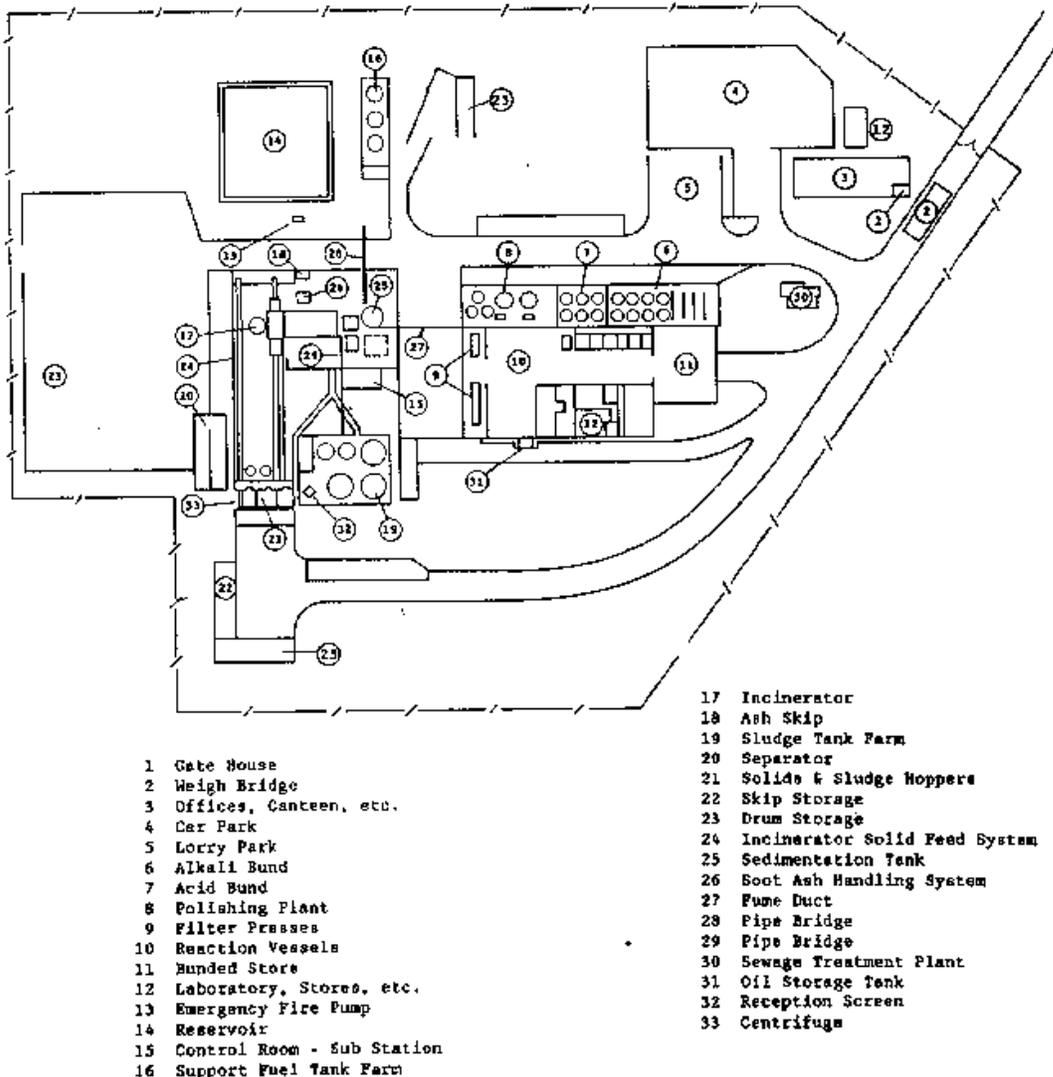


Figura 12.7 . Planta de Tratamiento de ReChem International. Gran Bretaña

La planta de ReChem International, es más pequeña y apropiada para países en desarrollo. Cubre un área de 1.5 ha. y su distribución se muestra en la Figura 12.12.

Las operaciones de tratamiento químico y de incineración son independientes, y cada una tiene sus estanques de almacenamiento, área de tambores, de ácidos, álcalis, combustibles, y área general de residuos orgánicos. El tratamiento químico se efectúa en forma discontinua, en cinco reactores de acero inoxidable de 10 m<sup>3</sup> cada uno. La capacidad anual máxima es de 10,000 ton. El incinerador tiene una capacidad de 2 ton/h.

### **12.5.5. Procedimientos administrativos**

#### **a) Introducción**

Los procedimientos que se incluyen en la operación de una planta central de tratamiento de residuos son similares a los empleados en cualquier planta de manufactura, e incluyen:

- Recepción de material o residuos;
- Control de almacenamiento y stock de materiales;
- Planificación de procesos;
- Control de procesos;
- Descarga de efluentes después de certificar que cumplen los criterios reguladores.

#### **b) Costeo y revisión de residuos**

La Figura 12.8 muestra un formulario típico usada para revisar y costear los residuos que llegan a una planta de tratamiento. El productor de los residuos describe las características del material y los análisis en la parte A del formulario y entrega una muestra del residuo. El formulario y la muestra se entregan en el laboratorio de la planta el que revisa la parte A y efectúa análisis adicionales necesarios para diseñar el esquema de tratamiento del residuo y lo informa en la parte B. El formulario es enviado al Jefe de Procesos quién describe en la parte C como será tratado el residuo. El formulario es enviado al personal administrativo quién calcula el costo de tratamiento basado en la información del formulario. Entre los factores que afectan el costo del tratamiento están: la cantidad y costo de los productos químicos usados en el tratamiento, el grado de complejidad del esquema de tratamiento, y la dificultad de manejo del residuo.

#### **c) Recepción de residuos**

Cuando el presupuesto es aceptado, el procedimiento de manejo del residuo comienza. Se levanta un recibo de cada envío de residuo. Este puede comprender distintos colores en el formulario para identificar el residuo. La información requerida en el formulario se envía con copias a la portería, el laboratorio, y al Jefe de Planta. La portería, teniendo conocimiento previo

del envío, dirige la carga a la zona de balanza y desde ahí a la zona de almacenamiento apropiada. Es una práctica segura y previsoramente verificar el contenido de la carga (característica del residuo) antes de efectuar el vaciado del contenido en los estanques. Un pH erróneo u otro tipo de error pueden causar una reacción inesperada. El camión es pesado nuevamente al dejar la planta. Un recibo de pesada es agregado a la Copia 1 del Formulario, el cual vuelve a la administración. La Copia 2, con el peso del residuo, vuelve al laboratorio, donde se efectúa un análisis adicional de la muestra del envío, para confirmar que concuerda con la descripción previa y se registra en la Copia 2. Las Copias 2 y 3 vuelven al Jefe de Planta. Se mantiene un registro en la portería, tanto de los formularios de trabajo y de los nombres de los productores de residuos, así como un registro permanente de los residuos que llegan. Los residuos son etiquetados con un código de trabajo cuando son almacenados.

#### **d) Planificación del tratamiento**

Se debe efectuar una reunión diaria entre personal de Incineración, Tratamiento Químico, Laboratorio y el Jefe de Planta, para determinar el programa de tratamiento. Se diseña una lista, detallando los números de trabajo (por ejemplo de acuerdo a los códigos del Formulario), el área de almacenamiento de los envíos, y el modo y forma del tratamiento.

Los programas de incineración deben incluir detalles de las operaciones de mezclado, y cualquier requerimiento especial, como por ejemplo mantener temperaturas altas para la incineración de PCBs.

#### **e) Control de procesos y registro de datos**

El control del tratamiento químico y del proceso de incineración debe ser efectuado por el laboratorio (si se necesitan análisis químicos) y por los operadores. Las condiciones de operación del incinerador tales como temperatura, pérdida de carga del ventilador, pH del agua de lavado, etc, se miden con analizadores en línea y se registran en registradores de carta. Estas mediciones se deben efectuar también en forma manual cada media hora en el formulario diario. Este formulario también contiene los flujos alimentados de residuos e identifica del origen del almacenamiento (número de estanque, número de tambor, etc) y el número del trabajo, de acuerdo al programa diseñado para ese día.

Las reacciones químicas en la planta de tratamiento son monitoreadas por los operadores, manteniendo un récord de cada envío de residuo identificado por su número de trabajo. El sistema de alarmas es muy importante. Todas las reacciones químicas deben tener un monitoreo automático para el pH, temperatura, presión, etc. Todos los equipos de seguridad deben estar al alcance y deben ser mantenidos en forma regular en caso de escape de reacciones y de otro tipo de emergencias.

Se debe tener una estadística permanente de las emisiones de la planta de tratamiento, así como de los efluentes líquidos los cuales deben cumplir con las normas regulatorias. Se debe

preparar una planilla semanal a partir de los archivos diarios, tanto para el tratamiento químico como para los efluentes de incineración. Un ejemplo se muestra en la Figuras 12.9 y 12.10.

Finalmente se hacen archivos de las copias 1,2 y 3 del formulario de trabajo, de la fecha del tratamiento para el envío de residuo. Las copias se archivan.

**Figura 12.9. Ejemplo de formulario semanal de planta química**

Formulario Semanal Planta Química

Semana: .....

	<b>Día</b>	<b>Lunes</b>	<b>Martes</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Jueves</b>	<b>Viernes</b>
<b>Efluente Líquido</b>	<b>Muestra</b>					
	<b>pH</b>					
	<b>CN<sup>-</sup>, ppm</b>					
	<b>Cr, ppm</b>					
	<b>SO<sup>-</sup>, ppm</b>					
	<b>Ni, ppm</b>					
	<b>Cu, ppm</b>					
	<b>Zn, ppm</b>					
	<b>Pb, ppm</b>					
	<b>Cd, ppm</b>					
	<b>DQO, ppm</b>					
	<b>O<sub>2</sub></b>					
	<b>S/Sólidos, ppm</b>					
	<b>Notas</b>					
<b>Queque Filtro</b>	<b>pH</b>					
	<b>CN<sup>-</sup>, ppm</b>					
	<b>Cr, ppm</b>					
	<b>S<sup>-</sup>, ppm</b>					
	<b>Ni, ppm</b>					
	<b>Cu, ppm</b>					
	<b>Zn, ppm</b>					
	<b>Pb, ppm</b>					
	<b>Cd, ppm</b>					
	<b>Notas</b>					

**Figura 12.10. Ejemplo de formulario semanal de incinerador**

Datos Semanales de Planta Incinerador      Semana: .....

		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Acidez Gas	HCl gm/m <sup>3</sup>					

Sistema de Absorción	Agua Reb.: pH					
	S.T.D. % p/p					
	Agua Ali: pH					
	S.T.D. % p/p					
	S/sól.; ppm					

Cenizas de Incinerador	Ceniza % p/p					
	Borra: pH					
	Orgánicos					
	S					
	Niveles ppm Ni-Zn-Pb Cd-Cu-Cr					

Alimentación de Residuos	Estanque N°					
	pH					
	V.C. kJ/kg					
	Ceniza % p/p					
	Cl % p/p					
	Metales Pesados, %p/ p					

Carga a los estanques	Estanque N° Alim residuo
--------------------------	--------------------------------

## **12.6. Análisis de seguridad de las instalaciones**

### **12.6.1. Introducción**

Una instalación de manejo de residuos peligrosos generalmente abarca un amplio rango de productos químicos y procesos. La incertidumbre en la composición de los residuos, el posible error humano, y las fallas de los equipos, significan un elemento de peligro para los empleados y la comunidad vecina. Como ejemplo la Tabla 12.1 entrega posibles malfuncionamiento de las operaciones de un incinerador.

**Tabla 12.1. Potenciales Malfuncionamientos Operacionales de un Incinerador**

<b>Operación</b>	<b>Posible Malfunción</b>	<b>Consecuencia</b>
Llenado de estanque	1. Nivel sobrepasado 2. Fuga de sello bomba, empaque de válvula 3. Ingreso de residuo no autorizado por mal control	Derrame de residuo Derrame pequeño de residuo  Posibles dificultades de incineración
Trasferencia a través de bomba y filtro	1. Fuga por sello de bomba, corrosión de material, etc. 2. Obstrucción de filtro	Pequeño derrame de residuo  Ninguno si filtro descarga en medición de alta presión
Inyección de residuo al incinerador	1. Bloqueo de orificio (detección de bajo flujo) 2. Atomización de aire en falla de soplador	Detención temporal  Falla de combustión, descarga de vapores tóxicos, acumulación de líq
Incineración	1. Pérdida de llama debida a pérdida de presión de combustible, pérdida de aire primario, coquificación o agua en alimentación  2. Flujo de combustible impropio 3. Mala razón aire/combustible 4. Inyección a una zona fría de combustión en la partida	Descarga transiente de vapores tóxicos previo a la detención automática por detección de pérdida de llama. Una capa de agua en el tanque se aísla por medición de conductividad  Exceso de producción de residuo Combustión ineficiente Combustión ineficiente
Lavado de gases de absorbedor	1. Falla de bomba de solución lavadora 2. Solución de lavado débil	Alta concentración de HCl en gases de chimenea  No mucho cambio, aún el agua es un

	3. Fuga en bomba, válvula o estanque	solvente buen lavador Derrame de solución lavadora (sin consecuencia si se usa agua)
Tratamiento de aguas residuales	1. Falla bomba de adición de químicos 2. Fuga de bomba, válvula o tanque	Descarga de bajo pH Pequeño derrame de agua

**12.6.2. Metas de Seguridad**

**12.6.3. Identificación de Riesgos**