

N.º 112  
REV.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"ANALISIS DEL PROBLEMA DE LA DISPOSICION  
FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS SOLIDOS  
Y LIQUIDOS"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**Juan Manuel Sánchez Velázquez**

**MEXICO, D. F.**

**1992.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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

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

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

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

ANALISIS DEL PROBLEMA DE LA DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS  
PELIGROSOS SOLIDOS Y LIQUIDOS.

CAPITULO I. INTRODUCCION. ....

CAPITULO II. SITUACION ACTUAL DEL PAIS EN MATERIA  
DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS... 10

II.1 Residuos peligrosos.....	11
II.2 Situación actual en México.....	12
II.3 Disposición final.....	16
II.4 Conceptos básicos.....	13

CAPITULO III. DESCRIPCION DE LAS ETAPAS EN EL MANEJO DE RESIDUOS  
PELIGROSOS..... 20

III.1 Recolección.....	24
III.2 Almacenamiento.....	25
III.3 Transporte.....	27
III.4 Tratamientos para amortiguar las propiedades de los residuos peligrosos.....	29
III.5 Desechos incompatibles.....	33
III.6 Incineración de desechos.....	35

III.7 Disposición final .....	
<b>CAPITULO IV. FUNDAMENTOS DEL CONFINAMIENTO CONTROLADO.....</b>	<b>5</b>
IV.1 Requisitos que debe cumplir los sitios a alojar un confinamiento controlado.....	55
IV.2 Infraestructura necesaria.....	62
IV.3 Construcción de celdas.....	68
IV.4 Reglamentación de los confinamientos controlados.....	74
<b>CAPITULO V. GENERACION Y CONTROL DE LIXIVIADOS EN TIRADEROS CLANDESTINOS Y CONFINAMIENTOS CONTROLADOS.....</b>	<b>74</b>
V.1 Conceptos básicos.....	75
V.2 Factores que afectan la generación de lixiviados.....	83
V.3 Problemas que generan los lixiviados.....	89
V.4 Control de lixiviados.....	95
V.5 Métodos de control.....	100
<b>CAPITULO VI. SITIOS POSIBLES DE INSTALACION DE CONFINAMIENTOS CONTROLADOS EN EL VALLE DE MEXICO.....</b>	<b>105</b>
<b>CAPITULO VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>119</b>

**CAPITULO I.**  
**INTRODUCCION**

## CAPITULO I. INTRODUCCION

En el presente trabajo se aborda un problema de actualidad como son los residuos peligrosos y el manejo a que son sometidos. Dicho problema no es reciente, aunque en los últimos años se ha visto agravado por el aumento de los procesos industriales y la complejidad de los residuos. La opinión pública se ha centrado en los problemas ecológicos del aire, y de algunas especies en peligro de extinción, desgraciadamente se ha soslayado la contaminación de suelos producida por los residuos industriales lo que ha retrasado mucho la atención al problema.

En nuestro país recién se ha empezado a conocer la magnitud del problema, y la SEDUE, que es la instancia indicada para normar el vertido de residuos peligrosos, aún no tiene la capacidad para controlar la situación, por lo que hay infinidad de tiraderos clandestinos o se vierten al drenaje, creando peligrosos focos de envenenamiento.

En todos los procesos de la industria hay residuos, algunos de los cuales no representan un peligro grave para el medio ambiente, pues se pueden degradar en poco tiempo; desgraciadamente el progreso ha hecho que la cantidad de residuos industriales haya aumentado, aunado a un utilización intensivo de las materias primas, que aumenta la complejidad de los residuos, los cuales pueden tener características que lo hacen peligroso. Dichas características son: corrosividad, explosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad, las cuales tienen, en mayor o en menor grado, los residuos industriales. La SEDUE ha emitido las normas en las cuales se establecen los límites permisibles dentro de los cuales un residuo aún no es peligroso.

Los residuos industriales actualmente representan una de las principales fuentes de contaminación ambiental. En el presente trabajo se aborda este problema en el capítulo de SITUACION ACTUAL DEL PAIS EN MATERIA DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS, donde se presenta un panorama de la situación actual en la República Mexicana, asimismo se definen los conceptos básicos para entender el tema pues es necesario conocer conceptos que no son propios de la ingeniería civil, tales como la química y la biología, por lo que se da un pequeño esbozo acerca de los tópicos a conocer.

9

Una vez enterados del problema, se pasa a la DESCRIPCION DE LAS ETAPAS EN EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS, en el cual se describen brevemente todas las etapas a las que deben someterse los residuos peligrosos; asimismo, se dan a conocer las dificultades técnicas que entraña manejarlos.

Una vez tratadas las diferentes posibilidades de disposición final de los residuos peligrosos, se aborda, de manera más profunda, el confinamiento controlado como la posibilidad más viable para la situación del país. En el capítulo de FUNDAMENTOS DEL CONFINAMIENTO CONTROLADO se discuten los requisitos que deben reunir los sitios para la instalación de este tipo de infraestructura.

En el capítulo de GENERACION Y CONTROL DE LIXIVIADOS, se trata un problema originado por la existencia de los tiraderos clandestinos, y que afecta gravemente a los mantos acuíferos, que son vitales para las poblaciones, y que en nuestro país es un recurso cada vez más escaso. Se presentan algunas investigaciones y se tratan algunas soluciones para controlar este problema.



En el capítulo de SITIOS POSIBLES DE INSTALACION DE CONFINAMIENTOS CONTROLADOS EN EL VALLE DE MEXICO, se presenta un breve estudio sobre la cuenca del Valle de México en base a una zonificación hidrológica hecha por el DDF, y analiza brevemente las posibilidades de instalar un confinamiento controlado para la disposición final de los residuos peligrosos generados en la zona industrial del Distrito Federal y municipios conurbados del Estado de México.

**CAPITULO II.**

**SITUACION ACTUAL DEL PAIS EN MATERIA DE DISPOSICION  
FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS**

## CAPITULO II. SITUACION ACTUAL DEL PAIS EN MATERIA DE DISPOSICION DE RESIDUOS PELIGROSOS.

A partir de la década de los 40's, en la que se acelera la industrialización del país, la generación de residuos peligrosos, producto de las transformaciones y extracciones de la materia prima, va en aumento; el grado de toxicidad de los desechos es variable, dependiendo de la industria generadora.

Sin embargo, a pesar del conocimiento del daño que se puede causar al ser humano y al medio ambiente que lo rodea, es común el derrame directo de los residuos; líquidos al drenaje y de los sólidos a oquedades naturales, minas abandonadas y en general en cualquier lugar que pueda disimular los tiraderos.

II.1. Residuos Peligrosos. Un residuo es peligroso cuando por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes representa un peligro para el equilibrio ecológico o al ambiente (Gaceta Ecológica No. 1).

Para determinar si un residuo es peligroso o no, se aplicará el criterio CRETÍ de la SEDUE, en el que establecen cinco características, cuya presencia determinará el carácter del residuo. Estos cinco parámetros son:

Corrosividad. de acuerdo al PH, menor o igual a dos, muy ácido; mayor o igual a 12.5 muy básico o alcalino.

Reactividad. Este parámetro está basado en la facilidad del residuo para combinarse con otros compuestos o descomponerse espontáneamente.

Explosividad. Se toma en cuenta la facilidad de algunos materiales a explotar cuando se le golpea, o se aumenta la temperatura.

Toxicidad al ambiente. Se basa en los componentes del residuo que son dañinos al medio ambiente.

Inflamabilidad. Si se tiene un alto contenido de compuestos inflamables, gases comprimidos o tiene punto de inflamación a temperaturas normales (60°C).

II.2. Situación actual en México.

Actualmente se desconoce exactamente la cantidad generada en el país, y las estimaciones varían entre 5,000 y 200,000 toneladas diarias de residuos peligrosos (Herrera, 1990), que son producidos en las diversas zonas industriales del país, entre las que se pueden mencionar a la Ciudad de México y zonas adyacentes (Naucalpan, Tlanepantla, etc.), Guadalajara, Monterrey, Lerma, San Luis Potosí, Querétaro, etc. De la totalidad generada, es mínima la parte a la que se le dá un manejo adecuado provocando una situación particularmente difícil por el alto costo para descontaminar los lugares afectados.

Dentro de las Industrias de transformación, aquéllas cuyos procesos que se consideran como generadores de la mayor cantidad de residuos peligrosos son: la Química orgánica e inorgánica, plaguicidas, explosivos, galvanoplastia y metales no ferrosos, que producen entre otros productos residuales, sustancias orgánicas de alta toxicidad y metales pesados (arsénico, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, plomo y selenio).

Otro gran productor es la industria petroquímica que genera hidrocarburos pesados, fenoles, lodos de sus sistemas de tratamiento y catalizadores agotados (catalíticos). Por su parte la industria extractiva crea alrededor de 7000 toneladas diarias.

Para este efecto, la SEDUE empezó a emitir las Normas Técnicas Ecológicas (NTE), tendientes a reglamentar la producción la generación de residuos peligrosos; para esto emitió el aviso

publicado en el Diario Oficial el 3 de mayo de 1989, en el que da a conocer los formatos en los que las industrias deben declarar el volúmen y tipo de residuos peligrosos, manifiestos que se deben hacer mensual y semestralmente.

Debido a problemas económicos, falta de personal especializado, y a que es una legislación reciente, en México no se controla al 100% la generación de residuos peligrosos (Desiga, 1991). En el país solamente existe un confinamiento público funcionando, ubicado en Mina, Nuevo León; el de San Luis Potosí, está fuera de servicio. Este recibe desechos de tipo orgánico, sedimentos de lagunas de aireación, polimeros, lodos de pinturas, filtros de desecho, sólidos de ácido acético, componentes caducos, etc.

En cuanto a las empresas que confinan sus propios desechos peligrosos son:

EDO.	COMPAÑIA	DESECHO CONFINADO
Baja Cal. Nte.	Fracc. Ind. del Norte	borras
Jalisco	Ind. Químicas de Mex.	fosfoyeso, nutrofos
México	Polifos S.A.	material pirofórico
Morelos	Química Mexama	micelio orgánico

Como un ejemplo de lo que puede provocar la falta de control en el manejo de residuos peligrosos, se pueden tomar los casos de contaminación por confinamientos no controlados (Love Canal) y por derrame de residuos peligrosos, dioxona, altamente tóxica (Times Beach), ambos casos en E.U.; también en Japón hubo un envenenamiento masivo por contaminación de mercurio en la bahía de Minamata, que afectó al pescado destinado al consumo humano. En México, el caso más conocido es el de Cromatos de México, en Cuautitlán, Edo. de Méx. en donde se derramaron desechos que contienen cromo hexavalente. (Herrera, 1990).

Desgraciadamente muchos de los residuos peligrosos se han derramado a los ríos, generando contaminación no sólo en las zonas generadoras, sino también en las regiones ubicadas aguas abajo de éstas (Rosales, 1990). A continuación se muestran algunos ejemplos:

CUENCA	ZONA GENERADORA
Río Panuco	Cd. de México
Río Lerma-Santiago	Lerma-Toluca
	Salamanca
	Celaya
	Irapuato
	Corredor Ind. El Salto
	Guadalajara
Río Blanco	Cd. Mendoza

Córdoba

Orizaba

### II.3. Disposición final.

Se entiende como la acción de depósito permanente de los residuos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños al ambiente. Esta disposición final puede realizar en: Confinamiento Controlado, Formaciones Geológicas Estables, presa de jales y Receptores de Agroquímicos.

De las tres formas existentes, este trabajo se enfocará a analizar los primeros, por la amplia gama de residuos peligrosos que pueden recibir, a diferencia de los Receptores de Agroquímicos, los cuales sólo recibirán fertilizantes desechados o caducos y sus envases, así como plaguicidas. En cuanto a la disposición final en Formaciones Geológicas Estables solamente se tratarán someramente por el tipo de tecnología que es necesaria y que actualmente se encuentra en pleno desarrollo.

Los Confinamientos Controlados se definen como la obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de residuos y materiales peligrosos.

### II.4. Conceptos básicos.



Para entender la problemática que representa el manejo de desechos peligrosos , entendiéndose por manejo la recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final, se tienen que entender algunos fenómenos que están íntimamente ligados con los residuos, y aunque algunos de estos conceptos no corresponde al campo de estudio de la ingeniería civil, es necesario abarcarlos de una manera superficial. A continuación, algunas conceptos y definiciones.

II.4.1. Iones. En la naturaleza hay diversos elementos químicos, cada uno diferente de los demás, algunos tienen más capacidad que otros para reaccionar o combinarse al contacto con otros elementos, formando compuesto de diferentes propiedades y características de aquellos que le dieron origen.

Un ión es un átomo o grupo de átomos eléctricamente cargados, cuando tiene carga negativa se le llama anión; por el contrario, se llama catión cuando que posee carga positiva, los cationes son normalmente átomos metálicos.

Cada catión, dependiendo de su estructura atómica, o sea del número de electrones en su último nivel de energía, tiene mayor o menor capacidad para reaccionar con otro elemento o de adsorberse, o sea ligarse por medio de enlaces atómicos que hace

que los iones sean retenidos en la superficie molecular de una sustancia. Los enlaces atómicos pueden ser iónicos electrovalentes, covalente o a través de un átomo de hidrógeno:

II.4.2. Enlace iónico o electrovalente. Se establece entre dos átomos que tengan incompleto el último nivel de energía, de manera que un átomo pierde uno o varios electrones, quedando ambos elementos desbalanceados eléctricamente, teniendo carga positiva o negativa, según haya perdido o ganado electrones, respectivamente.

II.4.3. Enlace covalente. se presenta entre dos átomos que tienen deficiencia de electrones en el último nivel de energía, compartiendo uno o más pares de electrones, de manera que ambos cubren la falta de electrones quedando un compuesto o molécula estable.

II.4.5. Enlace por medio de un nivel de hidrógeno. En éste tipo de enlace un átomo de hidrógeno sirve de cadena entre dos átomos, pues cede el electrón al átomo más pesado y queda el núcleo cargado positivamente para atraer otro átomo o ión.

II.4.6. Adsorción. Cuando un ión queda retenido por cualquiera de los enlaces anteriormente descritos se dice que ha sido adsorbido. Este fenómeno puede ocurrir entre gases, líquidos

que los iones sean retenidos en la superficie molecular de una sustancia. Los enlaces atómicos pueden ser iónicos electrovalentes, covalente o a través de un átomo de hidrógeno:

II.4.2. Enlace iónico o electrovalente. Se establece entre dos átomos que tengan incompleto el último nivel de energía, de manera que un átomo pierde uno o varios electrones, quedando ambos elementos desbalanceados eléctricamente, teniendo carga positiva o negativa, según haya perdido o ganado electrones, respectivamente.

II.4.3. Enlace covalente. se presenta entre dos átomos que tienen deficiencia de electrones en el último nivel de energía, compartiendo uno o más pares de electrones, de manera que ambos cubren la falta de electrones quedando un compuesto o molécula estable.

II.4.5. Enlace por medio de un nivel de hidrógeno. En éste tipo de enlace un átomo de hidrógeno sirve de cadena entre dos átomos, pues cede el electrón al átomo más pesado y queda el núcleo cargado positivamente para atraer otro átomo o ión.

II.4.6. Adsorción. Cuando un ión queda retenido por cualquiera de los enlaces anteriormente descritos se dice que ha sido adsorbido. Este fenómeno puede ocurrir entre gases, líquidos

y sólidos, pero, para este caso, solamente se estudiará en líquidos y sólidos, particularmente entre un líquido infiltrado (lixiviado) y el suelo.

II.4.7. Intercambio catiónico en los suelos. Normalmente el suelo esta formado por materiales minerales. Estos son intercambiados en forma natural por la infiltración del agua, producto de las precipitaciones; ésta es generalmente baja en cationes. El contenido de cationes dependerá del tipo de suelo, de la zona que se analice y de la distancia recorrida por el agua antes de infiltrarse, ya que a su paso por la superficie va disolviendo sales que se integran al torrente.

El intercambio de cationes forma parte importante en la fertilización de los suelos, pues proporciona a la planta de los nutrientes necesarios y además la protege del exceso de sales y de los metales pesados, pues se vuelven insolubles una vez adsorbidos.

A causa de la naturaleza de las moléculas laminares de la arcilla; ésta tiene una gran capacidad para adsorber agua, es decir, el agua se encuentra entre las moléculas de la arcilla enlazada atómicamente por cualquiera de los tres tipos anteriormente vistos. Como las moléculas de agua son atraídas por el polo positivo, éstas quedan con una gran capacidad para atraer cationes.

De acuerdo con lo anterior, el intercambio de cationes lo entenderemos como la permuta de los iones metálicos adsorbidos en la arcilla por otros de mayor capacidad de reacción y/o mayor carga eléctrica positiva, que pasa en forma de solución a través de la masa del suelo.

II.4.8 Importancia del intercambio catiónico en la disposición final. Esta propiedad hace de las arcillas el material ideal para ser usado en rellenos sanitarios y confinamientos de desechos peligrosos, por su gran capacidad de intercambio catiónico y su baja permeabilidad, lo cual permite que los lixiviados resultantes puedan ser recolectados y no se infiltren hacia el subsuelo en donde podrían contaminar a los mantos acuíferos, y sobre todo, la arcilla atrae y capta a los metales pesados de los cuales es difícil descontaminar.

II.4.9. Selectividad de los Elementos. Los metales están clasificados en una escala técnica, según la capacidad decreciente de intercambiarse. A continuación se muestra la escala:

Ba > Sr > Ca > Cu > Zn > Mg > Ti > K > NH > Na > H

Esta escala marca en general la capacidad de intercambio catiónico; así, si la arcilla tiene iones de sodio adsorbidos, estos pueden ser sustituidos por iones de amoníaco y a su vez éstos por iones calcio.

Aunque ciertas condiciones hacen que varíe la selectividad de los elementos, existen algunas reglas empíricas que pueden ser usadas para entender el intercambio catiónico en estas condiciones:

1.- A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias, el poder de intercambio aumenta con la valencia del ión cambiante.

2.- A bajas concentraciones acuosas, temperaturas ordinarias y valencias constantes, el poder de intercambio aumenta con el número atómico.

3.- A altas concentraciones, las diferencias en el poder de intercambio disminuyen y en algunos casos, el ión de más baja valencia tiene el mayor poder de intercambio.

II.4.10. Potencial de intercambio catiónico. Se puede medir cuantitativamente el potencial o capacidad de intercambio catiónico, a la unidad se le denomina miliequivalentes / 100 gr

[ meq / 100 gr ]

Esto significa que es el número de gramos (equivalentes al peso molecular del elemento), que pueden ser intercambiados en cada 100 gramos de suelo seco; esto nos da un indicador aproximado y sólo servirá para estimar el intercambio catiónico en los suelos.

II.4.11. Absorción y capacidad de campo. la primera es la capacidad que tiene el suelo de retener líquidos, en tanto la otra es la máxima cantidad de agua retenida por un suelo; si se sobrepasa esta cantidad, los líquidos sobrantes se percolarán, es decir pasarán a través del suelo arrastrando consigo los materiales solubles del suelo.

II.4.12. Filtración. A diferencia de la percolación, en este proceso el líquido pierde algunos elementos que se encontraban disueltos. La filtración en los suelos se realiza en lo que se llama matriz porosa, o sea, la parte sólida del suelo.

*CAPITULO III.*

*DÉSCRIPCION DE LAS ETAPAS EN EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS*



### CAPITULO III. DESCRIPCION DE LAS ETAPAS EN EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS.

En el manejo de residuos peligrosos se tienen definidas varias etapas: Recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final. A continuación se dará una breve descripción acerca de las actividades que engloban cada una de las etapas mencionadas.

#### III.1. RECOLECCION

La recolección es la acción de recoger a los residuos de los procesos industriales, ésta se puede hacer por medio de ductos o canaletas que dirijan a los residuos peligrosos hacia el área de almacenamiento, si los desechos son líquidos. En el caso de que sean sólidos se podrán recolectar por medio de tolvas o ductos u otros medios que evite fugas, una vez recolectados, los residuos podrán llevarse al área de almacenamiento a granel o embalarlos en contenedores. Los ductos deberán estar construidos de materiales resistentes a las propiedades corrosivas de los residuos.

### III.2. ALMACENAMIENTO.

Esta etapa se realiza en el mismo lugar en donde se genera, por lo que la zona de almacenamiento debe estar aislada de las zonas de producción y de administración, y se debe observar las especificaciones que al respecto dicta la SEDUE en el capítulo III del reglamento sobre residuos peligrosos.

El almacenaje puede ser a granel o en contenedores, en cualquier forma se deben evitar fugas y el contacto directo con los operarios u otros empleados del lugar.

En éste renglón juegan un papel importante los geotextiles en el caso de materiales corrosivos, que son difíciles de almacenar, en el mercado se cuenta con una variada existencia de estos materiales sintéticos que resisten a las propiedades de los residuos.

### III.3. TRANSPORTE.

Abarca el transporte desde el lugar en donde son generados hasta la planta de tratamiento, en donde se le dará un tratamiento para atenuar las propiedades que lo hacen peligroso. Esta etapa debe realizarse en vehículos acondicionados para tal efecto, a prueba de fugas, debido a la peligrosidad de los

residuos que lleva y para preservar la salud de los núcleos de población que se tengan que cruzar para llegar a la planta de tratamiento.

Sin embargo, la SEDUE en su Reglamento de la Ley Sobre Residuos Peligrosos no contempla ningún control que aumente la seguridad al cruzar poblaciones dejando ambigüedades al respecto.

De esta manera, el transporte queda sujeto a las prevenciones que tome el generador, pudiendo hacerse al aire libre sin envasar, o en envases inadecuados. Todo lo anterior hace que actualmente se presenten accidentes en los que están involucrados el transporte de materiales peligrosos en los que se han tenido casos de envenenamiento por intoxicación, quemaduras leves, etc.

El transporte se puede hacer en dos formas:

**A GRANEL.** en esta forma se debe contar con un vehículo debidamente acondicionado que evite derrames o fugas durante el trayecto. Este vehículo podrá ser pipa o caja cerrada, de ninguna manera se deberá transportar al aire libre o por vía aérea.

**ENVASADOS.** Aunque técnicamente sea más complicado en la carga y descarga, en las actuales circunstancias de carencia de infraestructura, es la forma más recomendable de realizar el

transporte. Estos envases pueden ser reutilizables o no, dependiendo del material de que estén fabricados y del que contengan.

Como normas generales para el envasado de residuos peligrosos se tomarán las siguientes sugerencias:

1) Los envases deben estar contruidos de manera que en condiciones normales de transporte no se debe presentar ninguna fuga debida a cambios de temperatura, humedad o presión.

2) Los envases que puedan romperse o perforarse con facilidad como la loza, porcelana, vidrio y materiales plásticos deberán ir embalados con un material amortiguador adecuado

3) La naturaleza y espesor del envase serán tal, que al rozamiento no se presente un calentamiento capaz de alterar la estabilidad química del compuesto contenido.

4) En caso de los desechos hospitalarios o los desechos resultantes de la limpieza de laboratorios que frecuentemente constan de productos químicos caducados o pasados, deberán colocarse en pequeños contenedores sin fugas, que serán sellados y firmemente empacados; rodeados de un material absorbente en la cantidad suficiente, que no será suceptible de reaccionar con el contenido de los contenedores.

- 5) Desechos incompatibles no deben estar contiguos.

En cuanto al material de que están hechos los envases, se pueden clasificar en tres grandes grupos:

a) Metálicos: Se entiende que serán de acero, fierro o alguna otra aleación resistente a las propiedades de los desechos peligrosos. Algunos que se pueden transportar en este tipo de contenedores son hidrocarburos, aceites, solventes, alcohol, sulfatos, etc. en general todo aquello que no reaccione o sea susceptible de combinarse con el metal.

b) Plásticos. En este renglón entra una amplia gama de materiales sintéticos como son el PVC, los polietilenos, etc.. Podrán envasarse en este tipo de contenedores los materiales que no debilitan al plástico o que lo corroan; por ejemplo: desechos de pesticidas, cianuros, alcohol, medicamentos caducos, etc.

c) Vidrio. El vidrio es el material que se utiliza para envasar a los materiales corrosivos, ya sea fuertemente ácidos o alcalinos, también se puede utilizar loza o porcelana, pero por su bajo costo y disponibilidad se prefiere al vidrio. Como es muy frágil se le debe embalar con un material amortiguante para evitar roturas y derrames.

En las figuras anexas se muestran los tipos de envases y su material, así como sus capacidades nominales (capacidad nominal es aquella para la cuál está diseñado el envase).

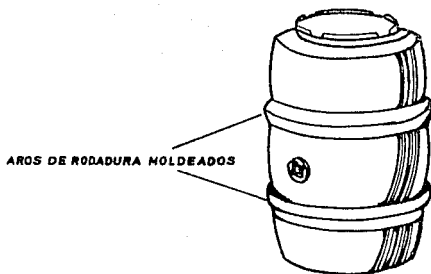
#### III.4 TRATAMIENTOS PARA AMORTIGUAR LAS PROPIEDADES DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.

Como lo marca la SEDUE en las NTE no se debe confinar a los desechos sin haberles aplicado un tratamiento previo, éste tiene como finalidad el disminuir las propiedades que lo hacen dañino al medio ambiente. Los desechos reactivos tales como los sulfatos y los cianuros suspendidos deberán ser tratados para neutralizarlos antes de ser envasados y colocados en el confinamiento.

Los desechos líquidos y lodos deberán ser deshidratados, solidificados o químicamente tratados para neutralizarlos y de este modo dejen de representar un peligro para la salud humana y el medio ambiente.

Los procesos químicos que a continuación se mencionan, sirven como base para las tecnologías de tratamiento de los desechos que se encuentren en forma de líquidos, sólidos o lodos.

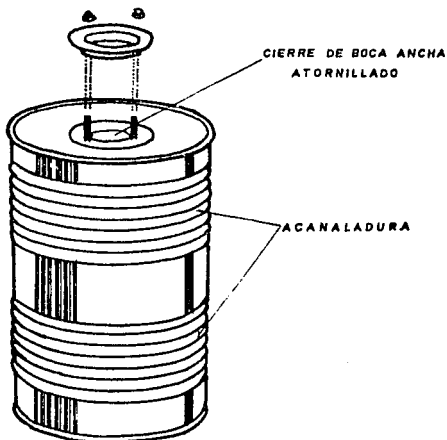
- Recuperación de componentes orgánicos
- Neutralización
- Oxido / reducción



GANNA DE CAPACIDADES  
NOMINALES MAS CORRIENTES

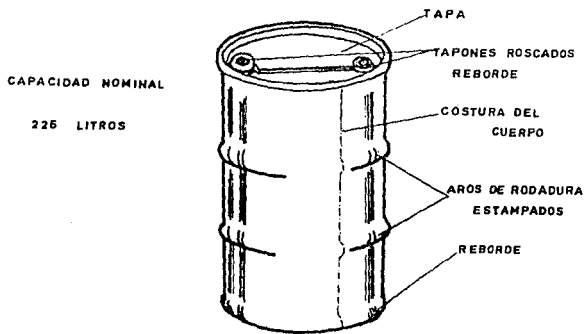
(60-225 LITROS)

Recipiente de plástico con tapa desmontable roscada



Recipiente metálico con tapa fija

FIG. III.1 TIPOS DE RECIPIENTES



Recipiente con tapa fija

Recipiente con tapa desmontable

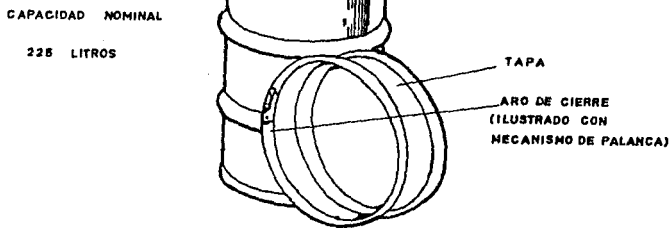
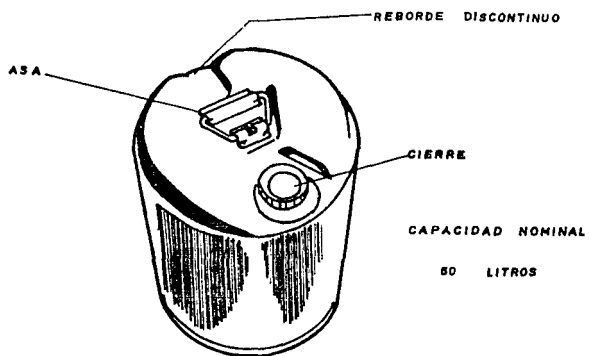


FIG. III. 2 RECIPIENTES METALICOS





*Sección transversal en el extremo superior*



**FIG. III.3 RECIPIENTE METALICO CON REBORDE  
DISCONTINUO**

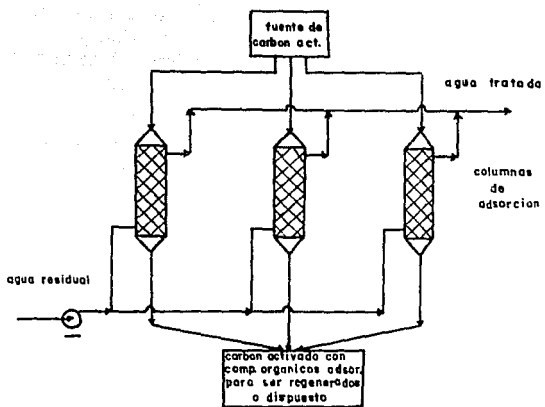
- separación de líquidos y sólidos
- solidificación / fijación

Algunas de las tecnologías utilizadas se describen a continuación:

#### III.4.1. Adsorción con carbón activado.

Esta técnica de tratamiento se utiliza para remover y/o recuperar componentes orgánicos y algunos inorgánicos del agua residual de las industrias, por medio de la adsorción. Se le debe de dar un pre-tratamiento a los residuos para reducir la carga orgánica y los sólidos suspendidos, que consiste en un filtrado, los filtros pueden ser lechos granulares de grava y arena. Posteriormente se alimenta a presión la corriente líquida hacia las columnas que contienen carbón activado en donde se realiza la adsorción de los contaminantes, y el agua residual sale por la parte superior de la columna, mientras que por la inferior se extrae el carbón conteniendo los contaminantes (Fig. III.4).

Como los contaminantes quedan retenidos por adsorción, este proceso puede ser reversible, es decir, el carbón puede ser descargado y volver a utilizarse. Los principales elementos que se remueven por medio de este tratamiento son: fenol, cresol,



ESQ. DE ADSORCION CON CARBON ACTIVADO

FIG. III. 4

poliéteres, orgánicos halogenados, cianuros, cromo, antimonio, arsénico, bismuto, estaño, plata, mercurio, cobalto, zirconio, cloro, bromo y yodo.

Esta tecnología tiene la ventaja de utilizar poco equipo, tan solo el contenedor cilíndrico a presión en donde se deposita el carbón granular activado y genera pocos residuos que disponer.

#### III.4.2. Reducción química.

Este es un proceso electroquímico en el que un elemento o compuesto gana electrones en una reacción, involucrando a un agente reductor, o sea una sustancia susceptible de ceder electrones, de esta manera el residuo pierde sus propiedades tóxicas, resultando un compuesto estable al que se puede confinar. El proceso es el siguiente, en un tanque se vierten el residuo, el reductor y un ácido con un pH determinado, se mezclan hasta que se complete la reacción. El resultado es un compuesto ligeramente ácido, al cuál se le agrega cal con el fin de que los metales pesados se precipiten y posteriormente se filtran (Fig. III.5).

Los principales agentes reductores que se utilizan en este tratamiento son:

-Dióxido de azufre

-Sulfato ferroso

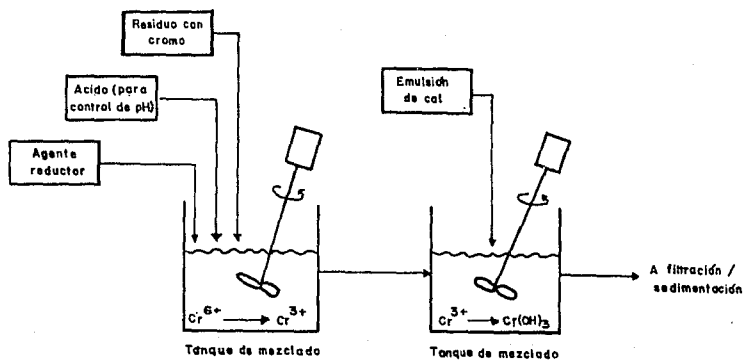


FIG. III.5 ESQ. DE REDUCCION QUIMICA

- Bisulfato de sodio
- Aluminio
- Zinc

Con esta técnica se pueden tratar los residuos que contengan, entre otros contaminantes:

- Cromo hexavalente.
- Soluciones con bajas concentraciones de plata, níquel, cobre, y otros metales.
- Cianuros que contienen metales.
- Compuestos solubles orgánicos e inorgánicos.
- Mercurio inorgánico.

En cuanto al equipo necesario están los tanques de mezclado, filtros sedimentadores, medidores de concentración, de flujo y de pH. También es necesario tomar en cuenta que genera grandes cantidades de lodos, a los cuales hay que confinar.

III.4.3. Oxidación química.

Se basa en el mismo principio de la reducción, solamente que ahora el residuo cede electrones, por lo que se dice que se oxida; el procedimiento y el equipo es el mismo, sólo que ahora el resultado es ligeramente alcalino (fig. III.6), se utiliza para tratar principalmente los siguientes compuestos:

- Contaminantes de residuos acuosos orgánicos
- Residuos de cianuros
- Pesticidas no clorados
- Aldehidos
- Fenoles
- Acidos orgánicos

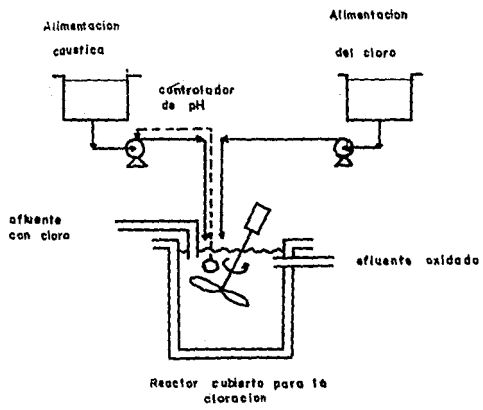
Los oxidantes más comunes son:

- Permanganato de Potasio
- Peróxido de hidrógeno
- Hipoclorito de Calcio
- Hipoclorito de Sodio
- Cloro

Sin embargo se pueden crear compuestos más peligrosos que los mismos residuos, por lo que debe vigilarse estrictamente la adición de los reactivos.

#### III.4.4. Precipitación química.

También llamado floculación, este es un proceso físico-químico en el cual una sustancia en solución pasa total o parcialmente a una fase sólida dentro del mismo líquido, es decir, forma flóculos. Esta precipitación se realiza cuando se agrega un agente precipitante y la solución tiene un pH determinado, una vez que la precipitación ha terminado el



ESQUEMA DE OXIDACION QUIMICA

FIG. III.6



producto se debe de sedimentar y/o filtrar para separar los sólidos (fig. 7), de tal forma que los parámetros de operación que se deben controlar son:

- pH adecuado para la precipitación
- Adición del precipitante químico
- Floculante
- Sedimentación y/o filtración

Se aplica para tratar cualquier corriente residual acuosa, de donde remueve zinc, cadmio, cromo, cobre, fluoruros, plomo, magnesio y mercurio. En cuanto al equipo utilizado se tienen bombas, tanques de reacción con agitadores, tanques de almacenamiento, clarificadores y dispositivos de medición.

La generación de lodos es muy grande, los cuales necesitan disposición.

#### III.4.5. Neutralización.

Esta técnica se basa en el principio de que un efluente ácido al mezclarse con una base, produce un compuesto cuyas propiedades son neutras. Actualmente se deja el pH ligeramente alcalino (9 - 10.5) para que los metales pesados se precipiten. En un tanque mezclador se alimentan los residuos y un ácido o

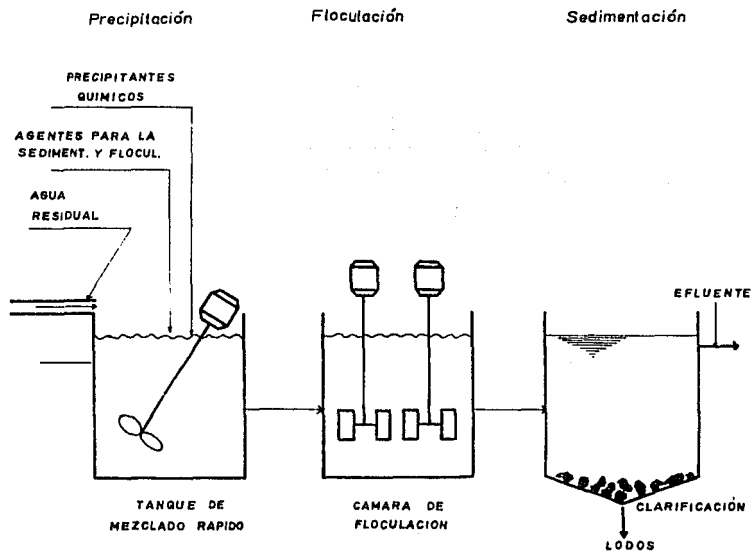


FIG. III.7 ESQ. DE PRECIPITACION QUIMICA  
Y SUS PROCESOS ASOCIADOS

una base, según sea necesario, mientras un medidor de pH nos indica el momento en que se deben cortar las corrientes (Fig. III.8).

El equipo a utilizar son cámaras de reacción con agitadores, tanques para almacenar el ácido y las bases, bombas, unidades para controlar el pH y el equipo de alimentación. Se utiliza para el tratamiento de:

- Aguas residuales ácidas o alcalinas
- Sosas gastadas.
- Estabilización de lixiviado

Los principales agentes neutralizantes son:

ácidos	bases
ácido sulfúrico	cal
ácido clorhídrico	sosa caústica
ácido nítrico	hidróxido de calcio
	hidróxido de amonio

Los lodos provenientes del proceso de tratamiento serán deshidratados, solidificados y colocados en un confinamiento.

#### III.4.6. Estabilización.

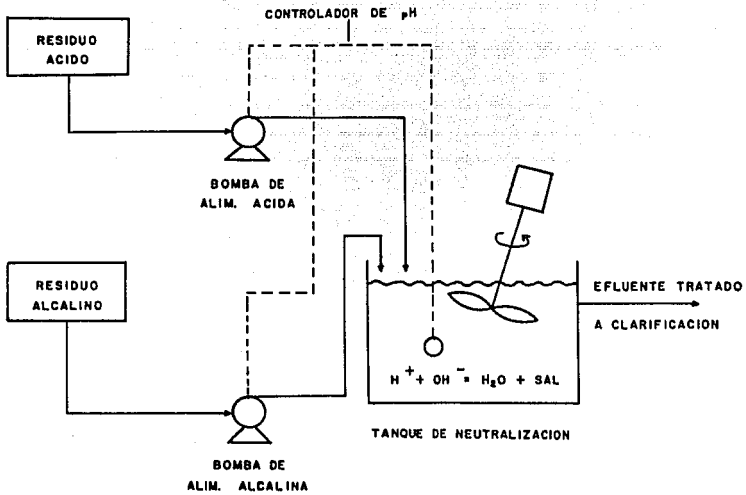


FIG. III. 8 ESQUEMA DE NEUTRALIZACION

Se basa en el hecho de agregar un compuesto al residuo que, al reaccionar lo inmovilizan física y químicamente. Al mezclarse, el compuesto resultante es más pesado que el agua, por lo que se sedimenta, pudiendo entonces decantar al residuo ya estabilizado.

El reactivo agregado comunmente es un silicato, que varía en tipo y dosis en función del residuo a tratar. Se debe de dar un pretratamiento que consiste en tamizar al residuo, de manera que los gruesos separados puedan ser llevados a la fase de trituración; posteriormente se integran con los residuos finos (Fig. 9).

Se aplica a suelos y lodos contaminados por compuestos orgánicos incluyendo halogenados, aromáticos y alifáticos, arsenatos, amoniaco, selenio, etc. Por ser necesaria la sedimentación, no se incluyen residuos de bajo peso molecular, tales como alcoholes, acetonas y glicoles.

En cuanto al equipo utilizado se encuentran tanques de acero u otro tipo de contenedores, tamizador, molino y mezclador. El residuo estabilizado requiere disposición.

#### III.4.7. Fijación.

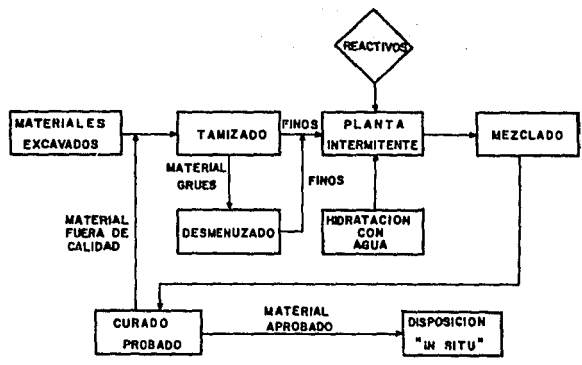


FIG. III. 9 ESQUEMA DE ESTABILIZACION

El término fijación se usa por que el compuesto absorbente que se le agrega al residuo, no sólo solidifica los líquidos libres mediante absorción, sino también sufre una reacción química. De este modo "fija" al residuo, es decir, lo mantiene inerte.

Los reactivos son de dos tipos:

1) Silicatos sedimentadores en forma líquida, que atrapan a los coloides orgánicos (contaminantes).

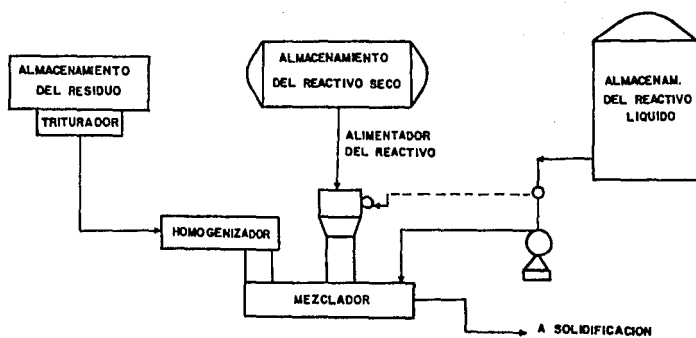
2) Silicatos solubles en forma sólida, los cuales al reaccionar producen gel (silicatos coloidales amorfos) y  $\text{SiO}_2$ , que actúa como agente precipitante.

La porción de agua del tratamiento sirve para:

- a) hidratar en forma similar a la reacción con el cemento.
- b) reacción por hidrólisis.

El equipo es el mismo que para la técnica de la estabilización (Fig.10). Esta técnica se utiliza para tratar compuestos orgánicos de alto peso molecular y metales pesados como aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, fierro, plomo, manganeso, magnesio, níquel, selenio, talio y zinc.

### III.5. DESECHOS INCOMPATIBLES.



ESQUEMA DE FIJACION QUIMICA

FIG. III. 10



En un inciso anterior se mencionó el término de desechos incompatibles, este término se refiere a que algunos desechos tienen componentes químicamente activos que al contacto con otro desecho aparentemente neutralizado, dá como resultado un desecho peligroso, y se pueden producir efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Algunos de estos efectos pueden ser:

- 1) Generación de calor.
- 2) Reacción violenta.
- 3) Liberación de vapores y gases tóxicos.
- 4) Liberación de sustancias tóxicas en caso de fuego o explosión.
- 5) Fuego o explosiones.
- 6) Generación de gases flamables.

Por lo consiguiente es importante que se puedan distinguir los diferentes desechos que son incompatibles entre sí, para esto se muestra a continuación una lista en forma de grupos A y B, así como las consecuencias de mezclarlos.

GRUPO 1-A

Alcalinos fuertes

GRUPO 1-B

Acidos fuertes

CONSECUENCIAS POTENCIALES. generación de calor y reacciones violentas.

## GRUPO 2-A

Desechos de pesticidas  
limpiadores

Desechos de berilio

Venenos

aceites

## GRUPO 2-B

Solventes

Hidrocarburos

Combustibles

CONSECUENCIAS POTENCIALES. liberación de sustancias tóxicas en caso de fuego o explosión.

## GRUPO 3-A

Metal en polvo

## GRUPO 3-B

Fuertes ácidos

Alcalinos fuertes

Alcohol

Agua

CONSECUENCIAS POTENCIALES. fuego o explosión y liberación de gas hidrógeno que es flamable.

## GRUPO 4-A

Cianuros

Sulfatos

## GRUPO 4-B

Acidos

CONSECUENCIAS POTENCIALES. generación de ácido cianhídrico o ácido sulfhídrico.

## GRUPO 5-A

Oxidantes fuertes

## GRUPO 5-B

Todo lo orgánico

Acidos fuertes

CONSECUENCIAS POTENCIALES. fuego, explosión o reacción violenta.

Los anteriores grupos son genéricos, para materiales específicos es necesario consultar las gacetas de la SEDUE.

### III.6. INCINERACION DE DESECHOS.

Algunos de los residuos que se producen en los procesos industriales no pueden ser confinados por sus propiedades altamente reactivas o volátiles. Estos residuos deben ser incinerados como disposición final. También deben ser incinerados los residuos hospitalarios que estén contaminados y que se denominan de "alto riesgo", tales como: vendas y apósitos, partes orgánicas y en general todo aquello que represente un posible foco de infección.

La incineración debe reunir algunos requisitos en cuestión de contaminación por humos y cenizas, para esto se han desarrollado algunas técnicas de incineración que permiten que las escorias no quemadas se reduzcan notablemente, además se usan filtros para que los humos sean tratados y atrapar los contaminantes antes de que se liberen a la atmósfera.

#### III.6.1. PIROFUSION

Este método de incineración se basa en la pirólisis, o sea, en la combustión con un bajo gasto de oxígeno, para aprovechar el calor irradiado se utilizan las cámaras de precombustión, en donde los residuos se calientan y desecan, en la cámara de combustión se realiza la gasificación del carbono y la incineración de los residuos incombustibles. El arreglo es vertical, de modo que se aprovecha que la corriente de los gases calientes asciende de modo propio, además de que se ahorra espacio. El quemador utilizado es una caldera convencional, lo que hace que la cantidad de escorias no quemadas sea alrededor del 5%.

#### III.6.2. ELECTROQUEMADOR.

El quemador se sobrecalienta eléctricamente, logrando una mayor temperatura, lo que hace que la estancia del residuo en el horno sea de corta duración (alrededor de cinco segundos), lo que redundará en la cantidad de residuos incinerados al día. También tiene la ventaja de que se puede controlar la flama al paso de los residuos más contaminados, alcanza una temperatura de hasta 2300°C.

Existen algunas otras técnicas que se utilizan para hacer aún más eficiente la combustión, lo que resulta en menos cenizas y humos contaminantes. Un ejemplo de esto es la antorcha de plasma, desarrollada en Francia, pero por el costo y alta

tecnología necesaria para la instalación, mantenimiento y operación, se ha desechado como posible para funcionar en el país.

### III.7. DISPOSICION FINAL.

Es la acción de depositar permanentemente a los residuos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños al ambiente (Gacetas de la SEDUE).

La disposición final se puede hacer en:

- a) Confinamientos controlados
- b) Formaciones Geológicas Estables, y
- c) Presa de Jales.

#### III.7.1. Confinamientos Controlados.

Es la forma más común de disponer a los residuos peligrosos, por su facilidad de construcción y costo por tonelada confinada, se considera como la más apropiada para la situación actual del país y tecnología nacional disponible. Sus inconvenientes son la generación de lixiviados que pueden contaminar los mantos acuíferos y la oposición sistemática de la población a vivir cerca de éstos.

#### III.7.2. Presa de Jales.

Se utiliza para almacenar los lodos provenientes de los procesos de la industria minera. La construcción de la cortina merece un estudio especial por la densidad y peso volúmetrico del material a contener, asimismo se debe tener un cuidado especial en la selección de los materiales de construcción, pues algunos desechos son corrosivos o contienen sulfatos que debilitan al concreto, además de que es necesario impermeabilizar el vaso para evitar la infiltración.

Se utilizan comunmente en las zonas mineras del país, pero por la pequeña variedad de residuos peligrosos que pueden recibir, no se contemplarán a fondo.

### III.7.3. Confinamiento en formaciones geológicas estables.

Es otra forma de confinar los residuos peligrosos, que puedan contenerlos sin presentar fugas, tal como las cavernas en sal. Actualmente esta tecnología se desarrolla principalmente para almacenar hidrocarburos. La secuencia es la siguiente: después de localizar la formación salina, se perfora en forma similar a la de los pozos petroleros, es decir en forma hermética; una vez perforado se empieza a bombear agua, que diluye la sal, formando cavernas; posteriormente los hidrocarburos se bombean, y por otro conducto se va desalojando la salmuera, o sea la sal diluida.

En el caso de los residuos peligrosos, no se puede hacer de la misma forma, pues la salmuera se contaminaría inhabilitándola para su posterior uso, por lo que se desarrolló el método geofix (Tourolle, 1991), en donde se introduce un líquido solvente clorado que hace la forma de tapón, separando a los residuos de la salmuera; el desecho se inyecta en forma de conglomerado, parecido al concreto, en donde los residuos peligrosos hacen el símil con los agregados. De esta forma y con el tapón antes mencionado, se garantiza que la salmuera no será contaminada y pueda aprovecharse.

**CAPITULO IV.**

**FUNDAMENTOS DEL CONFINAMIENTO CONTROLADO**



#### CAPITULO IV. FUNDAMENTOS DEL CONFINAMIENTO CONTROLADO.

Un confinamiento controlado es la obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de residuos peligrosos que garantiza su aislamiento definitivo, actualmente es la forma más común de disposición final, por su facilidad de construcción y operación, sin embargo, es necesario que se observen las condiciones para una correcta localización del sitio destinado a alojar un confinamiento controlado, las cuales varían desde técnicas a sociológicas.

IV.1. Requisitos que deben cumplir los sitios destinados a alojar un confinamiento controlado.

Para esto la SEDUE emitió la NTE-CPR-008/88, en la que se determinan los requisitos que debe reunir el sitio elegido, entre los cuales se encuentran:

IV.1.1. Factores geohidrológicos.

El sitio debe ubicarse preferentemente en una zona que no tenga conexión con acuíferos. De no cumplirse la condición anterior, el acuífero subyacente debe tener una profundidad mínima de 200 metros. En caso de no cumplirse las condiciones anteriores, el acuífero debe ser confinado, y las características del material ubicado entre éste y la superficie, deben de ser tales que cualquier elemento contaminante quede retenido en él antes de llegar al acuífero. El tiempo de flujo de la superficie al manto freático debe ser mayor de 300 años.

En este requisito se trata de preservar a los acuíferos de la contaminación por medio de los lixiviados que se generen en un confinamiento controlado.

Acuífero confinado es aquel que se encuentra entre dos capas impermeables que pueden estar formadas de roca sana o arcilla. La primera formación puede ser totalmente impermeable y a la segunda se le denomina un acuitardo, es decir, a pesar de tener un alto contenido de agua, el flujo a través de ella es casi nulo.

#### IV.1.2. Hidrología superficial.

A éste respecto se anota que: el confinamiento deberá "ubicarse fuera de llanuras de inundación, con un periodo de retorno de 10,000 años, delimitado con un ajuste de tipo Gumbell. Estar alejado en desnivel 20 metros a partir del fondo del cauce, de corrientes con un escurrimiento medio anual mayor de 100

metros cúbicos. Estar alejado longitudinalmente 500 metros a partir del centro del cauce, de cualquier corriente superficial, ya sea permanente o intermitente, sin importar su magnitud".

La cuenca de aportación hasta el sitio debe ser en lo posible pequeña y cerrada. De no cumplirse lo anterior, debe ubicarse dentro de la cuenca hidrológica, aguas abajo de asentamientos humanos mayores de 10,000 habitantes y de zonas con una densidad industrial mayor de 50 industrias.

Las corrientes superficiales representan un peligro latente para el confinamiento controlado, por la capacidad de arrastre de materiales, por lo que se debe tener cuidado con ellas, en este caso se indica la distancia mínima al centro de un cauce, si alguna corriente alcanza la zona del confinamiento puede arrastrar el material de cubierta y los residuos contenidos en las celdas, o debilitar las divisiones entre celda y celda, haciendo posible reacciones no consideradas en el diseño. En el caso de la cuenca, es por el motivo de los escurrimientos estacionales que pudieran inundar el confinamiento controlado e instalaciones adyacentes, aparte también se observa la construcción de bardas y drenajes perimetrales que también prevengan la inundación de estas zonas.

En el caso de la distancia mínima a los núcleos de población, este requisito evita que el posible arrastre de contaminantes, pueda afectar a los pobladores situados aguas abajo.

#### IV.1.3. Factores Ecológicos.

El confinamiento deberá ubicarse fuera de las zonas que comprende el sistema nacional de áreas naturales protegidas y de las zonas del patrimonio cultural. También se deberán considerar las zonas en donde no represente un peligro para las especies protegidas o en peligro de extinción, o en aquellas en las que el impacto ambiental sea mínimo para los recursos naturales.

Este es el caso del ex-lago de Texcoco, en donde a pesar de tener las condiciones geotécnicas adecuadas, no se aceptó la instalación de un confinamiento controlado.

#### IV.1.4. Factores Climáticos.

Ubicarse en zonas en donde los vientos dominantes no transporten las posibles emanaciones a centros de población y/o asentamientos humanos. La porción de la lluvia promedio diaria susceptible de infiltrarse, calculada a partir del coeficiente de escurrimiento promedio diario, debe ser menor que la capacidad de campo del terreno.

Evitar regiones con intensidad de precipitación media anual mayor de 2,000 mm. La evaporación promedio mensual, debe ser al menos el doble de la lluvia promedio

Se considera la generación de lixiviado, pues al tener mayor evaporación que precipitación y el escurrimiento sea menor que la capacidad de campo del terreno, se tiene poca humedad disponible para generar percolación.

#### IV.1.5. Factores sísmicos.

Ubicarse preferentemente en una zona asísmica. De no cumplirse la condición anterior, el riesgo sísmico debe ser mínimo, por lo que no deben de haberse registrado más de cuatro veces sismos de magnitud mayores de 7 grados, en la escala de Richter, en los últimos 100 años.

Tiene la finalidad de evitar fracturas en el confinamiento controlado y obras complementarias, que pudieran facilitar la infiltración de los lixiviados hacia los acuíferos, y el derrame de los residuos peligrosos en el área de almacenamiento.

#### IV.1.6. Factores Topográficos.

La pendiente media del terreno natural del sitio de confinamiento no debe ser menor del 5 por ciento, ni mayor del 30 por ciento. el terreno debe estar protegido de los procesos de erosión hídrica y eólica.

#### IV.1.7. Acceso.

El camino de acceso que une al sitio con las vías principales de comunicación, debe ser transitable todo el tiempo y estar en buenas condiciones de seguridad. El sitio debe localizarse a no menos de de 500 metros de las vías de comunicación estatales y federales.

Aparte de los requisitos anteriores que se incluyen en las Normas Técnicas Ecológicas, deben tenerse en cuenta algunos que no por omitidos, son menos importantes al hacer la elección del sitio.

##### a) Político-socioeconómicos.

Es conocida la oposición de la población a vivir cerca de alguna instalación que entrañe algún tipo de riesgo, para ello debe hacerse un sondeo de opinión y estudio social de los impactos generados en la instalación de un confinamiento controlado.

Si se intenta localizar en una zona de efervescencia política, es posible que a pesar de la conveniencia que acarrea una instalación de este tipo, no se aprobará por razones de esta índole. También es importante tomar en cuenta la cercanía de elecciones que puedan demorar los trabajos de construcción.

b) Legales.

En el caso de la expropiación de las tierras debe considerarse que el ejido es sumamente protegido por el gobierno, por lo que puede retardar la expropiación.

IV.2. Construcción y Operación.

En la fase de diseño y construcción se incluyen varias instalaciones complementarias que debe tener un confinamiento controlado:

- 1.- Areas de acceso y de espera;
- 2.- Cercas perimetral y de seguridad;
- 3.- Caseta de vigilancia;
- 4.- Caseta de pesaje y báscula;
- 5.- Laboratorio;
- 6.- Caminos;
- 7.- Area de almacenamiento temporal;
- 8.- Area de emergencia;
- 9.- Area de limpieza;

- 10.- Drenaje;
- 11.- Instalaciones de energía eléctrica;
- 12.- Señalamientos;
- 13.- Pozos de monitoreo;
- 14.- Area de amortiguamiento;
- 15.- Taller de mantenimiento;
- 16.- Area administrativa;
- 17.- Servicio de primeros auxilios, y
- 18.- Servicios sanitarios.

Es también deseable que adyacente al confinamiento controlado se construya la planta de tratamiento, aunque la SEDUE contempla la construcción optativa de celdas de tratamiento para aquellos residuos que sobrepasen los límites fijados en cuanto a parámetros de peligrosidad; se considera que éstas celdas deban ser parte integral de un confinamiento controlado, pues en las mismas Normas Técnicas Ecológicas se juzga que todo residuo peligroso que sobrepase los límites permisibles, debe ser tratado antes de confinarse.

#### Operación

En la zona de recepción se debe de pesar el cargamento de residuos peligrosos, lo que se hace para tener un control estricto de la generación y de la disposición final de éstos, ayudando a los controles de verificación en las empresas y evitar los tiraderos clandestinos.



No todos los desechos generados podrán ser procesados. Primeramente deberán ser analizados químicamente para saber si se pueden aceptar y luego, si cumplen las estrictas normas, existentes, entonces podrán ser autorizados para entrar a la planta.

El laboratorio tendrá la finalidad de muestrear todos los cargamentos que lleguen; esto facilita el manejo dentro de la planta de tratamiento, además de dar ciertas ventajas, tales como:

- a) Canalizar al residuo hacia el tratamiento adecuado.
- b) Garantizar operaciones químicas seguras.
- c) Verificará la existencia de materiales prohibidos.
- d) Determinará la incompatibilidad de los residuos.
- e) Verificación de los procesos de tratamiento.
- f) Llevado a su extremos, puede realizar actividades de investigación y desarrollo que genere nuevas tecnologías más eficientes y/o reciclar algunos materiales.

Una vez aceptado se debe hacer un muestreo para controlar el ingreso de materiales no deseados (radiactivos, no tratables en la planta, etc.), por lo que una pequeña parte del desecho debe ser retenido para posibles análisis en el futuro; éstos serán guardados en un almacén destinado especialmente para ello, y etiquetados para un mejor control y localización.

Para un control más estricto de los desechos que ingresen a la planta se tiene una clasificación general que determina las áreas de descarga y tratamiento, como se muestra a continuación.

Los líquidos orgánicos se clasificarán en halogenados y no halogenados, los cuales se subclasificarán en corrosivos y no corrosivos. Esta clasificación es importante, ya que determinará el curso de acción que se seguirán para neutralizar los desechos.

El término halogenados se referirá a los residuos que contienen alguno(s) elemento(s) de la familia del Cloro (Fluor, Cloro, Bromo y Yodo), que combinados con algunos otros metales reciben el nombre de halogenuros (Fluoruros, Cloruros, Bromuros y Yoduro).

#### IV.3. Construcción de las Celdas.

En la operación y construcción de la celdas hay una gran diferencia entre un confinamiento controlado y un relleno sanitario, aunque se puede decir que son las mismas técnicas pero con variantes. Son dos las diferencias más notables:

- a) En cuanto a la forma física.

En el desecho municipal la gran mayoría se encuentra a granel y en forma sólida, a diferencia de los residuos peligrosos que se pueden encontrar en forma líquida, sólida o en una mezcla de ambas, llamada gel. Los residuos industriales pueden estar a granel o en contenedores, los cuales pueden ser tambos de 200 litros, o más pequeños, de 60 litros.

b) En cuanto a la naturaleza del residuo.

La naturaleza de los residuos municipales no representa el peligro de reacciones químicas violentas; sus reacciones se han estudiado y los productos de estas son el metano, ácido sulfhídrico, amoníaco, bióxido de carbono, sulfatos y humedad. Los cuales representan poco peligro para la salud en comparación con la toxicidad que se maneja en los confinamientos controlados.

En el caso de los residuos peligrosos, se pueden presentar reacciones violentas o bien crear compuestos altamente tóxicos al mezclarlos, es decir, si existe incompatibilidad y entran en contacto se presentan estas reacciones. Es por eso que además de la zonificación ya mencionada anteriormente, es necesario en dividir las celdas de modo que no queden contiguos residuos incompatibles.

c) En cuanto a la forma de construcción y operación de las celdas.

En el relleno sanitario, la celda diaria depende del volúmen de la basura generada; ésta se vacía en el sitio y se extiende con tractores, que también la compactan y el frente de trabajo es único. En el caso del confinamiento, se tienen varios frentes de trabajo, dependiendo de la naturaleza física del residuo, cuidando que los residuos incompatibles no queden contiguos, tal como se muestra en la figura IV.1.

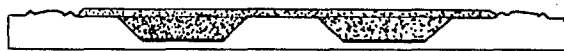
#### IV.4.2. Métodos de construcción de las celdas

En general, son similares los métodos de construcción,

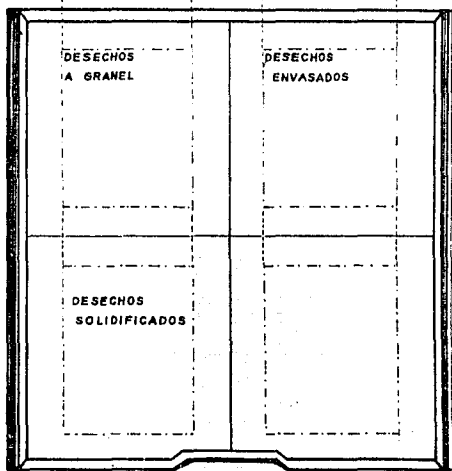
##### a) Método de Area.

Se utiliza para zonas onduladas, abruptas o en donde, a causa de la naturaleza del terreno, no sea posible excavar. Este método consiste en levantar a partir del nivel del terreno natural a las celdas, por lo que se debe construir un muro de contención, que además servirá para evitar que haya fugas de los residuos contenidos.

En el caso de ondulaciones u hondonadas se deben realizar trabajos de adaptación para que el área utilizable sea la mayor posible, así como realizar trabajos de impermeabilización y estabilización de taludes para evitar fallas.



CORTE ESQUEMATICO



AREA DE  
MANIOBRAS

SEPARACION DE RESIDUOS EN UNA CELDA

FIG. IV. 1

También se deben considerar bancos de material adecuados para las coberturas de las celdas. El aspecto final del confinamiento es como se muestra en la figura IV.2.

b) Método de trinchera.

Este método se utiliza en donde se puedan construir zanjas trapeciales, en donde son colocados los residuos. Tiene la ventaja de que el material de excavación puede ser utilizado como material de cobertura.

Al terminarse el confinamiento, el aspecto general es como el de la figura IV.3.

En cualquier forma, la altura máxima del confinamiento no debe ser mayor de 7 metros, para evitar roturas en los residuos envasados, y el peso de la maquinaria utilizada no debe sobrepasar las 10 toneladas (WMI, 1988).

IV.4.3. Tipo de cubiertas a utilizar.

En cualquier método utilizado, se considera una cubierta impermeable de arcilla compactada, la cual varía según el tipo de celda (WMI, 1988).

BORDO DE  
CONTENCION

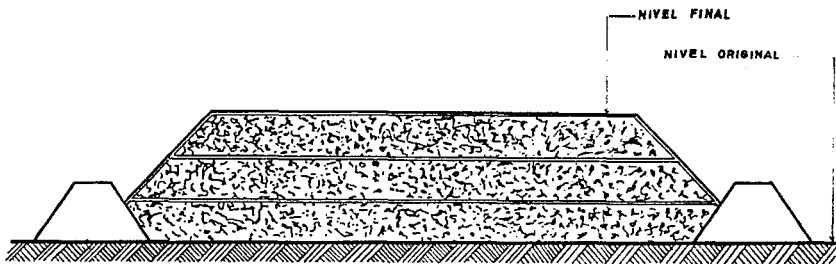


FIG. IV.2 METODO DE AREA

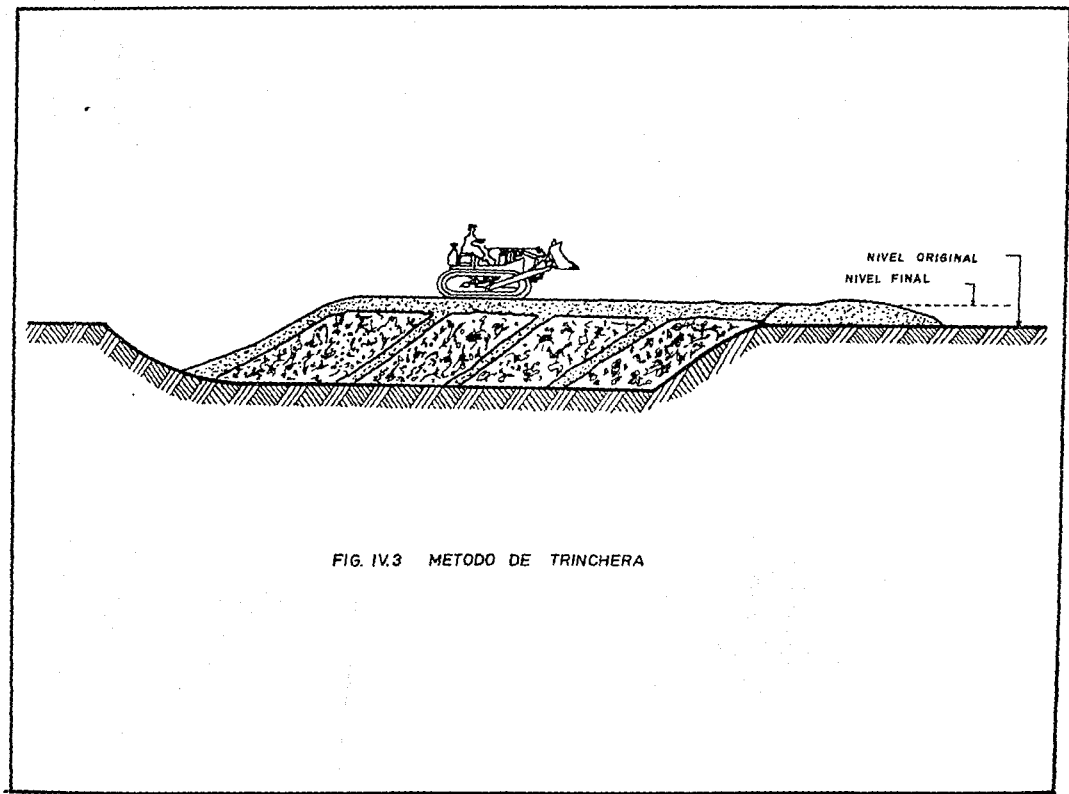


FIG. IV.3 METODO DE TRINCHERA



Para la celda diaria, se recomienda una cubierta de arcilla con un espesor de 15 cm; en caso de que la celda tenga un período de inactividad de más de 30 días, la cubierta recomendada será de 30 cm de espesor. Para la cubierta final se considera que el grosor debe de ser de 120 cm, compuesta de dos capas, la primera de 60 cm estará formada con arcilla compactada, la segunda de suelo vegetal estará colocada sobre la anterior.

#### IV.5. Reglamentación de los confinamientos controlados.

La tendencia actual en el mundo es concesionar el servicio de manejo de desechos industriales peligrosos, dejando al gobierno como una entidad normativa y supervisora, estableciendo además un estricto control en la generación de los residuos.

Existen dos modalidades de confinamiento controlado:

**Servicio público.** En la que cualquier empresa que lo solicite puede depositar sus residuos, previo contrato con la empresa que maneja el confinamiento.

**Servicio privado.** En este caso la misma empresa generadora maneja el confinamiento en donde dispone sus residuos peligrosos.

En estos confinamientos se tendrá la restricción de no aceptar los siguientes materiales:

**Radiactivos.-** Estos necesitan un cementerio con especificaciones muy especiales, para evitar que las radiaciones afecten a núcleos de población.

**Solventes.-** Por ser altamente volátiles y explosivos.

**Líquidos Crudos.-** A menos de que sean estables o hayan recibido un tratamiento previo que amortigüe su toxicidad.

**Bifenilos Policlorados.-** Debido a su estabilidad química y alta toxicidad es necesario destruirlos mediante incineración.

**CAPITULO V.**

**GENERACION Y CONTROL DE LIXIVIADOS EN TIRADEROS  
CLANDESTINOS Y CONFINAMIENTOS CONTROLADOS**

CAPITULO V. GENERACION Y CONTROL DE LIXIVIADOS EN TIRADEROS  
CLANDESTINOS Y CONFINAMIENTOS CONTROLADOS.

V.1 CONCEPTOS BASICOS

Los lixiviados son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos en proceso de estabilización; son líquidos de composición compleja y variable, integrados por componentes químicos y microbiológicos, ya que dependen de la naturaleza de los desechos y la cantidad de líquidos infiltrados; otra forma considerada como lixiviado es la humedad desplazada del desecho una vez que éste ha agotado su capacidad de campo y continúa la infiltración del líquido (Morales, 1991).

Por otra parte la SEDUE considera al lixiviado como el líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

Este fenómeno se presenta en tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios, confinamientos de desechos peligrosos, etc., lo que hace que los lixiviados varíen en su composición, de acuerdo a la naturaleza de los desechos (pH, edad, temperatura, etc.) y de la fase de estabilización en que se encuentre el desecho. Estas fases pueden ser:

**FASE AEROBICA:** ocurre solamente en presencia de oxígeno; los principales productos finales son el bióxido de carbono, amoníaco, sulfato y vapor de agua.

**FASE ANAEROBICA:** ocurre una vez que se agota el oxígeno y sus productos finales son el metano, bióxido de carbono, amoníaco y ácido sulfhídrico.

## V.2 FACTORES QUE AFECTAN LA GENERACION DE LIXIVIADOS.

Para éste efecto se considerarán dos tipos de factores: aquellos que dependen del tipo de desechos y que se consideran internos por ser inherentes al desecho; y los externos, es decir, aquellos que son independientes de la naturaleza de los residuos.

V.2.1 Los factores internos que afectan a la generación de los lixiviados se enumeran a continuación:

a) Composición de los residuos. Esta varía de desecho a desecho y sólo es posible conocer sus características a priori en un confinamiento controlado, en donde se tiene una planeación de los desechos que se depositarán en el lugar.

b) Degradación de los residuos. Esto influye mucho en la concentración del lixiviado, pues varía según la naturaleza de los desechos, si son orgánicos o inorgánicos, ya que los primeros se degradan fácilmente y hacen que la generación de lixiviados sea mayor en poco tiempo y por lo tanto la concentración mayor.

c) Tamaño y compactación de los residuos. Algunas veces para facilitar la operación de los desechos, éstos se fragmentan, haciéndolos de un tamaño uniforme. Este proceso se le llama trituración y provoca que la generación de lixiviados se acelere.

V.2.2 Factores Externos. Independientemente de la naturaleza de los desechos, de los líquidos retenidos en éstos y de las reacciones físico-químicas que se presentan en el confinamiento, hay diversos factores externos que afectan la formación de lixiviados, tales como:

a) Capacidad de intercambio catiónico. Los suelos orgánicos y las arcillas tienen una gran capacidad de intercambio de cationes, lo que hace que se retengan los metales contenidos en el lixiviado, retardando su tránsito hacia el subsuelo y consecuentemente hacia los mantos acuíferos.

b) Geohidrología local y regional. Esta comprende las zonas permeables e impermeables del subsuelo, la localización y tipo de los mantos acuíferos y la dirección del flujo subterráneo, si éste existe, así como la capacidad de infiltración y la capacidad de campo del suelo.

c) Clima. Por el clima se debe de entender aquellos factores climatológicos que afectan a la región; estos factores son el régimen de precipitación y de evapotranspiración, vientos dominantes, las temperaturas que se presentan en el transcurso del año.

d) Diseño y operación del sitio de disposición. Es frecuente que en los confinamientos la operación sea incorrecta, y no se atiendan a las normas de operación que se tomaron en cuenta para el diseño, por lo que la generación de lixiviados varía en forma cuantitativa y cualitativa de la prevista.

e) Tipo de superficie de evaporación. Es un hecho de que la evaporación depende de la superficie expuesta a la luz solar, por lo que las superficies planas ofrecerán un mayor espejo de agua lo que redundará en una mayor evaporación y una menor infiltración.

### V.3. PROBLEMAS QUE GENERAN LOS LIXIVIADOS.

La existencia de los tiraderos clandestinos ha creado que los residuos se encuentren al aire libre o enterrados sin mayor protección que una capa de suelo vegetal. Esto hace que la precipitación y corrientes subterráneas generen una gran cantidad de lixiviados, que al ser arrastrados o infiltrarse en el suelo sean un foco de contaminación.

Por ejemplo, se ha detectado (Noreña, Paredes, 1990), que en el suelo subyacente a los depósitos de chatarra, se presenta un incremento importante de cromo; éste y otros metales pesados pueden ser absorbidos por el organismo humano, por medio de los alimentos o el agua; una vez absorbidos, no es posible desecharlos, lo que resulta en un envenenamiento gradual e irreversible.

Entre los principales problemas que pueden causar los lixiviados se encuentran los ecológicos y los operacionales.

a) Ecológicos. Son aquellos que dañan al medio ambiente y entre los cuales podemos mencionar a la contaminación de los cuerpos de agua, la saturación de metales en el suelo que provoca aridez y en general el daño a ecosistemas que dependan del agua afectada. Actualmente el mayor daño ecológico a causa de los lixiviados, es el que se presenta en los tiraderos clandestinos o "cementeros" industriales debido a la falta de estudios previos, tratamientos adecuados y la ausencia de supervisión.



b) Operacionales. Estos dificultan la operación del confinamiento controlado; un exceso de lixiviado provoca que los residuos alcancen un menor grado de compactación, y por consiguiente una menor resistencia mecánica, y menor volumen por almacenar en una celda.

Los líquidos lixiviados forman un potencial contaminante, que se puede desarrollar dependiendo de la movilidad y concentración del lixiviado; la concentración varía en función de los parámetros descritos anteriormente, en tanto la movilidad depende de la transmisibilidad del suelo ; la transmisibilidad es el producto de la permeabilidad, es decir, de la velocidad con que el agua se infiltra en el suelo, por el grosor del estrato considerado. Otro factor que influye es la capacidad de migración del lixiviado, que depende de la concentración del mismo.

#### V.3.1. Migración de los lixiviados

Esta migración se presenta en dos formas, dependiendo de la zona en donde se encuentre:

a) Zona no Saturada. Es una zona que comunmente se le llama zona de interfase o de aereación. Comprende desde el nivel de desplante del confinamiento hasta el nivel de aguas freáticas (NAF). En esta zona la migración es esencialmente un flujo vertical y los productos disueltos se desplazan con diferentes gradientes de velocidad, debido a las fuerzas de tensión

superficial y al gradiente de densidades. El flujo es más lento que en la zona saturada (abajo del NAF), y muchos de sus componentes sólidos en suspensión pueden quedar retenidos en la matriz porosa (VALERA, 1991). Esto depende del espesor y de la naturaleza de la zona (porosidad efectiva, permeabilidad, constitución geológica, etc), que también influye en los procesos de atenuación o estabilización del lixiviado.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Iturbe, Cruickshank, 1990), se preparó un modelo para representar el movimiento de lixiviado en la zona no saturada; este modelo considera los procesos conservativos (advección y dispersión) y los no conservativos (adsorción, hidrólisis, biodegradación).

Este modelo llega a una expresión que se acerca mucho a los resultados experimentales, permitiéndonos tener un conocimiento de las condiciones de llegada al manto freático.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[ v_a dz \frac{\delta C}{\delta z} \right] - v_a \frac{\delta C}{\delta z} - Xr$$

En donde las variables que se deben de conocer, están dadas por:

$$R = 1 + \frac{k_1 k_2 (1-n) P_s}{(1+C k_2)^2 n P_l S}$$

$$v_a = \frac{q}{nSR}$$

$$X_r = \frac{XC}{R} \left[ \frac{1+k_1 k_2 (1-n) P_s}{1+k_2 C n P_l S} \right] - \frac{K_h C}{R}$$

Donde:

$k_1$  = Cantidad adsorbida/unidad de masa adsorbente, M/M.

$k_2$  = Constante experimental que indica la medida de la fuerza de enlace, M/M.

$C$  = Concentración del contaminante en solución, M/M.

$q$  = Caudal infiltrado/área, L/T.

$K_h$  = Constante de reacción, primer orden para un pH.

$z$  = Coordenada vertical, positiva hacia arriba, L.

$n$  = Porosidad del suelo, (%), M/M.

$S$  = Saturación del suelo, (%) L / L .

$R$  = Factor de retardo.

- X = Coeficiente de decaimiento  $1/T$ .
- Xr = Coeficiente de decaimiento e hidrólisis considerando adsorción.
- va = Velocidad aparente es la velocidad media real del fluido disminuida por el factor de retardo,  $L/T$ .
- Ps = Densidad del suelo, M/M.
- Pl = Densidad del líquido, M/M.
- dz = Dispersividad en la coordenada z.

Los fenómenos conservativos son aquellos en que el volumen del lixiviado se mantiene constante. La advección es el transporte de una masa desplazando a otra; en este caso, el aire contenido en los vacíos será la masa desplazada. La dispersión, por su parte, se considera como el flujo uniforme y desordenado del lixiviado a través del suelo.

Por otra parte, los fenómenos no conservativos son aquellos en que se presenta una disminución de los lixiviados; la hidrólisis es la descomposición del agua en oxígeno e iones hidróxilo (OH).

b) Zona Saturada. En el caso de la zona saturada el lixiviado se integra al flujo subterráneo, dispersándose, en general, con base en el gradiente piezométrico, a menos de que exista algún control hidrodinámico externo, como los conos de abatimiento que puedan direccionar el flujo de agua contaminada.

#### V.4. CONTROL DE LIXIVIADOS.

Es importante, una vez que se tiene conocimiento de los problemas que generan los lixiviados, encontrar formas de controlar y neutralizar los impactos negativos que se presentan.

V.4.1. Monitoreo de Lixiviados. Este es el primer paso que se debe de dar para poder tomar acciones tendientes al control de lixiviados. Se pueden presentar dos situaciones en los confinamientos:

La primera, que tomando en cuenta las normas técnicas de diseño se haya dado a la superficie del confinamiento las pendientes y la compactación necesarias para la recolección de lixiviados; entonces se llevarán a cabo la construcción de pozos de monitoreo tal como lo especifica la norma técnica NTE-CPR-009/89, que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado y que se presenta en la figura 1, y que sirven para determinar la composición química del lixiviado e implementar los procesos para su estabilización o neutralización.

La otra situación, se refiere a que el confinamiento se haya construido sin atender a las normas técnicas correspondientes o se operen en forma incorrecta, de tal manera que se presente la



infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. En tal caso se pueden hacer monitoreos para determinar la pluma contaminante o sea el flujo de agua que contiene presencia de lixiviados.

V.4.1.1. Método directo. El monitoreo de la pluma contaminante se puede realizar usando éste método, que consiste en realizar pozos para la extracción de agua o muestras de suelo, las cuales se analizan para determinar la presencia de contaminantes. Las desventajas de estos métodos se encuentran en el hecho de que solamente presentan resultados puntuales de la pluma contaminante y su costo no permite realizar demasiadas perforaciones.

V.4.1.2. Métodos indirectos. Esto se refiere específicamente al método geofísico de resistividades, el cual se basa en que al circular una corriente de intensidad  $I$ , la tierra opone una cierta resistencia u oposición a su paso. Para medir esta resistencia se colocan 4 electrodos alineados, de los cuales dos, llamados de corriente, son varillas de cobre que se conectan a la fuente de poder; el diferencial de potencial es medido con dos electrodos que no se polarizan y que consisten en tazas de cerámica con solución de sulfato de cobre. La corriente pasa a través del suelo hacia el electrodo, formando líneas de corriente y líneas equipotenciales en forma ortogonal, similares a las del flujo de agua. Los resultados obtenidos se les llama resistividades aparentes, las cuales se someterán a un análisis para la interpretación final.

Existen dos arreglos que comunmente se usan, dependiendo de las características de los estudios (Piñon, 1991):

Arreglo Wenner. Este tipo de arreglo tiene la separación constante entre electrodos. Se utiliza comunmente para delimitar estratos hasta una profundidad de 30 metros, de manera más detallada, pero abarcando un área más delimitada.

Arreglo Schlumberger. Este arreglo mantiene fijo el punto medio de la línea de electrodos de potencial y mediante incrementos sucesivos se separan los electrodos de corriente, permitiendo obtener las resistividades de estratos cada vez más profundos; este arreglo es el más usado, por la profundidad que pueden alcanzar sus lecturas.

Experimentalmente se tiene un rango de valores para suelos típicos, de donde se hace una correlación entre la estatigrafía y las resistividades obtenidas. A continuación se da la siguiente tabla de resistividades tipo (Tinajero, 1982).

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Grafito	$3 \times 10^{-4}$
Pirita	$10^{-3}$
Salmuera	$5 \times 10^{-2}$



Arcilla	1.0
Yeso	10
Agua Dulce	50
<b>Gravas y arenas saturadas</b>	
agua dulce	10 e 2
Serpentina	3 x 10 e 2
Caliza	10 e 3
Granito	10 e 6
Cuarzo	10 e 11
Calcita	5 x 10 e 12

En la tabla anterior puede observarse el rango de valores. El monitoreo de la pluma contaminante por el método de las resistividades está basado en el hecho de que el lixiviado contiene sales y metales en solución, lo que hace que la resistividad disminuya, o sea, que el lixiviado se comporte como un buen conductor; entonces se tiene un sondeo y sus resistividades resultantes. Analizando los resultados, se puede estimar con bastante exactitud la trayectoria del líquido contaminante, que será aquella en donde los puntos presenten una resistividad anormalmente baja con respecto a los puntos adyacentes o a los mismos puntos, si se cuentan con registros de sondeos anteriores.

Lo anteriormente expuesto permite deducir que, para suelos con un alto contenido salino, no es aplicable el método de las resistividades, pues la variación de ésta debida a la migración de los lixiviados es casi imperceptible.

#### V.4.2 Estimación de la cantidad de lixiviados generados.

Para el diseño de las estructuras tendientes a controlar a los lixiviados se debe de realizar una estimación de la cantidad que se producirá en el confinamiento; para esto hay que hacer un balance hídrico, es decir, un balance del agua que entra o que está contenida y de la que sale. De esta forma queda una cantidad de agua disponible para generar lixiviado. Se consideran las siguientes variables: la evapotranspiración, escurrimiento superficial, infiltración en el suelo, capacidad de campo de los desechos, humedad generada por los desechos en la fase aeróbica, de la biodegradación y la humedad necesaria en la fase anaeróbica.

El balance hídrico deberá realizarse para cada mes, usando la ecuación de Fenn (Alvarez, Turpin, 1990), que a continuación se muestra:

$$Lix = I + (HR/100)P' + HM*P'' + HR*P''' - CC$$

En donde:

Lix = lixiviado en  $\text{mm}/\text{m}^3/\text{mes}$

I = infiltración  $\text{mm}/\text{mes}$

HR = humedad en residuos sólidos %

P' = peso bruto de los residuos en  $1 \text{ m}^3$  - el peso del material de cobertura

HM = humedad metabólica  $\text{Kg}/\text{Kg}$  de residuo

P'' = peso de la materia orgánica contenida en  $1 \text{ m}^3$

P''' = peso bruto de material de cubierta

CC = capacidad de campo de los residuos y del material de cubierta

En el caso de la infiltración se han tomado los factores de evapotranspiración, precipitación y escurrimiento. La evapotranspiración incluye la evaporación, la transpiración y la sublimación, cada término tiene diferentes factores que la modifican; así, la evaporación depende del estado de la atmósfera (temperatura del aire, velocidad y turbulencia del viento, la insolación, la presión barométrica, la altitud y la temperatura y calidad del agua), el tipo de superficie evaporante (granulometría, porosidad, etc.).

Por su parte la transpiración dependerá del tipo de vegetal, temperatura y sequedad o humedad de la atmósfera, el tiempo de insolación, velocidad del viento. La sublimación se presenta en climas extremos y es muy pequeña en comparación con los factores anteriores.

Se ha determinado experimentalmente (Osorio, Vidales. 1990), que los métodos más aplicables para determinar la evapotranspiración de un relleno son:

a) Modelo de Lory y Johnson

$$V = 244 + (0.085 \times T_m)$$

donde:

V= Evaporación anual en mm

T<sub>m</sub>= Temperatura máxima mensual, temperatura x días del mes

$$E_p = (T_m/T_e) \times V$$

donde:

E<sub>p</sub>= evaporación potencial mensual

T<sub>e</sub>= temperatura efectiva

Este método tiene la ventaja de proporcionar una cantidad más confiable, sin embargo, si no se tiene la forma de deducir o conocer las constantes mensuales, esto no sirve.

b) Modelo de Thornthwuite.

$$I = (T/5)$$

$$E = 1.6(10 \times (T/l))$$

I= índice mensual en °C

T= temperatura en °C

E= Evapotranspiración en mm

l= suma de los índices mensuales

Se tiene la ventaja de que se requiere muy poca información (solamente la temperatura media mensual) y fácil de obtener, pero para climas con menos de 100 mm de precipitación anual se tienen resultados menores a los reales.

En lugares en donde la precipitación es menor a la evapotranspiración, sucede que hay un deficit de humedad para que se cumpla el balance de agua; si esto sucede, se dice que la evaporación que se presenta es la real ( $E_r$ ) y la que sucedería si hubiera la humedad necesaria, sería la potencial ( $E_p$ ).

En el caso de la humedad lixiviable que aparece en la fase aeróbica y en la fase anaeróbica se requiere humedad. Se han realizado estudios (Valera, 1991), en los que se ha determinado que la humedad resultante en la primera fase es aproximadamente el 1% de los requerimientos de los procesos anaeróbicos, por lo que se desprecia.



lisímetro, esto se hará en forma gradual, compactándolos con pizón de mano capa por capa, hasta alcanzar la compactación deseada. A continuación se somete el lisímetro a una carga tal, que semeje las condiciones de presión a la que estarán sometidos los residuos dentro de el confinamiento controlado. Para el caso del material de cobertura se coloca en capas hasta lograr la compactación requerida para garantizar una permeabilidad baja.

Una vez empacado el material al cual se realizará la prueba, los pasos a seguir son los mismos en ambos casos; se agrega agua al lisímetro hasta alcanzar el nivel superior de los residuos con la finalidad de saturar su capacidad de absorción. Inmediatamente después se realizará un drenado inicial de el lisímetro por 15min, para posteriormente efectuar un segundo drenado 24hr después y finalmente, llevar acabo un drenado final durante 24hr continuas, al término de las cuales se dá por terminada la prueba.

La capacidad de campo, se determinará mediante el empleo de la siguiente expresión:

$$C = \frac{(H/(100xV)) + S_i - D_i}{(V * PV) * (1 - H/100)} \times d$$

Donde:

C = Capacidad de campo del material en  
% de humedad/base seca.

H = Humedad de los residuos o material de cobertura antes  
de realizar la prueba, en % en peso.

V = Volumen ocupado por el material de prueba compactado  
dentro del lisímetro, en lts.

d = Densidad del agua, en Kg/lts.

PV = Peso volumétrico de los residuos o material de  
cobertura empacados al inicio de la prueba, en Kg/lts.

Si = Volumen de agua con el que se saturó el lisímetro al  
inicio de la prueba, en lts.

Di = Volumen de agua extraída de el lisímetro con los  
drenados que se realizaron durante la prueba, en lts.

$$CC = (HR + HS) + (CRr + CRm)$$

CC = capacidad de campo de residuos sólidos y material de  
cobertura

CRr + CRm = capacidad de retención de residuos sólidos y  
material de cobertura

HR + HS = humedad en residuos y material de cobertura



La infiltración es la cantidad de la precipitación que no escurre ni se evapotranspira en la superficie. Está dada por:

$$I = P - Es - E$$

I = infiltración

P = precipitación

Es = escurrimiento

E = evapotranspiración

Por su parte el escurrimiento depende del tipo de suelo y la pendiente. estos valores se toman en cuenta en forma de coeficiente ( $k_e$ ), a continuación se dan los siguientes valores de  $k_e$ , con el respectivo tipo de terreno (Valera, 1991).

TABLA DE VALORES DE  $k_e$ .

Condiciones de superficie.	Coficiente $k_e$
Suelo arenoso plano $s < 2\%$	0.05 - 0.10
suelo arenoso medio $2 < s < 7\%$	0.10 - 0.15
suelo arenoso inclinado $s > 7\%$	0.15 - 0.20
suelo arcilloso plano	0.13 - 0.17
suelo arcilloso medio	0.18 - 0.22
suelo arcilloso inclinado	0.23 - 0.35

s= pendiente del terreno.

Por tanto, el escurrimiento está dado por:

$$E_s = k_e * P$$

Una vez tomados todos estos factores, se puede estimar el lixiviado generado. Con este valor se tomarán las medidas para diseñar las obras de control. Cabe resaltar que, aunque, los métodos se han realizado para el estudio en rellenos sanitarios, en el caso de los confinamientos controlados se toman las mismas consideraciones, a excepción de la capacidad de campo en los residuos envasados, que es nula.

#### V.4.3. Cálculo de la interfase necesaria para la remoción de la carga catiónica del lixiviado.

La interfase es la capa de suelo en donde se realiza el intercambio catiónico, de esta zona depende que el lixiviado pueda o no contaminar a los mantos acuíferos, pues los contaminantes quedan retenidos por adsorción.

Se considera que la carga orgánica biodegradable es mínima en los residuos industriales, al contrario de lo que sucede para los residuos municipales, por lo que se referirá sólo al cálculo de la interfase para remoción de carga catiónica del lixiviado, la cual se puede calcular por la siguiente formula:

$$I = 400 \frac{C \ i}{CIC \ (PV)}$$

En donde:

C = concentración catiónica del lixiviado [ meq/l ]

CIC = capacidad de intercambio catiónico del suelo  
[ meq/100 gr de suelo ]

PV = peso volumétrico del suelo [ kg/m ]

i = humedad lixiviable de los residuos [ m/m año ]

I = interfase requerido para atenuar la cantidad carga  
catiónica [ m ]

La concentración catiónica del lixiviado se podrá estimar en base a los residuos a confinar y en la experiencia de otros confinamientos controlados, además de tomar en cuenta las condiciones particulares del sitio.

#### V.5. Métodos de control

Para el control de lixiviados se tomarán dos tipos de consideraciones:

- 1) preventivo, para los confinamientos por construir, y
- 2) correctivo, para los confinamientos y/o tiraderos en los que no se consideró la captación de lixiviados y no hubo el diseño de las obras complementarias adecuadas.

#### V.5.1 Métodos de control preventivos.

En este caso se sujetarán a las normas técnicas ecológicas, que SEDUE publicó (NTE-CRP-010-88), en donde se exige que haya colectores, subcolectores y por lo menos dos pozos de monitoreo para lixiviados, fig. 2.

Al fondo de la macrocelda y en cada capa de cubierta se les debe dar una pendiente de 0.0005 (Morales, 1991), como se ilustra en la fig 3. Esto tiene la finalidad para captar los lixiviados que escapen al sistema de recolección. Tanto el material de la base, como el de cobertura de las capas deberán compactarse al 90% proctor para asegurar una permeabilidad baja.

Otro método de control preventivo que además permite conocer la composición química, temperatura de los desechos, generación de biogás y las interacciones entre celdas, es el método de las

# DETALLES DEL TUBO PARA LA CAPTACION DE LIXIVIADOS

FIGURA 2

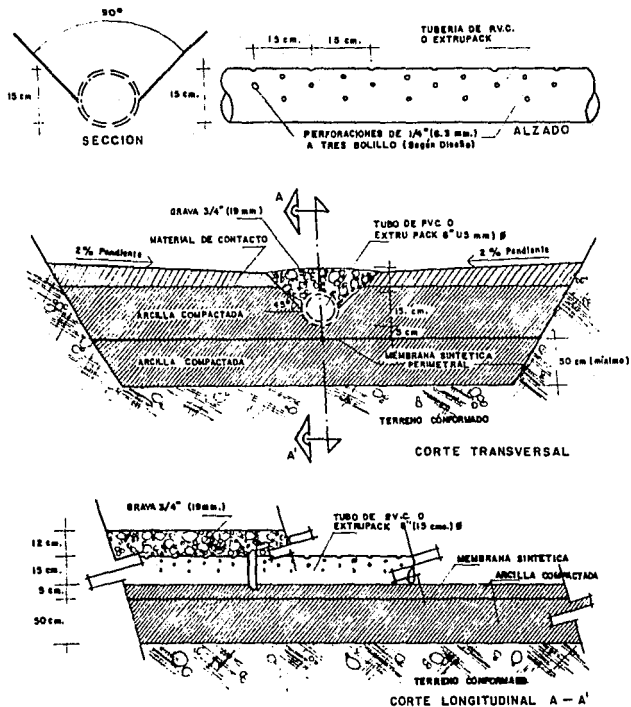
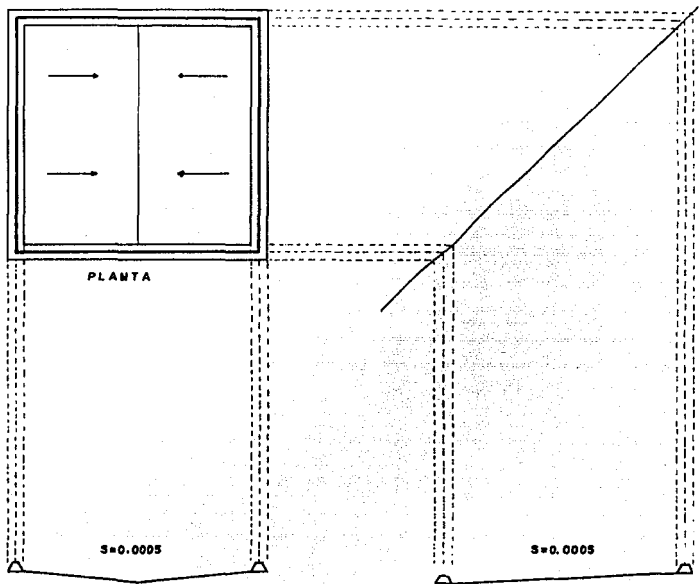


FIG. V. 2



CORTES LONGITUDINALES

FIGURA FUERA DE ESCALA

FIG. V. 3 CONTROL POR PENDIENTE

celdas de control, que funcionan como un lisímetro a escala natural. Permite investigar el comportamiento para generar parámetros de diseño y llevar a cabo el monitoreo del mismo, para evitar posibles riesgos de contaminación ambiental. Para que una celda semeje a las condiciones del relleno se deberán tomar las siguientes consideraciones:

- a) Volumen de la celda similar al de la basura por depositar en un día normal
- b) Volumen del lixiviado por captar
- c) Volumen del biogás, incluye amoníaco, ácido sulfhídrico, nitrógeno y principalmente bióxido de carbono y metano.

Entre las instrumentaciones de la celda se encontrarán: tuberías para extracción de biogás y lixiviado, termopares para poder conocer la temperatura de los desechos y se instalarán bancos de nivel fijo, a fin de conocer los asentamientos.

Otra forma de evitar el transporte de lixiviados es cubrir la totalidad de las celdas con geotextiles, que son mallas de materiales sintéticos termofundidos, con gran resistencia a los materiales corrosivos, en la tabla se presenta las propiedades.

Esta última solución está extendiéndose en los países industrializados, pero una de las restricciones más grandes para países de bajos recursos, son los costos (adquisición, colocación, mantenimiento, etc.), sin embargo en el país ya se están considerando los geotextiles en la construcción del relleno sanitario que opera en el Lago de Texcoco, por lo que se debe considerar que a futuro en los confinamientos controlados se haga obligatorio el uso de tales mallas.

#### V.5.2. Métodos Correctivos.

Se pueden hacer varias sugerencias para el control de los lixiviados que provienen de un confinamiento:

1) Para mejorar el fondo y aumentar la resistencia mecánica al cortante, se puede inyectar una solución de cal (Valera, 1991); esto hace que aumente el número de iones hidróxilos y por lo tanto la capacidad de intercambio catiónico también aumenta.

2) Dependiendo de las condiciones topográficas se puede realizar la construcción de un canal perimetral a cielo abierto abajo del nivel de la base del confinamiento y previo estudio del flujo subterráneo, construir un carcamo de colección (Oviedo, 1991).



3) En el caso de que el lixiviado ya se encuentre en la zona saturada, aprovechando la forma de transporte, se pueden crear controles hidrodinámicos por medio de conos de abatimiento por bombeo y dirigir el flujo hacia la zona que más convenga (por permeabilidad, trasmisibilidad, potencial de intercambio catiónico, etc.), en donde, dependiendo de las características del lugar se podrá recolectar (Oviedo, 1991).

**CAPITULO VI.**

**SITIOS POSIBLES DE INSTALACION DE CONFINAMIENTOS  
CONTROLADOS EN EL VALLE DE MEXICO**

CAPITULO VI    SITIOS POSIBLES DE INSTALACION DE CONFINAMIENTOS  
CONTROLADOS EN EL VALLE DE MEXICO.

En anteriores capítulos se han tratado las causas de la contaminación por residuos peligrosos, se han expuesto las consecuencias, así como la situación actual en el país. Es indudable que en el Distrito Federal y municipios del Estado de México adyacentes se encuentra la zona industrial más importante, cuya producción es vital para la economía del país, pero también sus desechos son una de las principales fuentes de contaminación y de generación de residuos peligrosos, sin excluir a los desechos hospitalarios considerados riesgosos.

Aunque en los últimos años se ha tomado una política de descentralización industrial, estimulando fiscalmente a las empresas que se establezcan o trasladen sus áreas de producción a otras zonas del país, no es posible emigrar todas las industrias por el alto costo económico, político y social que implica .

Es por eso que se hace necesario e improrrogable la creación de una planta que trate y confine los desechos en una forma que garantice la integridad del medio ambiente y de la población; además es deseable que posea la capacidad de neutralizar y confinar la mayor parte de los residuos peligrosos generados.

Por el giro que ha tomado la política económica del gobierno, es conveniente considerar la variante de concesión a particulares del manejo de residuos peligroso, dejando al gobierno como supervisor de la operación correcta de los procesos e inspeccionando a las empresas generadoras para evitar en lo posible los tiraderos clandestinos. Esto permitiría que el manejo se lleve al nivel de los países industrializados, en donde no sólo se confina, sino que algunos productos se pueden reciclar, con la conveniencia económica y ecológica que esto implica.

Anteriormente, se hizo el intento de establecer un confinamiento controlado con una planta de tratamiento anexa, que se localizaría en la Zona Federal del Lago de Texcoco, para lo cuál se hizo un consejo directivo y se solicitó la asistencia de la WMI (Waste Management International), consorcio estadounidense que se dedica al manejo de residuos peligrosos, pero el proyecto se paralizó por diversas presiones de grupos ecológistas, la falta de condiciones óptimas en el lugar, el incumplimiento de las Normas Ecológicas al respecto y el hecho de

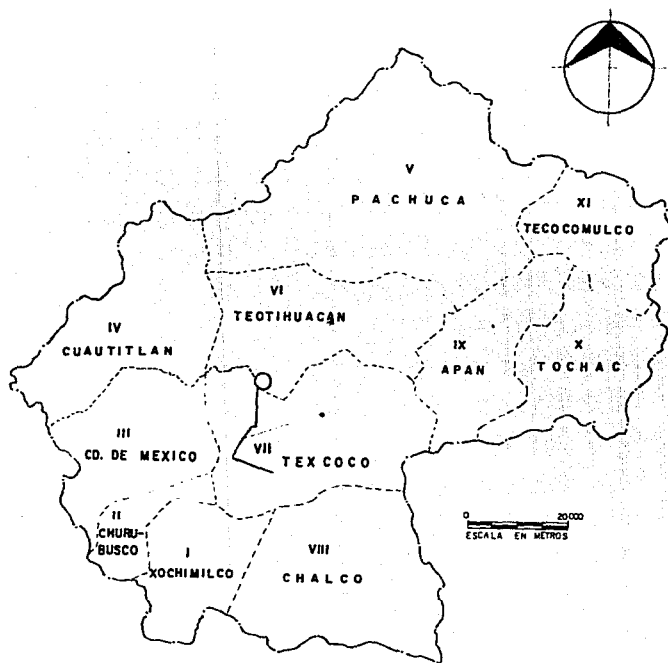


FIG. VI. 1

ZONIFICACION DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

(Tomado de la memoria del Drenaje Profundo del DDF, 1976)

que la WMI ha tenido varias demandas en contra en EU, por violaciones de seguridad, incendios y contaminación de acuíferos (Jornada, 25-04-90).

Sin embargo, es muy peligroso seguir con los actuales tiraderos clandestinos, por lo que se debe considerar la instalación de una planta de tratamiento y confinamiento controlado que cumpla con las especificaciones que SEDUE ha implementado para tal efecto. Es por eso que se tomó un estudio somero de las condiciones que presentan los sitios más accesibles a la Ciudad de México, para esto se dividió en dos a los lugares posibles:

a) Dentro de la cuenca del Valle de México

Para este efecto, se deben conocer las zonas generadoras de los residuos peligrosos en el Distrito Federal y municipios industriales adyacentes en el Estado de México, además se puede dividir la cuenca en 11 regiones hidrológicas Fig. 1, las que se analizarán para determinar los posibles lugares para la instalación del confinamiento controlado.

Zona I. Xochimilco.

Tiene una precipitación media de 981 mm anuales, y es uno de las principales zonas de recarga de acuíferos con 135.625 mill de  $m^3$  infiltrados, además tiene un gran número de manantiales que

dotan de agua potable a la zona y a la Ciudad de Mexico, por otra parte es una de las zonas en las que se ha extendido la mancha urbana. En 1990 se determinó que Xochimilco debería ser recuperado ecológicamente, por lo que queda totalmente descartado como posible sitio de instalación.

#### Zona II. Churubusco.

Se presenta una precipitación media anual de 1020 mm, forma parte de la mancha urbana Ciudad de México, y es una parte importante en la extracción de agua potable para misma, con 36.77 mill de m<sup>3</sup> de agua potable. También queda desechada por la cercanía a poblaciones, y su relación con acuíferos.

#### Zona III. Ciudad de México.

Descartada, desde el momento que es el principal centro urbano del país.

#### Zona IV. Cuautitlán.

Tiene una precipitación media del 789 mm anuales, también es una zona de recarga de acuíferos, y aunque la mancha urbana lo ha invadido, es una zona de ranchos lecheros, los cuales son susceptibles de captar los contaminantes por medio del forraje,

por lo que también queda descartado, a pesar de la cercanía de los municipios industriales de Tlanepantla, Ecatepec, Naucalpan, etc.

#### Zona V. Pachuca.

La zona hidrográfica más extensa, con una precipitación media de 520 mm anuales, que se concentran principalmente en la zona de Ciudad de Pachuca, su densidad poblacional es baja, presenta pocos manantiales y corrientes superficiales escasas y de gasto reducido. Su aprovechamiento de agua es a través de pozos, es una zona en donde probablemente se podría instalar un confinamiento controlado, previo estudio de la profundidad y tipo de acuíferos.

#### Zona VI. Teotihuacan.

Zona hidrográfica semi-seca, con 612 mm anuales de precipitación media, con escasas y reducidas corrientes superficiales, no obstante, presenta manantiales de agua potable, que se concentran en las cercanías del pueblo de San Juan Teotihuacan, por lo que también es una zona con factible para la instalación del confinamiento controlado, sin embargo, debe estudiarse detenidamente el crecimiento poblacional, además de la profundidad y el tipo de acuíferos que se hayan en explotación.

#### Zona VII. Texcoco.



Incluye la actual Zona Federal del Lago de Texcoco y el municipio del mismo nombre, presenta una precipitación media anual de 639 mm, la cruzan numerosas pero reducidas corrientes estacionales, y está considerada como una zona eminentemente agrícola. Con 107.463 de volúmen anual infiltrado, es una de las principales zonas de recarga de acuíferos, por que tiene una estrecha relación con los pozos que se explotan en la zona Oriente de la Ciudad de México. La zona que se podría considerar viable es la zona del lago, pero ya una vez se rechazó por no llenar todos los requisitos necesarios. Por todo lo anterior queda descartado como posible opción para la instalación del confinamiento controlado.

#### Zona VIII. Chalco.

Esta zona tiene una precipitación media de 855 mm anuales. Zona de ranchos lecheros, tiene numerosas corrientes por la cercanía a los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl, mismas que recargan los acuíferos que dotan de agua a la ciudad de México, además es una zona de topografía accidentada. Tiene una infiltración de 238.335 mill de m<sup>3</sup>, por lo que queda descartada como posible localización del confinamiento controlado.

#### Zona IX. Apan.

Esta zona queda localizada en el estado de Tlaxcala, tiene una precipitación media anual de 692 mm y un volumen infiltrado de 71.994 mill de m, presenta escasas corrientes de reducido caudal estacional, no se conocen manantiales, por lo que sus captaciones son a base de pozos, generalmente profundos y jagüeyes. Esta zona se presenta como una probable receptora, teniendo el cuidado de estudiar los cauces secos de barrancas, la topografía y las vías de acceso, también es recomendable hacer un estudio más profundo de la geohidrología de la región para no afectar los acuíferos.

#### Zona X. Tochac.

Zona localizada entre los estados de Tlaxcala e Hidalgo, presenta como toda la zona ríos estacionales de gasto reducido, tiene una precipitación media de 693 mm anuales, su infiltración promedio por año es de 63.392 mill de m<sup>3</sup>, se localizan pocos manantiales de caudal reducido, también es probable receptora de un confinamiento controlado, con las mismas consideraciones de la zona anterior.

#### Zona XI. Tecocomulco.

Esta zona es una cuenca cerrada hacia la laguna del mismo nombre, tiene una precipitación anual media de 651 mm, con corrientes superficiales escasas y estacionarias; es la zona más alejada de la zona industrial, no obstante, la distancia es de

aproximadamente 90 Km. También es posible receptora, aunque hay que revisar las vías de acceso y las poblaciones, asimismo, hacer un estudio geohidrológico para determinar el tipo y situación de los acuíferos.

Fuera de la Cuenca del Valle de México.

Hay varios lugares que deben estudiarse, sobretodo, se deben considerar aquellos lugares que debido a su clima seco tienen ventaja por la evapotranspiración que se presenta, la escasa precipitación, la ausencia de corrientes superficiales de importancia y la escasa densidad demográfica que generalmente se presenta en estas zonas. Sin embargo, se deben tomar en cuenta las relaciones costo/distancia y riego/distancia. La primera se refiere a que a mayor distancia los costos aumentan, y si bien, hay un rango entre 50 y 300 Km, en el que los costos no inciden sustancialmente, a distancias mayores, el costo/kilometro aumenta por la depreciación, desgaste mecánico y de llantas y el viaje de vuelta que tendrá que hacerse vacío, en consideración al artículo 27 del reglamento de la ley de protección ecológica y protección al medio ambiente en materia de residuos peligrosos.

La otra relación se refiere a que a mayor distancia, mayor riesgo de accidente, sobre todo si se toma en cuenta el estado que guardan las vías de comunicación en nuestro país, en donde se

han modernizado y se mantienen las vías que conectan a las principales ciudades, pero las secundarias y federales se mantienen en el olvido.

Entre los lugares que hay que considerar son: la parte sur de los estados de Querétaro y San Luis Potosí, la parte Suroeste del estado de Hidalgo, en lo que se conoce como el Valle del Mezquital.

## CAPITULO VII. CONCLUSIONES

1. Se considera urgente la instalación de un confinamiento controlado para desechos industriales y peligrosos en el área de la Cuenca del Valle de México y no fuera de ella, pues el transporte amplificaría los problemas, además de la oposición natural de los moradores de las zona circunvecinas, que se seleccionaran.

2. Las zonas IV, V, VI, VIII, IX, X y XI son de las más viables, sin embargo, por su tipo de producción alimentaria, básica para el país, así como por el uso del suelo, deberían descartarse las zonas IV y VIII, Cuautitlán y Chalco.

3. Las zonas V y VI son las más factibles para la instalación de éste confinamiento, mismo que deberá ser realizado apoyándose en estudios exhaustivos, apegados a las normas editadas por SEDUE, aunque en algunos casos por lo disperso de la población no se pueda cumplir la norma que se refiere a la de la distancia mínima a las poblaciones entre 5000 y 10000 hab, que es de 15 Km.

4. En el caso de las zonas IX, X y XI, que son las más alejadas de las zonas industriales, se deberá hacer un estudio de las vías de acceso y del costo por flete, además de los estudios que marca la SEDUE.

5. El confinamiento deberá ser desarrollado por iniciativa privada, mediante una concesión aprobada y vigilada por SEDUE y el municipio donde finalmente quede instalado.

6. En la vecindad de todo desarrollo industrial deberá igualmente crearse un confinamiento para recibir sus desechos.

7. Se debe de implementar un mecanismo de control por parte de la SEDUE, para obligar a las empresas a que todos los residuos peligroso generados en sus procesos de transformación y/o extracción se traten y confinen correctamente, evitando en lo posible los tiraderos clandestinos.

## GLOSARIO

Acido Acético.- Acido resultante de la oxidación del alcohol etílico con eliminación de agua, se utiliza para fabricar acetona y acetatos, especialmente el de plomo, como reactivo químico y en fotografía. Tiene por formula  $CH_3COH$

3 2

Bifenilo.- Hidrocarburo sólido presente en el alquitran de hulla, preparado industrialmente del bromobenceno.

Borras.- Todo desperdicio de fibras recuperado en alguna parte de los talleres de hilatura y tisaje.

Catalizadores.- Cuerpo capaz de acelerar o retardar (catalizador negativo) una reacción química sin descomponerse ni combinarse.

Fenoles.- Nombre genérico de los derivados hidroxilados de los núcleos bencénicos, son compuestos orgánicos en los cuales uno o más átomos de hidrógeno han sido reemplazados por otros tantos hidróxilos (OH). Se usan para fabricar colorantes sintéticos, medicamentos, baquelita, etc.

**Fosfoyeso.-** Cuerpo que resulta de combinar el Fósforo con Hidrógeno o algún otro metal.

**Galvanoplastia.-** Conjunto de técnicas consistentes en cubrir por electrólisis una superficie metálica con una capa de otro metal.

**Micelio orgánico.-** Partícula de ciertas disoluciones coloidales consistente en una aglomeración de moléculas orgánicas que no suelen medir más de un tercio de micron (1/1 000 000).

**Orgánico.-** Compuesto químico a base de Carbono e Hidrógeno, a veces combinado con Oxígeno, Nitrógeno o Azufre.

**Polímero.-** Compuesto cuya molécula se halla constituida por la unión de varias moléculas idénticas, ej. plásticos.

**Pirofórico.-** Sustancias que se inflaman espontáneamente en el aire.

**Solventes.-** Sustancia que tiene la propiedad de disolver a otra.



**BIBLIOGRAFIA.**

Alvarez Chávez, Turpin Marion Sylvie, 1990. Evaluación de la producción de lixiviados en un relleno sanitario: Métodos de evaluación, VII Congreso SMISA, Oaxaca.

Desiga Javier, 1991, Departamento de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, SEDUE, entrevista personal.

Dirección General de Normatividad. 1986. Información para la elaboración de Normas Técnicas Ecológicas.

Gacetas de SEDUE para normas ecológicas No. 1, 2, 5 y 11

Guerra Luis Manuel, Mora Rodríguez Judith, 1988, Agua e hidrología en la Cuenca del Valle de México. Fundación FRIEDRICH EBERT STIFTUNG.

Herrera Acevedo Miguel Angel, 1990, Situación actual de control de los residuos peligrosos en la República Mexicana. AMCRESPAC

Iturbe R., Cruickshank C. y Silva A. 1990. Transporte de contaminantes en la zona no saturada. VII Congreso SMISA.

Juárez Badillo, 1976, Mecánica de Suelos, tomo I

Lesser y Asociados. S.A., Estudio Geofísico de Resistividad en la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco.

Morales y Monroy, 1990, Consideraciones geohidrológicas para la construcción de un relleno sanitario.

Noreña P., Paredes G. y Solorzano G. 1990. Incidencias de cromo en los lugares adyacentes a un tiradero de chatarra. VII Congreso SMISA.

Osorio R., Vidales A., Turpin M, 1990, Comparación entre métodos existentes para determinar la evaporación en un relleno sanitario.

Oviedo Hernández E. 1992. Influencia de las características de las arcillas y factores operacionales, en el diseño y comportamiento del relleno sanitario "Bordo Poniente". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Piñón N., 1991, Departamento de Geohidrología de Plan Lago de Texcoco, entrevista personal.

Rosales Aguilar E. 1990, Disposición final de los residuos peligrosos en la República Mexicana. SEDUE.

Sánchez G. Jorge, López Sánchez Felipe, 1990. Estudio del comportamiento de un relleno sanitario mediante una celda de control. Congreso SMISA, Oaxaca.

Sánchez Gomez Jorge, 1990, Herramientas de diseño y operación de sistemas de control de residuos municipales. Congreso AMCRESPAC.

Tinajero González Jaime Antonio, 1988, aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología). CICM.

Tourolle C. 1991. Conserve sus desechos en la sal. Revista Interface. Num. 37. Ciencia y tecnología de Francia.

Valera Duran Hugo W, 1991, Problemática ambiental en los suelos originada por los lixiviados generados en un relleno sanitario, una alternativa de control. Tesis de Maestría , IPN.

Waste Management International, 1989. Proyecto ejecutivo de una planta de tratamiento de residuos peligrosos.

Xelhuantzi Avila Rafael, 1989, Apuntes de Geohidrología, CICM.