

32
2eq.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

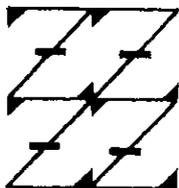
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

"ESTUDIO TEORICO DE LA TRANSFERENCIA DE
MASA DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS
CONFINADOS EN CAVERNAS LIXIVIADAS EN
DOMOS SALINOS"

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N :
ANA TRINIDAD / ROMERO AVALOS
JOSE ANTONIO DE LEON RESENDIZ

UNAM
FES
ZARAGOZA



LO HUMANO EJE
DE NUESTRA REFLEXIÓN

ASESOR: ING. GEOLOGO MANUEL ARTURO RODRIGUEZ CORREA.

MEXICO, D. F.

1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

269569



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Integrantes del Jurado

*"Siempre me llama la atención que alguien
hable de cosas de las que entiende."*

Wim Wenders

(nacido en 1946), director alemán de cine.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/0014/98

ASUNTO: Asignación de Jurado

C. ANA TRINIDAD ROMERO AVALOS
JOSE ANTONIO DE LEON RESENDIZ
Presente

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

Presidente: I.Q. Gonzalo Rafael Coello García

Vocal: I.Geo. Manuel Arturo Rodríguez Correa

Secretario: I.Q. Flora Antor Hernández

Suplente: I.Q. Antonio Avalos Ramírez

Suplente: M. en C. Néstor Noé López Castillo

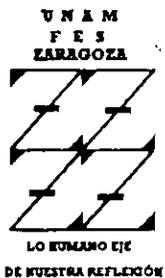
Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 7 de Mayo de 1998

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO ENRIQUE MENDEZ GUTIERREZ



Presentan:

Ana Trinidad Romero Avalos
José Antonio de León Reséndiz

Asesor: Ing. Geólogo Manuel Arturo Rodríguez Correa

Agradecimientos

"A las personas les interesa nuestro destino exterior; el interior, sólo a nuestro amigo."

Heinrich von Kleist

(1777-1811), poeta alemán.

A mis padres:

Sr. PEDRO ROMERO GONZÁLEZ
Sra. ANA MARÍA AVALOS GONZÁLEZ

*Por su apoyo en todo momento;
por sus oraciones en silencio;
por sus preocupaciones calladas;
por ser siempre mis amigos sin dejar de ser mis padres;
por ser la inspiración que me impulsa a la superación constante.
Por haber trazado con sus vidas el camino a seguir para realizarme como mujer y profesionalista.*

A mis hermanos:

ALMA PATRICIA y RAFAEL

Por brindarnos siempre motivos de orgullo y felicidad.

A mi esposo:

C. P. MARIO BENÍTEZ ROSAS

Por todos estos años llenos de apoyo y cariño incondicional.

A mis tíos y tías:

*Porque en las alegrías y tristezas, siempre han estado a mi lado;
Lutú, Cata, Tomás, Zito y Daniel; mi cariño y agradecimiento por siempre.*

A una gran mujer: A MI ABUELITA TRINIDAD GONZÁLEZ

A CONCHA.

Nada en el mundo puede sustituir a la perseverancia. No lo puede el talento; nada hay más común que los fracasados con talento. No lo puede el genio; la cultura no lo puede. El mundo está lleno de cultos derrotados. La persistencia y la determinación lo pueden todo. El lema "sigue adelante" siempre ha resuelto y siempre resolverá los problemas de la raza humana.

Ana Trinidad Romero Avalos

A mis padres y hermanos.

Porque siempre han sido mis héroes en tiempos difíciles,
porque sin ustedes no habría nada de lo que hay ahora,
por los momentos de alegría y de tristeza que nos han unido, como padres a hijos,
como hermanos a hermanos,
porque el amor más puro vino de ti, Sra. María,
porque has dado tu vida por nosotros, Sr. Antonio,
porque Lili y Alex dieron más luz a las vidas de todos,
porque nuestra adversidad unió a Octavio a nosotros.

A Lessly:

"...Será como si la vida se me llenara de sol.... Y luego ¡mira! ¿Ves allá los campos de trigo? Yo no como pan. Para mí el trigo es inútil. Los campos de trigo no me dicen nada. ¡Es triste eso! Pero tú tienes el pelo dorado. ¡Qué maravilla...! El trigo, que es dorado, me hará acordarme de ti. Y me gustará el susurro del viento en el trigo..."
Te quiero.

A Ana.

Porque la amistad es una sensación compleja, un concepto difícil de explicar, de sentir y de expresar...
excepto cuando se tiene.

A la Familia Romero Avalos.

Porque mucho de lo que hicimos fue gracias a ustedes,
Sra. Ana María, Sr. Pedro, Rafa, Paty.
siempre estarán conmigo.

A Odette y Hugo.

Porque uno más uno puede sumar uno...
pero a veces es más de dos...
pero sea cual sea el resultado,
éste es indivisible.

A Adriana, Micaela, Otilia, Ruth, Cris, Vic, Carlos y los que me falten.

Porque lo esencial, es invisible a los ojos.

El murmullo está ahí, ¿escuchas...?,
resuena, esperando que alguien lo encuentre,
Dios, el misterio, las quimeras son muchas.
Quién descubra, jalabado sea su temple...!

José Antonio de León Reséndiz

Al Ing. M. Arturo Rodríguez Correa.

Porque fue al único que se le ocurrió preguntar a un grupo de expertos: "¿entonces no hay escape de contaminantes a los alrededores de estos sistemas... nunca?"

¿Me lo aseguran...?"

Y como nadie le respondió, entonces nos delegó la responsabilidad de contestar su pregunta.

Gracias por tus conocimientos y apoyo (de verdaderos cuates).

Al Ing. David Azpeitia Hernández

Porque ha sido un verdadero amigo que nos sacó de apuros, cuando algunas veces nos dábamos por vencidos...
(y fueron muchas veces).

A los Profesores: Flora Antor, Néstor López, Rafael Coello y Antonio Avalos.

Porque gracias a sus comentarios vertidos en torno de nuestro trabajo, nosotros exclamamos:

¡Entonces, al parecer, estamos bien...!

Y respiramos aliviados.

A los Ingenieros del IMP: Ada, Susy, July, Gabriel y Raúl.

Porque fueron más que compañeros de trabajo,

y aprendimos con ellos lo que no se enseña en cinco años de escuela.

A Gerardo.

Porque no es lo mismo un amigo de profesión, que la profesión de ser un amigo
(o lo que es casi igual: no es lo mismo un "hijo canoso" que un "oso canijo").

Si para recobrar lo recobrado
tuve que haber perdido lo perdido,
si para conseguir lo conseguido
tuve que soportar lo soportado.

Si para estar ahora enamorado
fue menester haber estado herido,
tengo por bien sufrido lo sufrido,
tengo por bien llorado lo llorado.

Porque después de todo he comprendido
que no se goza bien de lo gozado
sino después de haberlo padecido.

Porque después de todo he comprobado
que lo que tiene el árbol de florido
vive de lo que tiene sepultado.

santa Teresa de Ávila

Índice

"Ningún conocimiento humano puede ir más allá de su experiencia."

John Locke

(1632-1704), filósofo británico.

Resumen.

Objetivos.

Introducción.

Capítulo I	Generalidades Acerca de los Llamados Residuos Peligrosos.
-------------------	--

1.1	Definición y Clasificación.	I-1
1.2	Propiedades Físicas y Químicas.	I-3
1.2.1	Propiedades Físicas.	I-3
1.2.2	Propiedades Químicas.	I-5
1.2.3	Criterios de Peligrosidad.	I-8
1.3	Aspectos Toxicológicos y Efectos en la Salud.	I-9
1.4	Destino, Movilización y Efectos Ambientales de los Residuos Peligrosos.	I-11

Capítulo II	Situación de los Residuos Peligrosos en México y en el Mundo.
--------------------	--

2.1	Fuentes Generadoras de Residuos Peligrosos en México.	II-1
2.2	Volumen Estimado de Generación de Residuos Peligrosos.	II-3
2.2.1	Principales Residuos Peligrosos Generados en México.	II-3
2.2.2	Generación de Residuos Peligrosos en la Franja Fronteriza Norte.	II-4
2.3	Algunos Casos de Manejo Inadecuado de Residuos Peligrosos en México.	II-6
2.4	Gestión de Residuos Peligrosos.	II-8
2.4.1	Capacidad Instalada para la Gestión.	II-9
2.5	Normas Oficiales Mexicanas sobre Residuos Peligrosos.	II-11
2.6	Políticas Internacionales sobre Movimiento Transfronterizo.	II-12

Capítulo III	Alternativas Tecnológicas para la Administración de Residuos Peligrosos.
---------------------	---

3.1	Reducción.	III-1
3.1.1	Modificación de Procesos.	III-1
3.1.2	Sustitución de Productos.	III-2
3.1.3	Recuperación y Reciclaje.	III-2
3.1.4	Segregación en la Fuente.	III-3
3.2	Tratamiento de Residuos Peligrosos.	III-4
3.2.1	Tratamiento Térmico.	III-4
3.2.2	Tratamientos Biológicos.	III-5
3.2.3	Tratamientos Químicos.	III-5
3.3	Disposición Final.	III-7
3.3.1	Cementerios Industriales.	III-7
3.3.2	Lagunas Superficiales.	III-7
3.3.3	Inyección a Pozos Profundos.	III-8
3.3.4	Minas Abandonadas.	III-8
3.3.5	Tiraderos al Mar.	III-8
3.3.6	Caso Especial: Disposición de Residuos de Plaguicidas.	III-9
3.4	Confinamiento de Residuos Peligrosos en Domos Salinos.	III-11

Capítulo IV	Generalidades Acerca de los Domos Salinos.
--------------------	---

4.1	Origen y Características de los Domos Salinos.	IV-1
4.1.1	Propiedades Generales de la Sal.	IV-4
4.2	Localización de Domos Salinos en México.	IV-7
4.3	Usos de los Domos Salinos.	IV-9
4.3.1	Uso para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.	IV-11

Capítulo V	Tópicos sobre las Cavemas en los Domos Salinos para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.
-------------------	---

5.1	Localización Estratégica del Domo Salino para el Depósito de Residuos Peligrosos.	V-1
5.2	Criterios de Selección del Lugar de Ubicación para la Creación de las Cavemas en un Domo Salino.	V-2
5.2.1	Características Geológicas.	V-2
5.2.2	Cubierta de Sal y Espaciamento de las Cavemas.	V-3
5.3	Creación de la Cavema Lixiviada.	V-5
5.3.1	Lixiviación.	V-5
5.4	Operación de la Cavema Lixiviada en el Domo Salino.	V-9
5.5	Especificaciones Generales de Capacidad de una Cavema Lixiviada en un Domo Salino para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.	V-11

Capítulo VI	Tratamiento de los Residuos Peligrosos y Metodología de Confinamiento.
--------------------	---

6.1	Introducción.	VI-1
6.2	Guía de Tratamiento de Residuos Peligrosos y Solidificación Cementosa.	VI-2

Capítulo VII	Transferencia de Masa del Confinamiento de Residuos Peligrosos en Cavernas Lixiviadas en Dornos Salinos.
---------------------	---

7.1	Introducción a los Mecanismos de Transferencia de Masa de un Confinamiento de Residuos Peligrosos.	VII-1
7.1.1	Características Generales de un Confinamiento Típico.	VII-3
7.1.2	Definición de Zonas Activas.	VII-3
7.2	Flujo de Salmuera en la Caverna.	VII-6
7.2.1	Modelos Conceptuales.	VII-6
7.2.2	Parámetros e Incertidumbres.	VII-8
7.2.3	Cálculos y Resultados del Flujo de Salmuera.	VII-12
7.3	Transferencia de Masa en Estado Líquido.	VII-18
7.3.1	Transporte Difusivo Fuera de la Caverna.	VII-18
7.3.2	Coefficiente Efectivo de Difusión.	VII-19
7.3.3	Longitud de Difusión.	VII-23
7.3.4	Atenuación en la Zona Límite de Inyección.	VII-31
7.3.5	Masa Acumulada del Contaminante Liberado.	VII-33
7.4	Transferencia de Masa en Estado Gaseoso.	VII-37
7.4.1	Fundamento.	VII-37
7.4.2	Modelo Conceptual.	VII-37
7.4.3	Transporte y Confinamiento del Gas.	VII-40
7.4.4	Gas Disuelto: Difusión y Atenuación.	VII-41
7.4.5	Expansión de Volumen del Gas.	VII-45
7.4.6	Velocidad de Recorrido del Gas.	VII-49

Capítulo VIII	Seguridad a Largo Plazo de una Caverna Salina para el Confinamiento de Residuos Peligrosos:
----------------------	--

8.1	Introducción.	VIII-1
8.2	Análisis del Flujo de Salmuera.	VIII-2
8.3	Transferencia de Masa en Estado Líquido.	VIII-5
8.3.1	Longitud de Difusión.	VIII-5
8.3.2	Cálculo del Tiempo de Difusión, caso 1,2-Dicloroetano.	VIII-7
8.3.3	Masa Acumulada de Contaminante Liberado.	VIII-8
8.4	Transferencia de Masa en Estado Gaseoso.	VIII-10
8.4.1	Gas Disuelto: Difusión y Atenuación.	VIII-10
8.4.2	Expansión de Volumen del Gas.	VIII-10
8.5	Sumario de las Conclusiones y Puntos Establecidos del Estudio a Largo Plazo de la Transferencia de Masa.	VIII-13

Conclusiones.

Bibliografía.

Comentarios.

Resumen

*"Para ver claro, basta con cambiar la
dirección de la mirada."*

Antoine de Saint-Exupéry

(1900-1944), escritor francés.

El problema ambiental relacionado a los residuos peligrosos es grave y de difícil solución tanto en su generación, manejo y/o disposición final. Particularmente en México la capacidad de las opciones de tratamiento no son suficientes para cubrir una demanda cada vez mayor de estos servicios. Las bases para la idea del confinamiento de residuos peligrosos en cavernas lixiviadas en domos salinos surgen en Alemania como una respuesta al problema de almacenamiento de crudo y gas natural, debido a las propiedades y características de los domos salinos que los hacen idóneos para el almacenamiento temporal o confinamiento definitivo para diversos usos. En el mundo existen cuencas salinas extensas y deseables para estos fines (incluyendo las existentes en México). La tecnología para la formación de las cavernas es la semejante a la usada para la exploración y explotación de los yacimientos petroleros. La metodología para el confinamiento de residuos peligrosos incluye diferentes etapas que van desde estudios geológicos, hasta la operación de una planta de pretratamiento de los residuos para su posterior depositación final. La capacidad de confinamiento es alrededor de 500,000 Ton. Las perspectivas para la aplicación de la tecnología en México son excelentes, debido a que el análisis de transferencia de masa aplicado en este estudio muestra que: los residuos difícilmente se transformarán a una fase fluida por la pequeña afluencia de salmuera y, si aún ocurriera que éstos pasaran a una fase móvil (líquida o gaseosa), el flujo de éstos a través de la masa salina sería casi inexistente.

Objetivos

*"Las verdades que revela la ciencia superan
siempre a los sueños que destruye."*

Joseph Ernest Renan

(1823-1892), escritor francés.

- Definir qué son los residuos peligrosos y sus características .
- Mostrar un panorama general sobre la problemática ambiental referida a los residuos peligrosos, sus consecuencias y algunas alternativas de solución.
- Establecer los principios básicos que han propuesto a los domos salinos como una alternativa viable para el confinamiento de residuos peligrosos.
- Explicar la metodología y técnicas existentes para la construcción de cavidades en los domos salinos para su posterior utilización en el confinamiento de residuos peligrosos.
- Explicar la tecnología desarrollada para el pretratamiento de los residuos peligrosos para su confinamiento en la caverna lixiviada del domo salino.
- Aplicar y/o desarrollar los modelos de transferencia de masa que expliquen la totalidad de los sistemas de "migración" de residuos peligrosos que podrían presentarse en un confinamiento de este tipo.
- Mediante los modelos propuestos, establecer los rangos de seguridad teóricos, que se presentarían bajo las condiciones reales geológicas de un domo salino, es decir, en cierto tiempo, estimar la cantidad de residuos peligrosos que "migrarán" hacia los alrededores de la caverna. De manera análoga, se obtendrá el tiempo en que se moverán los residuos peligrosos (con un ejemplo) fuera de la caverna lixiviada.

Introducción

"El peligro radica en que nuestro poder para dañar o destruir el ambiente, o al prójimo, aumenta a mucha mayor velocidad que nuestra sabiduría en el uso de ese poder."

Stephen Hawking

(nacido en 1942), físico británico.

Hasta la última década del siglo XX, se ha modificado nuestro entorno y cambiado nuestros hábitos de vida, de acuerdo a las necesidades (naturales o artificiales) crecientes de la sociedad humana. El precio que se ha pagado por la satisfacción de estos requerimientos y la comodidad de la vida moderna es muy caro. El desarrollo tecnológico, de la mano con la actividad industrial son dos de los grandes factores que mueven nuestro mundo, pero también son los que más problemas han generado.

Desde el inicio de las actividades extractivas, manufactureras, de transformación o de bienes y servicios, apareció un aspecto no previsto de los procesos empleados en las actividades industriales: la contaminación. A través de los años, esta problemática se ha hecho cada vez más compleja y difícil de resolver, debido a la naturaleza de los desechos industriales, la enorme variedad de contaminantes existentes y las políticas seguidas por las empresas para proponer o aplicar alternativas de solución a estos problemas.

La problemática ambiental tiene diferentes estados de gravedad, aún cuando en todos sus niveles hay grandes daños. Pero cabe resaltar que los desechos industriales tienen diferentes clasificaciones y la que es estudiada en este trabajo es la referida a los residuos catalogados como peligrosos. Las industrias que tienen una mayor contribución de los residuos peligrosos son (por ejemplo), las metalúrgicas del hierro y el acero o de metales no ferrosos y la industria química. Existen otras fuentes, como las actividades agrícolas generadoras de residuos de plaguicidas, las extractivas (como las mineras y las petroleras) y las de servicio.

Históricamente hablando, la falta de una cultura ambiental en el pasado que advirtiera sobre los riesgos que acarreaban las actividades industriales y el manejo inadecuado de los residuos peligrosos derivados de ello, provocó grandes desastres como el acontecido en Bhopal (India), cuando una fuga de isocianato de metilo causó 2,000 muertes y más de 100,000 personas con diferentes grados de intoxicación; o como en Japón, donde grupos de gente que ingirieron

alimentos contaminados con residuos industriales y mineros (principalmente de cadmio y mercurio) sufrieron graves problemas de salud que llevaron a algunos a la muerte. Y así como estos ejemplos, existen muchos más que evidencian las implicaciones y riesgos de la disposición inadecuada de los residuos peligrosos para la salud y el ambiente.

Ante el panorama no muy agradable que presenta un mundo en constante peligro debido a los desechos generados por los sistemas de producción industrial, los problemas asociados con los residuos peligrosos han sido elementos preponderantes del establecimiento de regulaciones nacionales e internacionales para reducir la generación y dar un tratamiento y disposición final adecuados a este tipo de residuos. Es así que las regulaciones han contribuido grandemente a promover la innovación tecnológica tanto de los procesos de producción (para disminuir la producción de residuos peligrosos en la fuente) como de las tecnologías para recuperar, reciclar, tratar o eliminar tales desechos; esto es, mediante tecnologías de final de procesos.

México no ha estado al margen de esta evolución y esto se ha visto reflejado en su política y legislación ambientales, así como en sus esfuerzos por acelerar el paso y fortalecer la capacidad institucional con objeto de consolidar el marco normativo. A lo cual se suma su interés por promover la adopción de procesos limpios de producción y del manejo ambientalmente sensato de los residuos peligrosos desde su fuente hasta su disposición final.

Sin embargo, la realidad de las metodologías para el manejo de los residuos peligrosos sobrepasan por mucho los objetivos mencionados anteriormente. En nuestro país diariamente se generan 50,000 toneladas de desperdicios de los cuales el 10% son residuos con características de peligrosos y tóxicos y el resto son desechos municipales. Gran parte de estos se acumulan en tiraderos ya sea en forma temporal o definitiva, con un mínimo control sanitario e incluso sin éste.

Aunque los avances en tecnología sanitaria proporcionan diferentes alternativas para el tratamiento de estos residuos, posiblemente algunos de los factores que afectan la ideología industrial y que precisamente han impedido avances importantes en las alternativas para afrontar estos problemas, ha sido el económico y el social. Por ejemplo, para el depósito final de desechos sólidos peligrosos y tóxicos existe la depositación en cementerios superficiales con sistemas de control y monitoreo; para la eliminación, existe la incineración que puede reducir la toxicidad y volumen significativamente hasta acercar al estado inerte al producto. Los dos métodos son convenientes mientras exista el adecuado monitoreo técnico y el control del mismo, con las desventajas de un alto costo económico y el peligro latente en sus operaciones (cuando son incinerados de manera inadecuada los llamados BPC's -bifenilos polidlorados- producen más residuos gaseosos extremadamente tóxicos y cancerígenos). Por otro lado, el número y capacidad de estas instalaciones no satisfacen en lo mínimo la demanda de los corredores industriales y de las ciudades del territorio nacional. Y es precisamente en nuestro país, que existe la posibilidad de desarrollar una alternativa de disposición final gracias a las características geológicas y geográficas del territorio nacional. Tal propuesta es el confinamiento de los residuos peligrosos en cavernas lixiviadas en domos salinos.

Los domos salinos son grandes masas de sal que se depositaron y fueron sepultadas por grandes espesores de sedimentos los cuales por su peso originan fuertes presiones que obligan a la sal a comportarse como una masa plástica que se deforma a través del tiempo. En México existen grandes extensiones con estas estructuras salinas las cuales han sido estudiadas ampliamente por su relación con los yacimientos petroleros. Por lo mismo, numerosos estudios demuestran la presencia de gran cantidad de estructuras salinas en los estados de Tabasco, Veracruz, Coahuila y Nuevo León.

Las bases de esta idea no son nuevas, ya que con anterioridad se han ocupado cavernas en la masa salina para el confinamiento de petróleo y gas natural. A partir de las características mencionadas anteriormente, se desarrollaron los procedimientos para el confinamiento de

residuos peligrosos en los domos salinos. El factor seguridad es muy alto, como lo han demostrado los almacenamientos con estas características en otras partes del mundo. En Estados Unidos se han utilizado grandes cavernas construidas en domos salinos para el confinamiento de altos volúmenes de desechos tóxicos y peligrosos. En Alemania se almacenan 5 millones de toneladas anuales de residuos peligrosos en este tipo de instalaciones. Tales depósitos han demostrado que no tienen impacto ambiental, por lo que se consideran seguros y sin riesgos presentes o futuros (algunas compañías calculan la seguridad de tales depósitos de 500 a 1,500 años y aún eternos). Lo que supone una ventaja considerable en cuanto a otros tipos de confinamientos de residuos. En resumen, la metodología para la construcción de las instalaciones es la siguiente:

- *La factibilidad del proyecto.* En este paso se recopila la información geológica existente y se definen aspectos para el desarrollo del proyecto. Por ejemplo, los volúmenes de desechos producidos por las industrias y los volúmenes de residuos peligrosos que deberán confinarse en los depósitos y de esta manera realizar un programa de construcción sistemática acorde a los volúmenes generados de desechos.
- *Estudios geológicos, geohidrológicos, geotécnicos y de geología ambiental.* Se hacen del sitio seleccionado tanto en la superficie como del subsuelo donde se pretende la construcción de los confinamientos.
- *Selección de sitios de perforación.* Se establece la ubicación adecuada de las cavidades de acuerdo a los estudios previamente realizados, así mismo se lleva a cabo la perforación de los pozos que servirán de base para el desarrollo de las cavidades. Se recomienda que las cavidades sean construidas entre 1,000 y 1,500 metros de profundidad. La perforación incluye la instalación de tuberías de revestimiento cementado, cuya función es aislar la futura cavidad con las formaciones suprayacentes al domo salino.
- *Formación de las cavernas.* Posteriormente viene el proceso de lixiviación o disolución de la sal la cual se realiza a través de tuberías de perforación concéntricas donde se hace circular agua dulce para disolver la sal y así generar grandes oquedades de aproximadamente 40 m de diámetro por 600 m de altura. La inyección del agua se hace desde la superficie por bombeo y una vez obtenido el volumen programado la cavidad se vacía completamente y queda en condiciones para iniciar su llenado.

- *Pretratamiento de los desechos.* Los residuos peligrosos en la superficie antes de introducirse en las cavernas deben tener un tratamiento para la caracterización, reducción de toxicidad (de agentes activos) y estabilización. Posteriormente se mezclan los desechos con un concreto y al fraguarse éste, se fragmenta en pequeños trozos ("pellets").
- *Operación de la caverna.* Se inyectan los "pellets" al interior de la cavidad creada. Al terminar de llenar la caverna con residuos peligrosos, se cierra herméticamente.

La propuesta presentada tiene grandes ventajas, las cuales se discutirán en el capítulo III y los capítulos subsecuentes. Pero es precisamente nuestro objeto de estudio lo relacionado a algunos aspectos de la seguridad de este tipo de confinamientos el cual no se ha explicado de manera satisfactoria, como es el saber ¿qué pasa después de ser depositado un residuo peligroso en el sistema?. En general, el principio básico de la contención de desechos tóxicos es evitar la contaminación causada por diversos tipos de residuos usando barreras artificiales o naturales. Por la complejidad química de los residuos peligrosos, éstos no pueden ser simplemente almacenados como una medida efectiva para prevenir la migración de material tóxico al ambiente. La influencia de la atmósfera y la geósfera sobre los depósitos de residuos peligrosos es estudiada como la interacción de sus características entre los mismos compuestos que puedan encontrarse presentes. Los fenómenos ocurridos en los depósitos son soportados por agua (fase móvil) la cual llega a diferentes tipos de residuos actuando como solvente. Esto puede llevar a la lixiviación de materiales tóxicos para los cuales las barreras no fueron diseñadas y consecuentemente podría tenerse una formación incontrolable de soluciones de materiales tóxicos. Las soluciones típicas son formadas por complejos solubles con aniones tóxicos y metales pesados, resultando en la movilización de ambos hacia fuera de la barrera establecida y por lo tanto, haciendo riesgosa la seguridad del confinamiento.

La mayor preocupación sobre los confinamientos de residuos peligrosos es su amenaza real de contaminación de los alrededores y mantos fráticos. Esta preocupación está claramente justificada con los desastres químicos registrados en las naciones industrializadas (como los ya mencionados al principio de este documento). Para este tipo de instalaciones, el análisis tanto

teórico como experimental de la transferencia de masa en las zonas activas (interfase entre el residuo peligroso y las paredes salinas) define la seguridad del confinamiento. Todo esto con la finalidad de demostrar que no habrá peligro por el "escape" de contaminantes a los alrededores por un período de 10,000 años (requisito de "no migración", requerido por la Agencia de Protección al Medio Ambiente -EPA-⁽⁴⁾).

Así pues, desde una perspectiva regulatoria, el objetivo principal de este trabajo es definir la seguridad del confinamiento mediante un estudio teórico sobre los aspectos antes mencionados, particularmente sobre los mecanismos de transferencia de masa presentes que podrían dar lugar al escape (o "migración") de los residuos peligrosos fuera de la pared salina del confinamiento. Todos estos fenómenos que pudieran presentarse dentro de los confinamientos de residuos, se podrán explicar basados en el cálculo de modelos que a su vez son determinados por las características físicas y químicas de las formas de los residuos y del medio ambiente geológico.

Con todo lo anterior no se pretende tener la solución única a los problemas de contaminación que aquejan a nuestro medio ambiente, pero si es nuestra intención sumarnos a la preocupación por el futuro del único planeta que tenemos hasta ahora. El desarrollo tecnológico es indispensable y las soluciones a las problemáticas que causa tienen un precio muy alto, pero valen la pena analizar las propuestas para tener un mundo con mejores perspectivas de vida para nosotros y para las generaciones futuras.

Capítulo I

Generalidades Acerca de los Llamados Residuos Peligrosos.

*"El camino de la civilización está
pavimentado con envases de hojalata."*

Elbert Hubbard

(1856-1915), editor, ensayista y pedagogo
estadounidense.

1.1 Definición y Clasificación.

Internacionalmente, dentro de la definición y clasificación de residuos peligrosos se incluyen a los residuos aislados, mezclados, o en solución; a los sólidos, líquidos o lodos generados como subproductos de procesos industriales; y a los aceites resultantes de la limpieza de maquinarias e instalaciones. Estos residuos están considerados como un peligro potencial para la salud humana, los bienes o el ambiente, en virtud de sus propiedades físicas, químicas y toxicológicas (cuadro 1.1).

Asimismo, se consideran residuos peligrosos a aquellas materias primas o productos químicos que caducan, se deterioran, se retiran del comercio o dejan de utilizarse; lo cual plantea la existencia de una vasta fuente generadora de residuos peligrosos, que eventualmente se encuentran sujetos a regulación y control.

Distintos países y organismos internacionales han establecido clasificaciones y caracterización de diferentes residuos peligrosos. Sin embargo, existen similitudes en aquellos de elevada peligrosidad para la salud o el ambiente.

La definición entre peligro y riesgo resulta de vital importancia. Un peligro está directamente relacionado con las propiedades del residuo, ya sea fisicoquímicas o toxicológicas. En el primer caso, si se trata de una sustancia química o de una mezcla de varias sustancias. En el segundo, de tipo infeccioso, si se trata de residuos biológicos.

El riesgo depende del grado de daño que podría ocasionar el residuo peligroso, en función de la exposición humana a él, de su difusión en el ambiente o de la magnitud de los siniestros que pueda ocasionar. Al evaluar un peligro se pretende cuantificar la potencia (corrosiva, reactiva, tóxica, inflamable e infecciosa) de los residuos; en tanto que al evaluar sus riesgos se intenta calcular o estimar la magnitud de sus impactos (número de individuos posiblemente afectados o dimensión del área que puede ser dañada).

cuadro 1.1
ALGUNOS EJEMPLOS DE RESIDUOS PELIGROSOS
ÁCIDOS Y ALKALIS
Comprenden una gran variedad de sustancias, las más comunes de las cuales se producen y emplean en grandes cantidades; tal es el caso de la mezcla crómica y sulfonítrica, del agua regia, las soluciones residuales de procesos electroquímicos, las soluciones alcalinas de lavado y fabricación de papel y celulosa. Estas soluciones acuosas pueden disolver y movilizar metales en los suelos y contaminar cuerpos de agua.
ASBESTOS
Bajo esta denominación se incluye a un grupo de fibras minerales naturales empleadas en la generación de gran cantidad de productos, prácticamente indescriptibles y no flamables; sin embargo, los asbestos ocasionan problemas respiratorios a los trabajadores expuestos a él en el ambiente laboral. Se le considera involucrado en el desarrollo del cáncer del pulmón y de la pleura.
CIANUROS
Son ampliamente utilizados, particularmente en la producción de metales y en la síntesis de productos químicos tales como plaguicidas y polímeros. Los cianuros se caracterizan por su gran toxicidad.
FENOLES
Son sustancias altamente corrosivas y peligrosas en su manejo; empleadas para producir resinas, herbicidas, desinfectantes y otros.
PLAGUICIDAS (HERBICIDAS E INSECTICIDAS)
Son en sí productos peligrosos pero, además, durante su síntesis se generan sustancias intermedias con propiedades que las hacen tan peligrosas como los residuos de los propios plaguicidas; es el caso de las dioxinas que estuvieron involucradas en el accidente ocurrido en Seveso, Italia.
BIFENILOS POLICLORADOS (BPC's)
Al igual que los bifenilos polibromados (BPB's), han tenido un amplio uso como aislantes eléctricos y plastificantes (fabricación de películas plásticas aplicadas a utensilios de cocina), así como anticorrosivos. Por su gran persistencia y sus efectos tóxicos, se ha buscado a nivel mundial prohibir su producción y sustituirlos por sustancias menos peligrosas.
METALES PESADOS
La toxicidad de un gran número de ellos es bien conocida, así como su persistencia y capacidad de bioacumulación, razones por las cuales su manejo está sujeto a regulación y control.
RESIDUOS DE PINTURAS
Los procesos de producción de pinturas, barnices y lacas se caracterizan por generar grandes cantidades de residuos que incluyen: mezclas de solventes orgánicos -hidrocarburos aromáticos, derivados halogenados, cetonas y aldehídos-resinas vinílicas, acrílicas y epóxicas; pigmentos y colorantes diversos, algunos a base de metales pesados.
RESIDUOS DE GASES COMBUSTIBLES DEL PETRÓLEO
En los procesos de extracción del petróleo se genera gas natural y gas de petróleo, considerados ambos como residuos peligrosos si no se utilizan íntegramente.
RESIDUOS DE PETRÓLEO
Los procesos de extracción, destilación y cracking generan mezclas de sustancias que pueden convertirse en residuos peligrosos, tales como: hidrocarburos aromáticos policíclicos, asfaltenos, azufre y metales pesados.
SOLVENTES ORGÁNICOS
En este grupo se incluyen hidrocarburos alifáticos y aromáticos, sus derivados halogenados, cetonas, aldehídos, ésteres, éteres y otras sustancias. Se emplean en gran diversidad de procesos, en particular en la limpieza de equipos, motores y en la industria electrónica.
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; Residuos Peligrosos en el Mundo y en México; INE, SEMARNAP; México, 1996.

1.2 Propiedades Físicas y Químicas.

En general, en todas las actividades industriales existen riesgos, al igual que en las operaciones en las cuales se manejan residuos peligrosos, razón por la cual es preciso conocer el ciclo de vida completo de los materiales, la ruta crítica de los procesos y de los residuos generados en los mismos para determinar con ello las fases en las cuales pueden presentarse dichos riesgos. Por tanto, es fundamental tener presente que existen riesgos para las personas y el ambiente a lo largo del trayecto que siguen los residuos peligrosos, desde el lugar donde se generan hasta el sitio en donde se tratarán y su disposición final, riesgos, que dependen básicamente de sus propiedades físicas y químicas.

1.2.1 Propiedades Físicas.

Las propiedades físicas comprenden aquellas que pueden ser determinadas sin alterar la composición química de la materia; son típicas de cada sustancia o compuesto y aunque muchas son comunes para varias sustancias, no todas son las mismas para dos compuestos diferentes. A continuación se describen algunas de las propiedades más importantes con respecto a los residuos peligrosos.

<i>cuadro 1.2</i>	
PROPIEDADES FÍSICAS	
Forma: líquida, sólida o gaseosa.	Presión de vapor.
Color, olor, sabor.	Temperatura de ebullición.
Densidad, peso específico.	Temperatura de solidificación.
Coefficiente de partición lípido-agua.	Solubilidad.

Peso específico.

Se refiere a la masa o peso del volumen dado de una sustancia, comparada con la masa o peso de un volumen igual de agua; se trata de saber si esa sustancia es más o menos pesada que el agua.

Solubilidad en agua.

Esta propiedad se expresa como la cantidad o el porcentaje de un material (en peso) que se disuelve en agua a temperatura ambiente. La movilidad de los residuos peligrosos en los suelos se ve favorecida por su solubilidad en agua. Cuando ésta es mayor a 500 ppm, los residuos alcanzan una gran movilidad y una mayor concentración en los medios acuáticos -como ocurre con el aluminio y el cadmio, por ejemplo-. Si las sustancias que componen los residuos tienen una solubilidad acuosa mayor a 25 ppm, no son persistentes en los organismos vivos. Y si su solubilidad es menor, pueden quedar inmobilizadas en los suelos y acumularse en los seres vivos, -como sucede con el arsénico y el plomo, por ejemplo-.

Coefficiente de partición lípido-agua.

Es la relación entre la solubilidad de un material en agua y la solubilidad en un aceite. A través de este coeficiente se puede determinar la capacidad que presentan las sustancias que conforman los residuos para disolverse en agua y en lípidos. Sustancias con coeficientes mayores a uno son liposolubles y de fácil absorción a través de las membranas y acumulación en el tejido graso (por ejemplo: los hidrocarburos aromáticos y los plaguicidas).

Presión de vapor.

Mide indirectamente la cantidad de una sustancia que se vaporiza a una temperatura dada. La volatilidad de las sustancias depende de su presión de vapor. Aquellas con presiones de vapor superiores a los 10^3 mmHg a 25°C , son muy volátiles y se movilizan fácilmente dispersándose en el ambiente (acetona, éter etílico, metanol, metilisocianato, etc.). Las que tienen presiones de vapor entre 10^4 y 10^6 mmHg son ligeramente volátiles y menos móviles; en tanto que las que tienen una presión menor a los 10^7 mmHg pueden considerarse como no volátiles (aceites minerales y metales pesados).

1.2.2 Propiedades Químicas.

Son aquellas que pueden ser determinadas cuando la sustancia sufre cambios en su composición básica (a nivel molecular); y las que al manifestarse, en general se acompañan de cambios en una o varias de las magnitudes de sus propiedades físicas (cuadro 1.3). Más adelante se describen algunas de ellas, las cuales, por su relevancia, son de las más significativas para el manejo y estudio de los residuos peligrosos.

cuadro 1.3	
PROPIEDADES QUÍMICAS	
Disociación e ionización.	pH.
Corrosividad.	Polimerización.
Reactividad.	Oxidación.
Flamabilidad.	Explosividad.
Descomposición térmica.	Degradabilidad.

Disociación e ionización.

Al solubilizarse, las sustancias iónicas se disocian; esto quiere decir que un átomo o un grupo de átomos se separan un poco de la sustancia original y adquieren una carga positiva (catión) o una negativa (anión). Las sustancias que no se disocian se denominan no-iónicas. Esta característica resulta importante para determinar su movilidad en los suelos. las sustancias aniónicas y no-iónicas son móviles en los suelos, mientras que las catiónicas se adsorben fuertemente a las partículas del suelo y quedan inmovilizadas.

Corrosividad.

Se considera que una sustancia es corrosiva cuando es capaz de descomponer a otras. En función de la liberación de hidrógeno, degrada químicamente a los materiales con los cuales entra en contacto. Por lo tanto, se considera peligrosa una sustancia corrosiva si tiene la capacidad de penetrar el acero con una densidad de 1 cm, en un periodo de 24

horas. Para efectos de derrames de materiales peligrosos, es corrosiva cualquier sustancia que exhiba un pH menor de 2 o mayor de 12.

pH.

Es el potencial de hidrogeniones y se refiere al cambio en la concentración de iones de hidrógeno (H^+) que se produce cuando esa sustancia se disuelve en agua. Si los hidrogeniones aumentan, la sustancia es ácida y el pH es menor a 7; por el contrario, si disminuyen, la sustancia es alcalina y su pH es mayor a 7.

Reactividad.

Una sustancia reactiva es aquella que al entrar en contacto con aire o agua, o a causa de un movimiento, sufre cambios químicos o físicos que pueden estar acompañados por la liberación repentina de energía. Esta liberación puede ir desde la efervescencia hasta una explosión violenta.

Flamabilidad.

Esta propiedad tiene que ver con el grado que presenta un material para arder, al aumentar su temperatura. Las sustancias más flamables son líquidos cuyo punto de ignición está por debajo de 60 °C.

Temperatura de ignición.

Es la temperatura más baja en la cual un material emite vapores flamables en cantidad suficiente para incendiarse en presencia de aire, ante cualquier fuente de ignición.

Temperatura de autoignición.

Es la temperatura más baja en la cual, un material flamable, al mezclarse con el aire, se incendia por sí solo, sin la presencia de una flama o chispa. Por ejemplo, en una atmósfera enriquecida con oxígeno puede ocurrir que una mezcla flamable se encienda espontáneamente a temperaturas más bajas que las normales.

Capacidad oxidante o comburente.

Se define así a la capacidad de liberar oxígeno para auxiliar en la combustión de materiales orgánicos y en la descomposición o degradación de los mismos.

Explosividad.

Las sustancias explosivas son aquellas que de manera espontánea o por una reacción química pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad, tales que causen daño a los alrededores.

Límites de explosividad en el aire.

Los límites de explosividad son dos:

- *Lower Explosive Level (LEL)*. Se refiere a la concentración mínima de vapores de una sustancia, mismos que pueden explotar si se calientan. Se expresa como porcentaje de vapor en el aire.
- *Upper Explosive Level (UEL)*. Se refiere a la concentración más alta de vapores de una sustancia, los cuales, en presencia de calor, explotarán. Se expresa como porcentaje de vapor en el aire.

Polimerización.

Consiste en una reacción química en la cual un gran número de moléculas relativamente simples se combinan para formar una gran cadena de moléculas. Una polimerización peligrosa será una reacción en la cual se liberen grandes cantidades de energía.

Degradabilidad.

Las sustancias pueden ser degradadas de tres maneras:

- *Quimiodegradabilidad*. Disminución de su actividad a través del tiempo mediante procesos químicos (tal como ocurre con los ácidos y bases).

- *Fotodegradabilidad.* Disminución de su actividad por medio de la luz (como sucede con las piretrinas y con el toxafén).
- *Biodegradabilidad.* Mediante la acción de microorganismos.

1.2.3 Criterios de Peligrosidad.

La riesgo de los residuos puede definirse en base a las propiedades vistas anteriormente, las cuales también son conocidas dentro de la legislación internacional como criterios de peligrosidad. Estos criterios engloban a los residuos en 6 grandes grupos: corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y biológicos⁽⁵⁾ (CRETIB, por sus siglas). En el cuadro 1.4 se muestran algunos ejemplos de los residuos pertenecientes a cada grupo.

cuadro 1.4
EJEMPLOS DE RESIDUOS PELIGROSOS EN BASE A LOS CRITERIOS DE PELIGROSIDAD (CRETIB)

CORROSIVOS	REACTIVOS	EXPLOSIVOS	TÓXICOS	INFLAMABLES	BIOLÓGICOS
Ácidos fuertes	Nitratos	Peróxidos	Cianuros	Hidrocarburos alifáticos	Sangre humana
Bases fuertes	Metales alcalinos	Cloratos	Arsénico y sales	Hidrocarburos aromáticos	Agentes infecciosos
Bromo	Metil isocianato	Ácido pícrico	Polfenoles	Éteres	Material médico, quirúrgico
Fenol	Fósgeno	Percloratos	Plomo	Alcoholes	Residuos patógenos
Hidracina	Magnesio	Trinitrotolueno	Fenol	Aldehídos	Objetos punzocortantes contaminados
	Cloruro de acetileno	Trinitrobenceno	Anilina	Cetonas	
	Hidruros metálicos	Permanganato de potasio	Nitrobenceno	Fósforo	

FUENTE: Becenil Albarrán, J. y Navarrete Rodríguez M.; *Recopilación, Aplicación y Evaluación de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación para el Tratamiento de Residuos Peligrosos*; Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Químicos; México; Enero de 1993.

1.3 Aspectos Toxicológicos y Efectos en la Salud.

Un residuo es tóxico, cuando la exposición de seres humanos (incluso a dosis bajas) es mortal, o bien que al ser inhalado, ingerido o al ingresar al organismo a través de la piel puede provocar efectos agudos o crónicos, incluyendo por supuesto al cáncer. Los residuos peligrosos interactúan con el organismo humano de acuerdo a las siguientes etapas: exposición, absorción, distribución y eliminación o acumulación.

cuadro 1.5

POSIBLES EFECTOS EN LA SALUD			
	AGENTE QUÍMICO	AFECCIÓN	OBSERVACIONES
AFECCIONES DEL APARATO RESPIRATORIO	Ácidos o bases y agentes corrosivos altamente reactivos: (amoníaco, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y cloro).	Edemas pulmonares, irritación de vías aéreas.	A corto plazo.
		Bronquitis, o enfisema pulmonar.	A mediano y largo plazo.
	160, BARIAL, fibras como asbesto.	Cicatrización pulmonar y como consecuencia fibrosis pulmonar.	
DESARROLLO DEL CÁNCER	Aminas, arsénico, asbesto, bclorometiléter, benceno, cadmio, cromo, isopropanol, níquel, hidrocarburos policíclicos aromáticos, cloruro de vinilo, radiaciones ionizantes, luz ultravioleta, etc.		Estudios experimentales en animales han indicado que más de 700 compuestos químicos son carcinógenos potenciales.
AFECCIONES SANGUÍNEAS	Monóxido, las anéfinas, el tolueno y el trinitrotolueno, el benceno, el cloruro de vinilo, el cloruro de metileno, la arsina y el plomo.	Daños renales.	
		Anemia aguda o crónica.	En algunos casos la exposición al benceno provoca leucemia.
AFECCIONES HEPÁTICAS	Tetracloruro de carbono, tetracloroetano y otros derivados halogenados, metales como el antimonio, el berilio, el cadmio, el magnesio o el selenio; sustancias como el dioxano, el fenol, el naftaleno, el dimetil sulfato, la hidracina o el nitrobenzono.	Hepatitis o fibrosis hepática (cirrosis).	
AFECCIONES RENALES	Disulfuro de carbono, plomo, mercurio, cromo arsénico, el ácido oxálico y el etilenglicol	Afecciones renales agudas.	
AFECCIONES DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR	Disulfuro de carbono, plomo.	Provocan depósitos de colesterol en los vasos sanguíneos. Aumenta el riesgo de ataques cardíacos.	

cuadro 1.5 (continuación)

	AGENTE QUÍMICO	AFECCIÓN	OBSERVACIONES
AFECCIONES DEL SISTEMA NERVIOSO	Los acetatos, los alcoholes, los éteres, las cetonas y derivados bromados, los plaguicidas, los plastificantes, el mercurio, el plomo, el magnesio y el arsénico.	Alteraciones en el sistema nervioso.	
	Gases asfixiantes y el monóxido de carbono.	Daños cerebrales por privación del oxígeno.	
AFECCIONES REPRODUCTIVAS	Cloruro de vinilo, plaguicidas como el DDT, el aldrín y el malatión; los bifenilos policlorados; el cloropreno, la epiclohidrina.	Impotencia, esterilidad, pérdida fetal, muerte perinatal y algunos defectos congénitos.	Aunque también pueden ser ocasionados por factores de otra índole.
	El benceno y el plomo.	Han estado asociados con mutación de las células germinales, infertilidad y teratogénesis.	
AFECCIONES DE LA PIEL.	Ácidos y bases fuertes, algunas sales metálicas o metales simples, diversos compuestos orgánicos.		Son considerados como irritantes primarios de la piel.
	Dicromatos, resinas epóxicas, los aceleradores de caucho, el hexaclorofeno, el bolífol, la salicilamida y la formalina.	Dermatitis de contacto.	

FUENTE: Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y en México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

Por medio de gran cantidad de estudios realizados con animales, evaluaciones clínicas de trabajadores expuestos a diferentes ambientes laborales así como con exámenes de personas que accidentalmente entraron en contacto con productos tóxicos, se han podido evaluar los efectos potenciales que los residuos peligrosos presentan para la salud (cuadro 1.5).

1.4 Destino, Movilización y Efectos Ambientales de los Residuos Peligrosos.

Un aspecto que ha sido descuidado y que debe tenerse presente al considerar las implicaciones de la generación de los residuos peligrosos es que la biósfera de nuestro planeta es un espacio cerrado con dimensiones fijas y capacidades limitadas de asimilación, de manera que todos los contaminantes y residuos que se vierten al ambiente permanecerán en él de una u otra forma, a pesar de que al ser diluidos y transportados por el agua o por el aire no sean susceptibles de ser detectados a simple vista.

Contrariamente a los malos hábitos de los seres humanos, la naturaleza funciona a través de ciclos en los cuales la materia orgánica e inorgánica atraviesa por procesos de decaimiento, degradación y reutilización como fuente de energía y alimento, causa por la cual no se generan residuos y todo se aprovecha. Desde el momento que se generan los residuos peligrosos, entran en procesos de interacción con los distintos elementos que conforman el ambiente, tanto bióticos como abióticos, lo que ocasiona efectos ecotóxicos o de otra índole.

Son consideradas ecotóxicas aquellas sustancias o residuos que provocan en el momento de su liberación, o posteriormente a ella, impactos adversos a los ecosistemas (inmediatos o diferidos) por sus efectos tóxicos sobre los sistemas bióticos; algunos de ellos derivados de su bioacumulación. Los constituyentes de los residuos peligrosos pueden disolverse en agua, penetrar y migrar a través de los suelos y alcanzar los mantos freáticos y los acuíferos subterráneos; además pueden contaminar las aguas superficiales y transferirse a lo largo de la cadena alimenticia hasta llegar de nuevo a los seres humanos.

También pueden mobilizarse por el aire y dar lugar a exposiciones por inhalación o absorción dérmica. Al describir las propiedades físicas y químicas de los residuos peligrosos se mencionan aquellas que facilitan su movilización a través de los distintos medios y su persistencia y acumulación (como la de los plaguicidas y sus residuos, cuadro 1.6), la

vulnerabilidad de los ecosistemas a los efectos nocivos de los residuos peligrosos varía de acuerdo con tales propiedades.

cuadro 1.6		
PERSISTENCIA Y DISPERSIÓN DE PLAGUICIDAS		
PLAGUICIDAS	PERSISTENCIA EN SUELOS (SEMANAS)	FACTOR DE DISPERSIÓN
ORGANOCLORADOS:		
Aldrín	530	4.44
Deldrín	312	3,300
Endrín	624	1,000
DDT5	546	70,000
Lindano	728	60
ORGANOFOSFORADOS:		
Diclorvos	8	0
Malabón	2	0
Paratión	8	9
Forato	2	0
VARIOS:		
Captán	1	0
2, 4, 5, T	1-12	0
Cloruro de etilmercurio	PERMANENTE	0
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; <i>Residuos Peligrosos en el Mundo y en México</i> ; INE, SEMARNAP; México; 1996.		

Capítulo II

Situación de los Residuos Peligrosos en México y en el Mundo.

*"No hay pasajeros en la Nave Espacial
Tierra; todos somos tripulación."*

Marschall McLuhan

(1911-1980), comunicólogo canadiense.

2.1 Fuentes Generadoras de Residuos Peligrosos en México.

En México el proceso de industrialización se inició de manera acelerada en los últimos cincuenta años, con una concentración industrial preponderante en unas cuantas ciudades -entre las que destacan la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), Monterrey y Guadalajara- y en algunos polos de desarrollo -como Veracruz y la frontera norte-. El país se caracteriza por la conformación de un porcentaje bajo de grandes empresas con tecnologías avanzadas de producción y un gran número de micro, pequeñas y medianas empresas (más de 95%), muchas de ellas con procesos obsoletos de producción. La planta industrial comprende básicamente, cuatro tipos:

1. Manufactureras.
2. Extractivas (minería y petróleo).
3. De la construcción.
4. Eléctrica.

En el cuadro 2.1 se describe la distribución de la industria en México, de acuerdo con el XIII Censo Industrial, publicado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). En lo que respecta a la industria química, de las 5,472 empresas que la conforman, la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) reúne a 340 que cuentan con 465 plantas y cubren las áreas de producción de petroquímica básica y secundaria; fibras sintéticas y artificiales, hules sintéticos y negro de humo, pigmentos y colorantes, adhesivos, química inorgánica, resinas sintéticas y especialidades químicas⁽¹²⁾.

La ANIQ promueve la adopción, por parte de sus socios, del Programa de Responsabilidad Integral, que comprende el manejo y eliminación idóneos de las sustancias tóxicas y materiales peligrosos. A su vez, dicha asociación ha establecido un sistema de información sobre accidentes químicos en el transporte. De acuerdo al cuadro 2.1, existen un total de 149,192 unidades industriales⁽¹²⁾ en todo el país, de las cuales según las últimas estadísticas se tienen 6,247 plantas generadoras⁽²⁰⁾ de residuos peligrosos.

cuadro 2.1	
SECTORES DE LA INDUSTRIA NACIONAL	
SECTORES	UNIDADES INDUSTRIALES
MINERÍA Y EXTRACCIÓN DEL PETRÓLEO	2,402
Subsector	
Carbón.	46
Petróleo y gas natural.	33
Extracción de minerales metálicos.	678
Explotación de minerales no metálicos.	1,645
INDUSTRIAS MANUFACTURERAS	141,446
Subsector	
Productos alimenticios, bebidas y tabaco.	51,151
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero.	16,853
Industrias y productos de madera (incluye muebles).	16,141
Papel y productos de papel, imprentas y editoriales.	7,952
Sustancias químicas, productos derivados del petróleo y del carbón, del hule y del plástico.	5,472
Productos minerales no metálicos (excluye los derivados del petróleo y del carbón).	14,502
Industrias metálicas básicas.	932
Productos metálicos, maquinaria y equipo (incluye instrumentos quirúrgicos y de presión).	26,945
Otras industrias manufactureras.	1,498
INDUSTRIA ELÉCTRICA	36
Subsector	
Electricidad.	36
INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN	5,308
Subsector	
Construcción.	5,308
Total:	149,192
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; Residuos Peligrosos en el Mundo y en México; INE, SEMARNAP; México; 1996.	

2.2 Volumen Estimado de Generación de Residuos Peligrosos.

Como puede apreciarse en el cuadro 2.2, de las 450,000 $\frac{\text{ton}}{\text{día}}$ de residuos generados por diferentes tipos de industria, alrededor de 14,500 $\frac{\text{ton}}{\text{día}}$ corresponden a residuos peligrosos, lo que equivale a cerca de 5 millones de toneladas anuales⁽¹²⁾. Según las últimas estadísticas, la generación de residuos peligrosos en México fue de 7.5 millones de toneladas en 1997⁽²⁰⁾. En México se reciclan o confinan 268,752 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$ de residuos peligrosos, incluyendo 60,000 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$ de residuos peligrosos importados, como es el polvo de acerías para la recuperación de zinc⁽¹²⁾.

cuadro 2.2				
VOLUMEN ESTIMADO A NIVEL NACIONAL DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES, INCLUYENDO LOS PELIGROSOS				
	1990		1991	
	Ton/día	Miles de Ton/año	Ton/día	Miles de Ton/año
Minería extractiva y de fundición.	300,000	109,500	337,500	123,187
Industria química: básica, orgánica e inorgánica.	70,500	25,732	81,000	29,565
Agroindustria.	29,500	10,767	31,500	11,498
Peligrosos.	15,500	5,657	14,500	5,292
Generación Total:	415,500	151,656	450,000	169,542

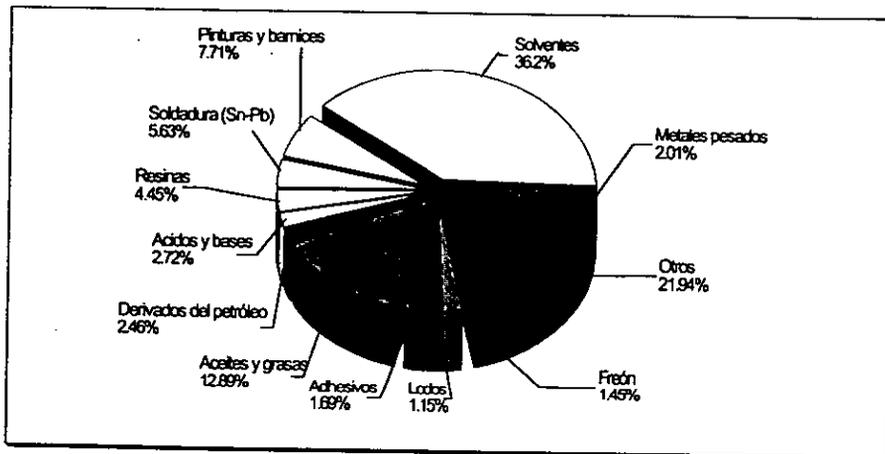
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

2.2.1 Principales Residuos Peligrosos Generados en México.

En México, los residuos peligrosos que se generan con mayor frecuencia son: solventes, metales pesados, derivados del petróleo, aceites y grasas, ácidos, bases, residuos de la manufactura de pinturas y barnices, adhesivos, resinas, soldadura (Pb-Sn), fréon, lodos de proceso, silicón, tintas, plásticos y otros en menor escala. En la gráfica 2.1 se muestran los porcentajes correspondientes a cada especie.

gráfica 2.1

RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE GENERAN CON MAYOR FRECUENCIA



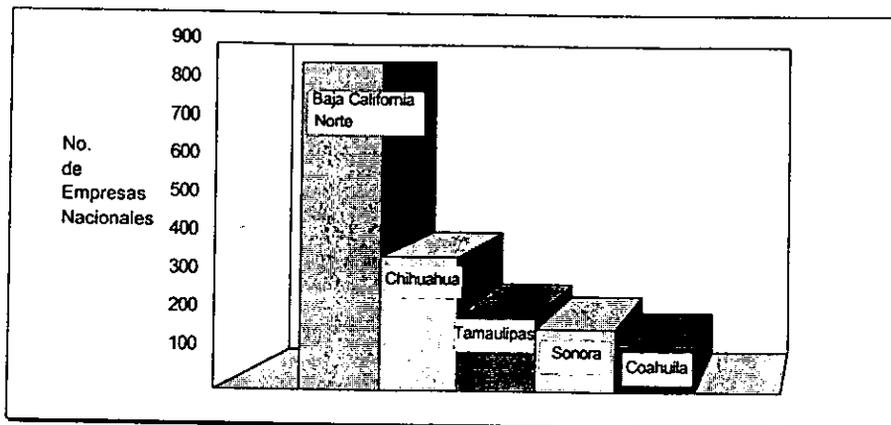
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; Residuos Peligrosos en el Mundo y México; INE, SEMARNAP; México; 1996.

2.2.2 Generación de Residuos Peligrosos en la Franja Fronteriza Norte.

La frontera norte con los Estados Unidos de América es una de las áreas con mayor crecimiento industrial en el país, debido a los beneficios que brinda su cercanía con los mercados estadounidenses; en particular, la industria maquiladora se ha incrementado aceleradamente. Existen alrededor de 2,147 empresas en la franja fronteriza norte de México, constituidas en 83.3% por maquiladoras. Las ciudades con mayor número de empresas maquiladoras son Tijuana con 612 y Juárez con 343⁽³⁵⁾. Las principales actividades de estas empresas son:

- *Maquiladoras.* Se dedican principalmente al ensamble de artículos eléctricos y electrónicos, incluyendo el armado de ameses eléctricos, la elaboración de productos de metal, costura de artículos en general, productos de madera y plástico.
- *Empresas nacionales.* Las actividades más importantes que realizan son la elaboración de productos de metal, alimenticios y químicos.

cuadro 2.3			
EMPRESAS DE LA FRONTERA NORTE, GENERADORAS DE RESIDUOS PELIGROSOS			
ESTADO	No. DE MAQUILADORAS	No. DE EMPRESAS NACIONALES	TOTAL
Baja California Norte	725	126	851
Chihuahua	283	65	348
Tamaulipas	181	16	197
Sonora	142	20	162
Coahuila	77	38	115
TOTAL	1,408	265	1,673



FUENTE: Maffey García, L. et al; *Regulación y Gestión de Productos Químicos en México, Enmarcados en el Contexto Internacional*, INE, SEDESOL; México; 1992.

Se tienen identificadas alrededor de 1,673 empresas generadoras de residuos peligrosos en la frontera norte (cuadro 2.3), lo que corresponde al 78% del total antes mencionado. De éstas 1,408 empresas son maquiladoras (84%) y el resto, nacionales. Las empresas que se dedican a elaborar artículos electrónicos y eléctricos son las que generan mayor cantidad de residuos; al contrario de lo que sucede con las de costura, alimentos, cuero y calzado. Se estima una generación de residuos peligrosos en la frontera norte de aproximadamente 60,000 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$. De esa cantidad estimada, 27% es generada por 1,141 empresas medianas y microempresas. Las empresas grandes son las que generan la mayor cantidad de residuos y representan el 73% del volumen total.

En la frontera norte, aproximadamente 29.3% de las empresas generadoras envían sus residuos peligrosos a EU, dichos residuos equivalen a 32,707 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$, 18.3% de las empresas depositan sus residuos en México y corresponden a un total de 10,932 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$. En tanto que el 52.4% de las empresas generadoras no manifiestan el lugar de disposición de sus residuos, los cuales sumarían alrededor de 16,054 $\frac{\text{ton}}{\text{año}}$ ⁽³⁵⁾.

2.3 Algunos Casos de Manejo Inadecuado de Residuos Peligrosos en México.

La evaluación de los efectos en la salud de los residuos peligrosos en México no ha sido objeto de un estudio sistemático y no es posible determinar en la actualidad la magnitud del problema sino solo estimarlo o inferirlo a partir de los casos que han sido notificados por los medios de comunicación, a través de algunas publicaciones que analizan problemas particulares o con base en la información acerca de las condiciones que privan en el país en dicha materia.

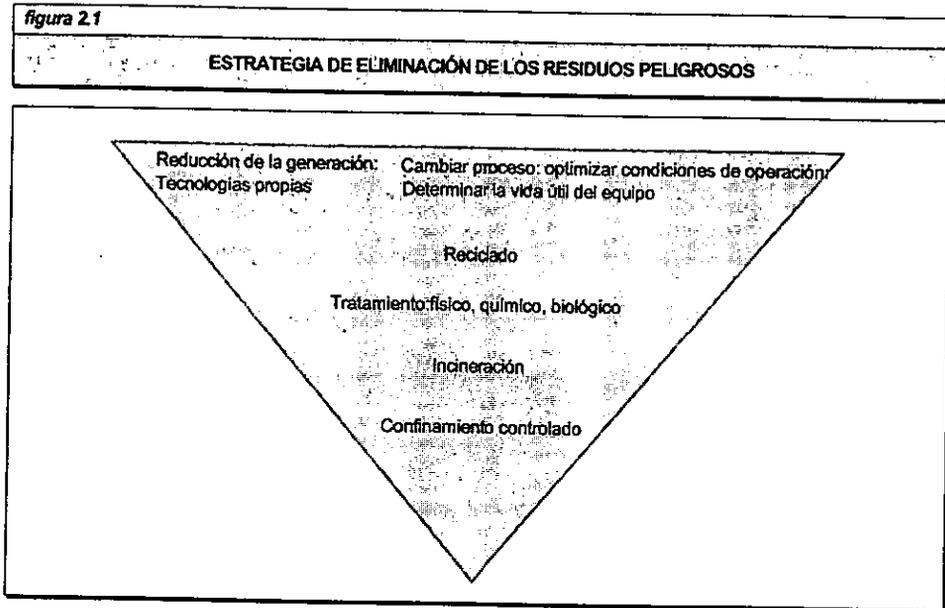
En el cuadro 2.4 se citan algunos ejemplos de manejo inadecuado de residuos peligrosos en México que han traído consigo la exposición de seres humanos y que ilustran el tipo de problemas que pueden suscitarse.

cuadro 2.4			
EXPOSICIÓN DE POBLACIONES A RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO POR SU DISPOSICIÓN INADECUADA			
AÑO	STMO	MATERIALES Y MEDIOS	EFFECTOS
1962	Torreón, Coahuila.	Escoria con arsénico, almacenada en los patios de una empresa metalúrgica.	Contaminación de suelos y agua de pozos cercanos. Intoxicación en la población aledaña.
1974 a 1977	Tultitlán, Estado de México.	Residuos de cromo almacenados a cielo abierto y descarga de aguas residuales con cromo, de una empresa productora de cromita.	Contaminación de suelos y agua en el poblado. Presencia de cromo en sangre de la población.
1984 a 1985	Tlalhepaná, Estado de México.	Residuos de la extracción de aceites vegetales, arrojados clandestinamente en un basurero municipal.	Quemaduras severas en niños y adultos.
	Diferentes.	Reciclado de baterías con plomo en locales familiares.	Intoxicación aguda y crónica por plomo en los miembros de las familias involucradas.
	Diferentes.	Reutilización de envases que contenían sustancias tóxicas (plaguicidas).	Intoxicación aguda en la población expuesta, principalmente campesinos.
1991	Córdoba, Ver.	Residuos de plaguicidas emitidos por la explosión de la empresa Anaversa.	Intoxicación aguda y efectos a mediano y largo plazo, como anemias agudas y cáncer.
1993	Zona fronteriza Tijuana, B. C. N.	Residuos de las maquiladoras y textiles.	Posibles pérdidas fetales y daños al desarrollo neurológico de los individuos en gestación.
1994	San José de Abajo, Ver.	Residuos de lubricantes industriales de los equipos de compresión del Ingenio Azucarero "San José de Abajo".	Intoxicación de la población de las riberas del Río Grande.

FUENTE: Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

2.4 Gestión de Residuos Peligrosos.

El enfoque estratégico adoptado para la gestión (también definido como manejo adecuado) de los residuos peligrosos aparece resumido en la figura 2.1.



FUENTE: Rivero Serrano, O. et al, *Los Residuos Peligrosos en México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

La estrategia de control de los residuos industriales en plantas nuevas se basa en la automatización de procesos limpios que reduzcan su generación. En la industria instalada antes de 1988 (año en que se publicó el reglamento) se ha promovido el reciclaje de los residuos, con el fin de reducir los volúmenes destinados a procesos de destrucción y disposición final. En el caso de los confinamientos, los residuos son sometidos a un proceso de estabilización para reducir sus efectos peligrosos. De esta manera se pretende garantizar un manejo tendiente a proteger el suelo, el subsuelo, los cuerpos de aguas superficiales y los mantos fráticos.

2.4.1 Capacidad Instalada para la Gestión.

Existen ocho confinamientos de residuos sólidos industriales, de los cuales uno es para residuos no peligrosos y siete para residuos peligrosos. Nuestro país cuenta con dos incineradores privados en operación, una empresa con equipos móviles para tratamiento de residuos peligrosos en el lugar; 17 plantas de tratamiento de residuos peligrosos y tres almacenamientos temporales⁽¹²⁾ (cuadros 2.5, 2.6 y 2.7).

cuadro 2.5	
EQUIPOS MÓVILES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL LUGAR ⁽⁴⁾	
EMPRESA	ACTIVIDAD
Grupo Ecológico Musa, S.A. de C.V.	Recuperación, procesamiento, limpieza de residuos y subproductos de petróleo

cuadro 2.6			
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES PELIGROSOS ⁽⁴⁾			
CANTIDAD	TIPO DE INSTALACIÓN	EMPRESA	LUGAR
7	Recicladora de solventes sucios.	Chemical Waste Management.	Baja California.
		Reind Química, S.A. de C.V.	Estado de México.
		Química Omega, S.A. de C.V (Mega Tank).	Tenango del Valle, Estado de México.
		Química Fortek.	Chihuahua, Chihuahua.
		Solventes San Martín.	La Laguna, Amozoc.
		Recuperadora Industrial de Residuos.	Hermosillo, Sonora.
		Química Wimer, S.A. de C.V.	Chalco, Estado de México.
6	Recicladoras de metales.	Acumuladores Mexicanos S.A. de C.V. (plomo)	Monterrey, Nuevo León.
		Huerra, S.A. de C.V (plomo).	Ascensión, Chihuahua.
		Metrometal, S.A. de C.V (plomo).	Reynosa, Tamaulipas.
		Zinc Nacional, S.A. (zinc).	Monterrey, Nuevo León.
		Maquiladora Russmet (aluminio).	Tijuana, Baja California.
		Aluminio Zinc Industrial (aluminio).	Tlalnepantla, Estado de México.
4	Recuperadoras de aceite.	Productos Texaco, S.A. de C.V.	Querétaro, Querétaro.
		Juan R. Santos Nieto.	Nicolás Romero, Estado de México.
		Novaceites, S.A. de C.V.	Monterrey, Nuevo León.
		Ecología y Lubricantes, S.A. de C.V.	Atizapán de Zaragoza, Estado de México.

cuadro 2.7		
ALMACENES TEMPORALES DE RESIDUOS PELIGROSOS ¹⁴		
EMPRESA	UBICACIÓN	ACTIVIDAD
Olimpia Industrial.	Ciudad Juárez, Chihuahua.	Recolección y almacenamiento.
Chemical Waste Management.	Carretera Guadalajara - El Castillo.	Transferencia de residuos peligrosos y compactación de tambores vacíos.
Química Omega S.A. de C.V.	Zapopan, Jalisco.	Recolección, transporte y almacenamiento temporal.

¹⁴ FUENTE: Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

2.5 Normas Oficiales Mexicanas sobre Residuos Peligrosos.

La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) aseguró la expedición de Normas Técnicas Ecológicas (NTE's) en las que se establezcan requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deben observarse en el desarrollo de las actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrios a los ecosistemas o al medio en general; y que además permitan uniformar principios, preceptos, políticas y estrategias de conservación y restauración de los recursos naturales. Por tal razón, para regular la gestión de los residuos peligrosos se publicaron siete NTE's entre 1988 y 1989, las cuales fueron derogadas y transformadas en Normas Oficiales Mexicanas (NOM) el 22 de octubre de 1993. En el cuadro 2.8 se sintetizan dichas normas.

cuadro 2.8	
NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS	
NOM-CRP-001/93	Establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-CRP-002/93	Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-CRP-003/93	Establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001/93.
NOM-CRP-004/93	Establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radiactivos.
NOM-CRP-005/93	Establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-CRP-006/93	Establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
NOM-CRP-007/93	Establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
FUENTE: Diario Oficial de la Federación; Octubre 22 de 1993.	

2.6 Políticas Internacionales sobre Movimiento Transfronterizo.

La Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y el Convenio de Basilea han sentado las bases internacionales para regular y controlar la transferencia de residuos peligrosos de un país a otro.

cuadro 2.9

VOLUMEN DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS EN ALGUNOS PAÍSES DE LA OCDE

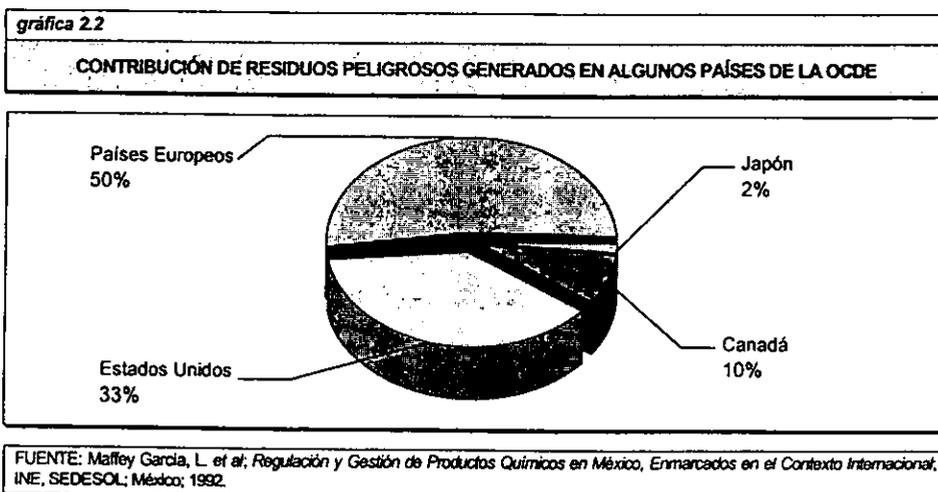
PAÍS	GENERACIÓN ANUAL (Millones de toneladas)	GENERACIÓN PERCÁPITA (kg/persona)
Alemania	4.5-5	80
Canadá	3.29	130
Dinamarca	0.06	12
Estados Unidos	264	1,150
Finlandia	0.09	18
Francia	2	38
Noruega	0.12	30
Países Bajos	0.28	20
Reino Unido	1.5	27
Suecia	0.52	63
Suiza	0.09	15

FUENTE: Maffey García, L. et al; *Regulación y Gestión de Productos Químicos en México, Enmarcados en el Contexto Internacional*; INE, SEDESOL; México: 1992.

Para dar una idea de la generación de residuos peligrosos por los países miembros de la OCDE, en el cuadro 2.9 se describen dichas cantidades. A principios de la década de 1980 se calculó en 100,000 el número de movimientos de residuos peligrosos entre países europeos, por una cantidad aproximada de 2.2 millones de toneladas y en más de 5,000 los realizados en América del Norte. A partir de la primera estimación, se determinó que más de un transporte de residuos peligrosos cruzó una frontera nacional en la región de la OCDE, cada cinco minutos, las 24 horas al día, los 365 días del año.

Cabe mencionar que recientemente se calculó que el comercio internacional de los residuos en la región de la OCDE equivale a más de 20 millones de dólares anuales, al cual los

países europeos contribuyeron con 50%, Estados Unidos con 33%, Canadá con 10% y Japón con 2%⁽³⁵⁾ (gráfica 2.2).



Asimismo, se estima que en 1990 alrededor de 1.9 millones de toneladas de residuos peligrosos cruzaron las fronteras de la OCDE para su manejo, la mitad de los cuales fueron destinados a operaciones de recuperación. Lo anterior explica las políticas de la OCDE en materia de movimientos transfronterizos y recuperación de residuos peligrosos (cuadro 2.10). En virtud de las diferencias de costo de los diversos métodos de disposición, es altamente probable que los residuos más peligrosos sean los que se exporten. Un análisis simple de los costos de catalogación, envasado, transporte e incineración de los residuos peligrosos en Europa permitió estimarlos en 75 $\frac{\text{dólares}}{\text{tonelada}}$. Se calculó que el ahorro que ocasiona el envío de 700,00 toneladas de residuos altamente peligrosos para su disposición final en otro país, sin regulaciones en materia o con costos bajos, podría equivaler a 52.5 millones de dólares⁽³⁵⁾.

Se ha destacado que ese monto sólo significa el 4% del costo total de la disposición de residuos peligrosos en Europa y que con esa práctica se evitan, también, los costos de limpieza y rehabilitación de áreas afectadas por dichos residuos, costo que es cerca de 100

veces mayor al de su disposición adecuada. Aún cuando los países cuenten con legislación en la materia, la definición de "residuo peligroso" suele variar de un país a otro. En consecuencia surge la propuesta de regular y controlar el movimiento transfronterizo y de armonizar, en lo posible las definiciones y clasificaciones de los residuos peligrosos.

Tal organización toma decisiones acerca de recomendaciones sobre el manejo de los residuos peligrosos de tal manera que se proteja a los seres humanos y al ambiente. Asimismo recomienda adoptar las medidas necesarias para que las autoridades controlen la generación, el transporte y la disposición final, además vigila el cumplimiento de las leyes y regulaciones en materia. Se pone énfasis especial en la necesidad de evitar movimientos transfronterizos que no cumplan con las leyes y regulaciones aplicables en los países receptores y de requerir que las instancias involucradas en el transporte y la disposición final de los residuos peligrosos estén autorizadas para ello.

cuadro 2.10

FACTORES QUE FAVORECEN EL MOVIMIENTO TRANSFRONTERIZO DE RESIDUOS PELIGROSOS.

- Incremento, en el país exportador, del rigor de la legislación y el control, así como de los precios por concepto de manejo de residuos.
- Acceso a países que no regulan los residuos peligrosos.
- Acceso a confinamientos legales baratos en otros países.
- Carencia en el país exportador de la tecnología requerida por la ley para el tratamiento de residuos.
- Empresas multinacionales que han invertido en una instalación para el tratamiento y disposición de residuos en un país dado y que envían ahí residuos de otros países.
- Existencia de tecnologías de punta baratas en el país importador, favorecidas por economías de escala al dar servicio a concentraciones industriales importantes.

FUENTE: Maffey García, L. et al; *Regulación y Gestión de Productos Químicos en México, Enmarcados en el Contexto Internacional*; INE, SEDESOL; México; 1992.

La preocupación por el movimiento transfronterizo y la disposición final de los residuos peligrosos llevó a establecer el Convenio de Basilea en 1989, el cual persigue los siguientes objetivos:

1. Asegurar que la generación de residuos peligrosos se reduzca al mínimo.
2. Disponer de los residuos peligrosos en el país en el que se generen, en la medida de lo posible.

3. Mejor control en importaciones y exportaciones.
4. Prohibir los embarques de residuos peligrosos hacia países que carezcan de capacidad legal, administrativa y técnica para mejorar y disponer de ellos de manera ambientalmente idónea.
5. Cooperar en el intercambio de información, transferencia tecnológica y armonización de normas, códigos y lineamientos.

El convenio de Basilea fue ratificado por 20 países (Arabia Saudita, Argentina, Australia, China, Checoslovaquia, El Salvador, Finlandia, Francia, Hungría, Jordania, Liechtenstein, México, Nigeria, Noruega, Panamá, Rumania, Siria, Suecia, Suiza y Uruguay) el cual entró en vigor el 5 de Mayo de 1992⁽¹²⁾.

Capítulo III

Alternativas Tecnológicas para la Administración de Residuos Peligrosos.

"Nada es más contrario a la curación que el cambiar frecuentemente de remedios."

Luis Anneo Séneca

(4 a. C. - 65 d. C.), filósofo, moralista y dramaturgo latino.

Las alternativas tecnológicas para administrar los residuos peligrosos pueden agruparse en tres grandes rubros:

1. Las que persiguen reducir su generación.
2. Las enfocados a disminuir su peligrosidad mediante diversos tratamientos.
3. Las empleadas para su disposición final.

3.1 Reducción.

Las medidas adoptadas para reducir el volumen de los residuos peligrosos comprenden cuatro tipos de acción:

1. Modificación de procesos.
2. Sustitución de productos.
3. Recuperación y reciclaje.
4. Segregación de la fuente.

De ellas, las dos primeras constituyen las mejores opciones, en la medida en que se reduce al máximo la generación de residuos en la fuente. La recuperación y el reciclaje, si bien, son recomendados, plantean problemas que se deben tomar en cuenta para realizar un manejo seguro de las sustancias tóxicas o peligrosas, debido a que algunas de éstas se podrían encontrar en mayor cantidad en los materiales a tratar, que en las etapas del proceso por el que fueron generadas.

3.1.1 Modificación de Procesos.

Es una de las áreas en las que ha ocurrido un número importante de innovaciones tecnológicas. Tales innovaciones se han traducido en procesos productivos más

eficientes, capaces de economizar energía y de aprovechar mejor las materias primas, así como de disminuir la generación de residuos peligrosos, reduciendo con ello los costos de manufactura. Ejemplo de ello es la obtención de vapor a partir de residuos industriales; la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a partir de desechos con alto contenido de azufre; y el cambio en los procesos de producción de polietileno a partir de óxido de etileno con el fin disminuir la cantidad de aguas residuales y el contenido de productos no degradables en ellas.

3.1.2 Sustitución de Productos.

Mediante ésta operación se busca reemplazar productos tóxicos o peligrosos por otros que aporten los mismos beneficios y cuyo manejo a lo largo de su ciclo de vida sea más seguro y respetuoso para el ambiente. Tal es lo que ha ocurrido al sustituir los bifenilos policlorados en los transformadores eléctricos por otros tipos de dieléctricos como ciertos aceites o incluso por aire.

3.1.3 Recuperación y Reciclaje.

Se trata de alternativas que, en general, no requieren de inversiones por parte de los generadores de residuos peligrosos debido a que son operaciones rentables en las que se emplean materiales de fácil separación y purificación. Se distinguen tres tipos:

- Reciclaje en la propia planta.
- Recuperación comercial fuera de la planta.
- Intercambio de materiales.

En este caso en particular, se recomienda que las empresas generadoras de residuos peligrosos y las encargadas de recuperación o reciclaje se instalen lo más cerca posible unas de las otras, con el fin de facilitar las operaciones.

3.1.4 Segregación en la Fuente.

Este método es uno de los más simples y económicos para disminuir el volumen de residuos peligrosos, ya que puede ponerse en práctica en el mismo sitio en que éstos se generan. El principio en el cual se basa es la prevención de la contaminación de grandes volúmenes de residuos industriales no tóxicos con residuos peligrosos y además se encargan del buen manejo y la adecuada disposición final de estos últimos. Estos métodos proporcionan beneficios importantes a las empresas, al disminuir las cantidades de residuos peligrosos y reducir los costos de su manejo. Esto ocurre, por ejemplo, cuando las empresas que requieren grandes cantidades de agua, separan las aguas de enfriamiento de las que contienen residuos químicos para recircularlas; en tanto que las segundas son sometidas a tratamiento, antes de ser descargadas a las aguas residuales.

3.2 Tratamiento de Residuos Peligrosos.

Entre las tecnologías disponibles para el tratamiento de los residuos peligrosos se encuentran: el tratamiento térmico (incineración o pirólisis), tratamiento biológico y tratamiento químico. Dichas tecnologías son aplicables a tipos particulares de residuos debido a que ninguna de ellas ofrece una seguridad absoluta y se recomienda establecer medidas de seguridad para reducir sus riesgos.

3.2.1 Tratamientos Térmicos.

Ofrece como ventajas que induce cambios permanentes en los residuos peligrosos; reduciendo su volumen considerablemente y permitiendo la recuperación de energía, ya que es posible obtener importantes cantidades de vapor a alta presión, a partir de lo cual se puede generar calor o electricidad. La incineración se lleva a cabo en presencia de oxígeno, en tanto que la pirólisis se realiza en ausencia de dicho elemento.

Los procesos de incineración producen bióxido de carbono, agua y cenizas inorgánicas, mientras que en la pirólisis se obtienen sustancias resultantes de la ruptura térmica de las moléculas iniciales y se requiere de equipo más especializado. En general, la incineración de líquidos es más fácil que la de sólidos y puede realizarse mediante diversos tipos de equipo, lo que no ocurre con los residuos sólidos.

cuadro 3.1

TIPOS DE PROCESOS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

·Incineración por inyección líquida.	·Incineradores de niveles múltiples.
·Hornos rotatorios.	·Combustores de cama fluidizada.
·Hornos de cemento.	·Incineración en alta mar.
·Calderas.	·Descomposición térmica.

3.2.2 Tratamientos Biológicos.

Son muy similares a los empleados en el tratamiento de aguas residuales y se aplican a residuos peligrosos cuya toxicidad no es letal para los microorganismos. Entre ellos destacan:

- Lodos activados.
- Lagunas de aereación.
- Filtros biocontactadores.
- Lagunas de estabilización.
- Digestores anaeróbicos.
- Esparcimiento en suelos agrícolas.
- Compostaje.

La biotecnología basada en el uso de microorganismos desarrollados selectivamente para degradar sustancias específicas se ha empleado con éxito en la industria de refinación y extracción del petróleo, química, farmacéutica, textil, de la pulpa y papel, etc.

3.2.3 Tratamientos Químicos.

Se basan en la modificación química de las propiedades de los residuos peligrosos; con lo cual las sustancias se convierten en menos tóxicas y su solubilidad en agua se reduce (cuadro 3.2).

cuadro 3.2
TRATAMIENTOS QUÍMICOS DE RESIDUOS PELIGROSOS
REDUCCIÓN DE CROMO (VI):
Se realiza con objeto de reducir el ácido crómico -material corrosivo y altamente tóxico- a cromo III se emplea metabisulfito de sodio.

cuadro 3.2 (continuación)**OXIDACIÓN CIANHÍDRICA:**

Consiste en el empleo de soluciones acuosas de hipoclorito de sodio o de cloro para oxidar cianuros (presentes en concentraciones de 2 a 40%) en sales residuales de tratamiento térmico; se convierten en cianatos y posteriormente en nitrógeno y dióxido de carbono.

PRECIPITACIÓN DE METALES PESADOS:

Se aplica a soluciones residuales que contienen metales pesados y se basa en el tratamiento con hidróxidos de sodio o calcio, para transformarlos en compuestos insolubles en agua; también pueden tratarse con sulfuro de sodio, tiourea o tiocarbonatos.

NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA:

Se emplea para tratar soluciones acuosas de ácidos minerales -provenientes de diversas industrias- con cal hidratada para neutralizarlas.

FUENTE: Becerra Albarrán, J. y Navarrete Rodríguez M.; *Recopilación, Aplicación y Evaluación de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación para el Tratamiento de Residuos Peligrosos*; Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Químicos, México; Enero de 1993.

3.3 Disposición Final.

Los materiales resultantes del tratamiento de los residuos peligrosos antes descritos, así como los residuos que puedan ser eliminados sin tratamiento previo de destoxificación han sido dispuestos en confinamientos tales como cementerios industriales, lagunas superficiales, pozos profundos, minas abandonadas o en el mar. Sin embargo, se admite hoy en día que no existe ningún método de confinamiento totalmente seguro y en todos los casos se requiere evaluar previamente los posibles impactos ambientales y seleccionar con propiedad los sitios para disponer de los residuos. A este respecto, debe tenerse cautela al seleccionar las opciones y al determinar el tipo de residuos, lo cual debe estar sujeto a la regulación y control dispuestos para cada una de ellas con el fin de prevenir riesgos.

3.3.1 Cementerios Industriales.

Se trata de confinamientos construidos bajo tierra, en celdas o zanjas recubiertas con cemento y materiales, para evitar que fluyan los líquidos (lixiviados) al subsuelo y que penetre la lluvia. En estos confinamientos, los residuos peligrosos se disponen a granel o en contenedores y se dejan escapar los gases que se forman a través de válvulas. Los lixiviados se recuperan mediante una serie de tuberías perforadas que se entierran en los puntos más bajos del cementerio, bombeándolos para evitar que se fuguen al entorno.

3.3.2 Lagunas Superficiales.

Este tipo de confinamiento es el menos adecuado, puesto que los residuos peligrosos se disponen en depresiones abiertas con o sin recubrimiento y presentan el riesgo entre otros, de que se evaporen las sustancias volátiles y que además se produzca el

fenómeno de lixiviación (la disolución de residuos solubles en agua por medio de la lluvia y mantos fráticos cercanos), por lo cual no es recomendado.

3.3.3 Inyección a Pozos Profundos.

Para este fin se han utilizado pozos abandonados (ya sea de mantos fráticos o petroleros que estén agotados) y cuyo fondo geológico consiste en formaciones apropiadas tales que constituyan una barrera natural para la contención de los residuos, aunque también se llegan a perforar pozos nuevos. Se emplean plantas de inyección especificadas para llevar los residuos hasta ellos, normalmente sin un tratamiento previo.

3.3.4 Minas Abandonadas.

Algunas minas no activas de sal o de hulla se llegan a emplear para enterrar residuos peligrosos que no conviene disponer en cementerios industriales o someter a tratamientos ya vistos. Las minas de sal presentan como ventajas que su porosidad es prácticamente inexistente, por lo que considerando el tamaño de los depósitos geológicos de sal (tema que se ampliará en el capítulo IV) se consideran una aceptable alternativa de confinamiento. A su vez, las minas de hulla pueden considerarse aceptables siempre y cuando no estén en cercanías peligrosas con mantos fráticos, pero debe asegurarse el cierre permanente de las minas y que los residuos que allí se depositen sean sólidos y estén envasados en recipientes herméticos, con el fin de que no exista la posibilidad de reacción entre los residuos y su entorno ecológico.

3.3.5 Tiraderos al Mar.

Mediante este mecanismo, solo pueden disponerse tipos particulares de residuos peligrosos, éstos están contenidos en listados que han sido incluidos en convenios

internacionales para regular este procedimiento. En tales convenios se especifica que no pueden ser depositados al mar derivados organohalogenados y organosalicílicos, mercurio o sus derivados, cadmio, residuos carcinógenos o plásticos que puedan interferir con la pesca o la navegación.

3.3.6 Caso Especial: Disposición de Residuos de Plaguicidas.

Cada año, en todo el mundo se utilizan al menos dos millones de toneladas de plaguicidas para controlar las plagas y la diseminación de algunas enfermedades infecciosas. Estos residuos se generan en la producción y formulación de plaguicidas y por arrastre de las aguas de riego en la agricultura. La cantidad de plaguicidas utilizados es tal que en la actualidad existen gran diversidad de estos compuestos y de sus formulaciones. Además, muchos de estos productos por razones erivadas de nuevas legislaciones, no pueden seguir empleándose y se convierten de inmediato en residuos peligrosos, debido a su elevada toxicidad y persistencia.

Paralelamente, aumenta también el problema de la disposición adecuada de los residuos, lo que incluye envases utilizados para su comercialización, uso y la acumulación de todo tipo de material contaminado por estos plaguicidas (suelos, productos, ropas, etc.). Se estima que la cantidad de personas que sufren intoxicaciones en el planeta por exposición a los plaguicidas llega a ser de 1.5 millones por año y de ésta cifra 20,000 casos aproximadamente, son fatales⁽¹²⁾.

Desde el inicio de la utilización masiva de los plaguicidas en la agricultura se reconoció su gran potencialidad tóxica para el humano. Tan es así que la Organización Mundial de la Salud (OMS) los clasifica con diferentes grados de peligrosidad, con base en el factor definido como Dangerous to Life and Health (Peligroso para la Vida y la Salud): DLH_{50} $\left(\frac{\text{mg de plaguicida}}{50 \text{ l H}_2\text{O}} \right)$ ⁽¹²⁾. Con esta magnitud se nos advierte cuánto de este plaguicida es el máximo permisible para no afectar la salud o la vida de un ser humano adulto, en

función también del modo de segregación al organismo. En el cuadro 3.3 se citan algunos ejemplos de los métodos de disposición de algunos plaguicidas comunes.

cuadro 3.3
ALGUNOS MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS COMUNES

NOMBRE COMÚN / NOMBRE QUÍMICO	DL ₅₀ ORAL	CLASIFICACIÓN DE TOXICIDAD DE LA OMS	OPCIONES DE TRATAMIENTO / DISPOSICIÓN	COMENTARIO AMBIENTAL
-------------------------------	-----------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	----------------------

FUNGICIDA

Benomilo metil-1-(butil-carbamol)-2-bencimidazole- carbamato	10,000	Peligro poco probable.	Tratamiento en suelos (aerobio), relleno sanitario.	
Maneb (EDCB) etileno de magnesio bisditiocarbamato	6,750	Peligro poco probable.	Tratamiento en suelos (aerobio), relleno sanitario, incineración a altas temperaturas.	Si está húmedo puede encenderse espontáneamente.

HERBICIDA

Atrazina 2-cloro-4-etil-amino-6-isopropilamino	2,000	Peligro poco probable.	Tratamiento en suelos (aerobio), relleno sanitario, incineración a altas temperaturas.	Contaminante de aguas freáticas.
Diurón 3-(3,4 dlorofeno)-1,1-dimetilurea	3,400	Peligro agudo poco probable.	Tratamiento en suelos.	Sin efecto carcinógeno.

INSECTICIDA

Aldicarb oxima de 2-metil-2(metil) propionaldehido o-(metilcarbamoilo)	0.93	Excesivamente tóxico.	Tratamiento en suelos (aerobio), relleno sanitario, incineración.	Contaminante de aguas freáticas.
Deltametrina	135	Moderadamente tóxico.	No se dispone de información.	Alta toxicidad acuática.

RODENTICIDA

Cumador 3-(alfa-acetonil-P-clorobencil-4-hidroxil)	33	Sumamente tóxico.	Incineración a altas temperaturas.	
Fosfuro de zinc	45	Sumamente tóxico.	Tratamiento en suelos (anaerobio).	

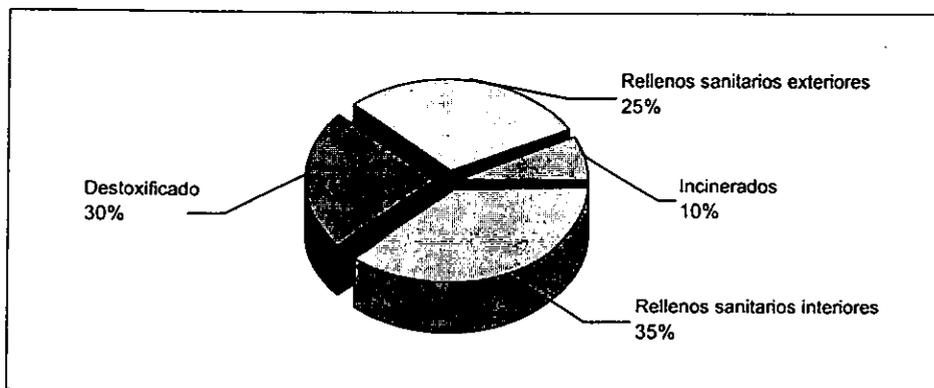
FUENTE: Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.

3.4 Confinamiento de Residuos Peligrosos en Domos Salinos.

Como un caso especial, se encuentra como alternativa tecnológica para la disposición final de residuos peligrosos el confinamiento de éstos en cavernas lixiviadas en domos salinos. Esta tecnología surge en Europa y más específicamente, en Alemania, al estudiarse una serie de características que proporcionaban ventajas técnicas y económicas sobre los demás sistemas de confinamiento y disposición final. Históricamente se sabe que en 1941, al aumentar el número de ataques aéreos sobre el territorio del Reich durante la II Guerra Mundial, Adolf Hitler ordenó que la mayor parte de los tesoros de arte saqueados durante sus invasiones a Francia, Holanda, Bélgica, Checoslovaquia, etc., se almacenaran en los túneles de las minas de sal de Alt-Ausse, al este de Salzburgo⁽¹¹⁾.

gráfica 3.1

DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS EN ALEMANIA EN 1983



FUENTE: Schneider, H. J. and Bishop, W.; *Safe, Zero Migration Ultimate Disposal of Solid Hazardous Waste in Salt Caverns*; Presented at the Second International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management; 1987.

De acuerdo con los datos reportados por el Ministro Federal Germano del Interior, para el año de 1983, la entonces República Federal Alemana producía un volumen de 5 millones de toneladas anuales de desechos peligrosos, el cual un 10% eran incinerados, el 25% era

exportado a rellenos sanitarios exteriores generalmente, el 30% era destoxificado y el 35% eran llevados a rellenos sanitarios interiores (gráfica 3.1).

Por los problemas generados de los rellenos sanitarios, se empezaron a utilizar los domos salinos, ya que en contraste con los conceptos de rellenos sanitarios, los depósitos subterráneos en el interior de las formaciones salinas son basadas en la geología natural de la Tierra, las cuales con su impermeabilidad natural y su distancia de los acuíferos aseguran el aislamiento efectivo de los desechos con la biosfera. Así, los desechos altamente tóxicos y no incinerables en Alemania son comúnmente puestos en el depósito salino de la mina Herfa Neurode. Existen otras instalaciones de este tipo, sobre todo en E. U., como la de el domo de Dayton en Texas, o el lecho salino WIPP en el Sitio, Nuevo México, donde además de residuos peligrosos se almacenan también residuos radiactivos.

Capítulo IV

Generalidades Acerca de los Domos Salinos.

"En la naturaleza nada hay superfluo."

Averroes

(1126-1198), filósofo hispano-árabe.

4.1 Origen y Características de los Domos Salinos.

Los domos salinos son grandes estructuras subterráneas de sal sólida, con cubiertas de una profundidad de 100 m bajo la superficie de la tierra y que se extienden hasta 15,000 m bajo la superficie. Sus radios van desde uno hasta varios kilómetros. Los domos salinos a lo largo de la Costa del Golfo tienen una formación tan reciente como de 60,000,000 años, con algunos domos de cien millones de años de antigüedad^(21 y 36). Tales estructuras se encuentran entre las más estables de todos los sistemas geológicos.

Un domo salino se define también como un cuerpo vertical de sal de sección circular o de forma globular como se muestra en la figura 4.1. De acuerdo con la definición anterior son muy pocas las estructuras que dentro de los límites de la cuenca del Istmo en el Golfo de México reúnen estas condiciones⁽²¹⁾, por lo que los geólogos han denominado el nombre genérico de "estructuras salinas" para este tipo de sistemas. Pero para los requerimientos específicos de los objetivos de este trabajo, serán denominadas las "estructuras salinas" como "domos salinos".

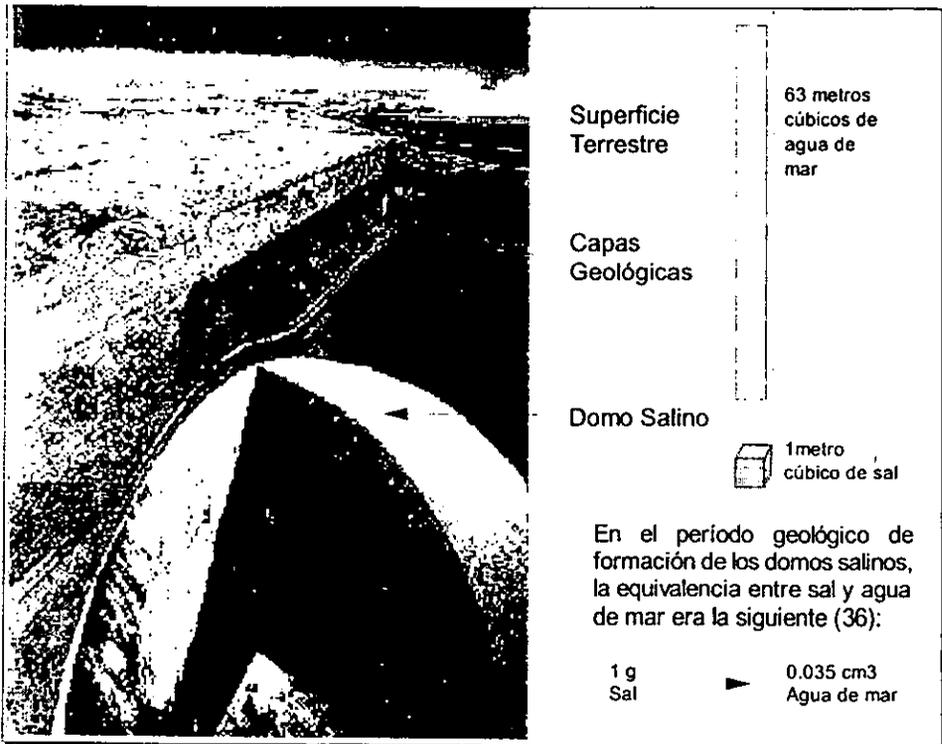
Para la formación de estos enormes cuerpos de sal se requirieron de extensas superficies de evaporación (llamadas comúnmente "vasos", por ser depresiones en el terreno que se encuentran); estos "vasos" fueron llenados continua o intermitentemente por las aguas de los océanos, de donde posteriormente al evaporarse una gran cantidad de agua, se precipitaron y depositaron las sales sobresaturadas que consisten en cloruros (siendo el cloruro de sodio -NaCl- la de mucho mayor proporción que cualquier otra sal), sulfatos y carbonatos, en orden inverso a su solubilidad y directo a su concentración (a cada período de ocurrencia de lo anterior, se le llama "transgresión").

Las sales que se aportaron para la formación de un metro cúbico del volumen de un domo salino, de acuerdo al cálculo con el dato presentado en la figura 4.1, provienen de una cantidad de agua de mar equivalente a un paralelepípedo de 1 m² de base y 63 m de altura⁽³⁶⁾. El comportamiento plástico de la sal permitió el desplazamiento de ésta a lugares

con la mayor facilidad de "flujo" del macizo salino. De tal manera, el sistema geológico salino tomó una forma dómica, al ser inyectada (por la presión "litostática", que es definida como la presión de las capas geológicas terrestres de acuerdo a la profundidad) hacia arriba.

figura 4.1

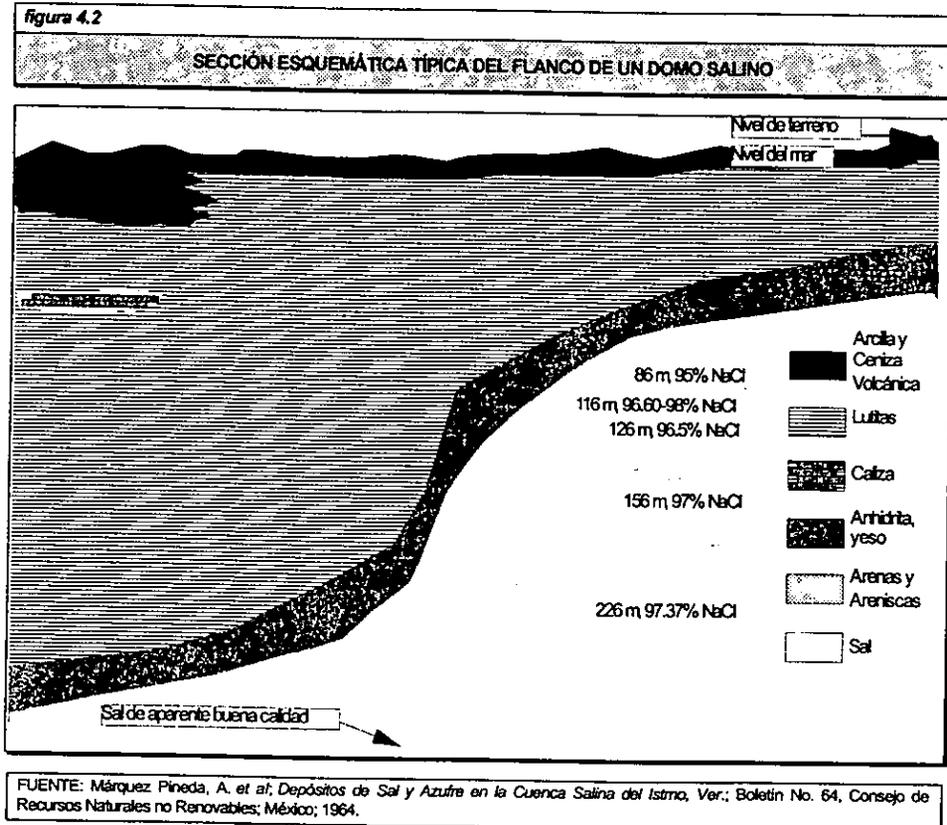
CORTE ESQUEMÁTICO DE UN DOMO SALINO Y EQUIVALENCIA DE AGUA DE MAR Y SAL



FUENTE: Márquez Pineda, A. et al, *Depósitos de Sal y Azufre en la Cuenca Salina del Istmo, Ver.*; Boletín No. 64, Consejo de Recursos Naturales no Renovables; México; 1964.

Este hecho es aceptado por haber encontrado dentro de cuerpo de la sal intercalaciones de areniscas de grano fino y otros minerales (lutitas) con pequeños porcentajes de anhídrido y yeso (figura 4.2). La casi total ausencia de verdaderos domos salinos en la cuenca, quizá se deba a que durante los periodos subsecuentes a la solidificación de la sal no se hayan depositado sedimentos de fuerte constitución que por su peso hubieran ejercido mayor

presión sobre la sal, provocando con ello las rupturas correspondientes para formar los domos salinos⁽³⁶⁾.



Existen otros factores que intervienen en el movimiento ascendente de la sal y que probablemente no fueron los ideales para la formación de verdaderos domos, como la resistencia o viscosidad de la sal, composición, características y espesor de la capa original, resistencia a la fractura de las rocas que la cubren y contenido de agua en las capas de sal y en las rocas adyacentes. Las intrusiones salinas en el Istmo han jugado un papel importante en la geología y tectónica regional, como lo demuestran los resultados obtenidos por las compañías que han efectuado perforaciones en la zona, mediante las cuales han corroborado la presencia de fallas asociadas a los domos salinos, generalmente de tipo

normal, producidas por el asentamiento y reacomodo de los bloques provocados por el movimiento ascendente de la sal, ocasionando además la distorsión de los planos de estratificación lo que dificulta la interpretación geológica del subsuelo. En general, la sal en el Istmo está bien consolidada y sólo ocasionalmente es cavernosa, alojando a veces hidrocarburos (gas). La sal, cuando pura, es de color blanco, pero se encuentran de colores anaranjado, rosado, violeta y morado debido a diversas impurezas, siendo los hidrocarburos los causantes de un color gris oscuro o negro⁽²¹⁾.

4.1.1 Propiedades Generales de la Sal.

La palabra sal es derivada del latín *sal* y junto con el nombre de halita es derivado del griego *hals* que significa mar. Se le conoce con algunos nombres específicos como halita, sal de roca, sal gema, sal fósil, etc.

Composición.

Químicamente pura tiene las siguientes proporciones: Na 39.4% y Cl 60.6%; pero en la naturaleza nunca es encontrada así, aunque algunos análisis llegan al 99.9% en el contenido de NaCl, los análisis promedio de grandes cantidades de sal minada, raramente pasan de 98%, presentándose como impurezas insolubles más comunes anhidrita, dolomita, yeso, calcita, piritita, cuarzo y óxidos de hierro, e impurezas solubles en forma de iones de Ca, Mg, C, Cl, CO₃ y SO₄.

Inclusión.

Las inclusiones líquidas en la sal son comunes, éstas representan comúnmente salmueras atrapadas durante el proceso de cristalización.

Cristalización.

Cristaliza en el sistema cúbico perfecto.

Fractura.

Debido a la perfección del crucero, los fragmentos son usualmente originados por los planos de crucero.

Plasticidad.

Bajo condiciones de presión sufre deformaciones plásticas, principalmente las debidas a presiones aplicadas lentamente que producen cambios de forma sin llegar a la ruptura.

Peso Específico.

2.120-2.204

Lustre y Transparencia.

Tiene lustre vítreo y es transparente a traslúcido.

Permeabilidad.

Ésta es una de las propiedades más importantes de la sal en el análisis y desarrollo de este trabajo. Cualitativamente se puede afirmar que la sal "pura" es impermeable, tanto para sistemas líquidos como gaseosos.

Color.

Cuando es pura es incolora, pero generalmente se encuentra de colores blanco, amarillento, pardo, rojo, rosado, verde, violeta, púrpura, azul, anaranjado, gris y negro, dependiendo esto de la naturaleza de las impurezas.

Formas de Presentación.

Comercialmente la sal se obtiene de todas las fuentes que a continuación se mencionan, pero las más importantes por su pureza, cantidad y explotación económica son las obtenidas de las estructuras salinas y evaporación de aguas subterráneas.

En la naturaleza se presenta en las siguientes formas:

Sal en Solución.

- a). Agua de los océanos.
- b). Agua de los lagos.
- c). Agua subterránea.

Sal en Rocas

- a). Depósitos de playa.
- b). Depósitos estratificados o tabulares.
- c). Estructuras salinas (domos, anticlinales, etc.).

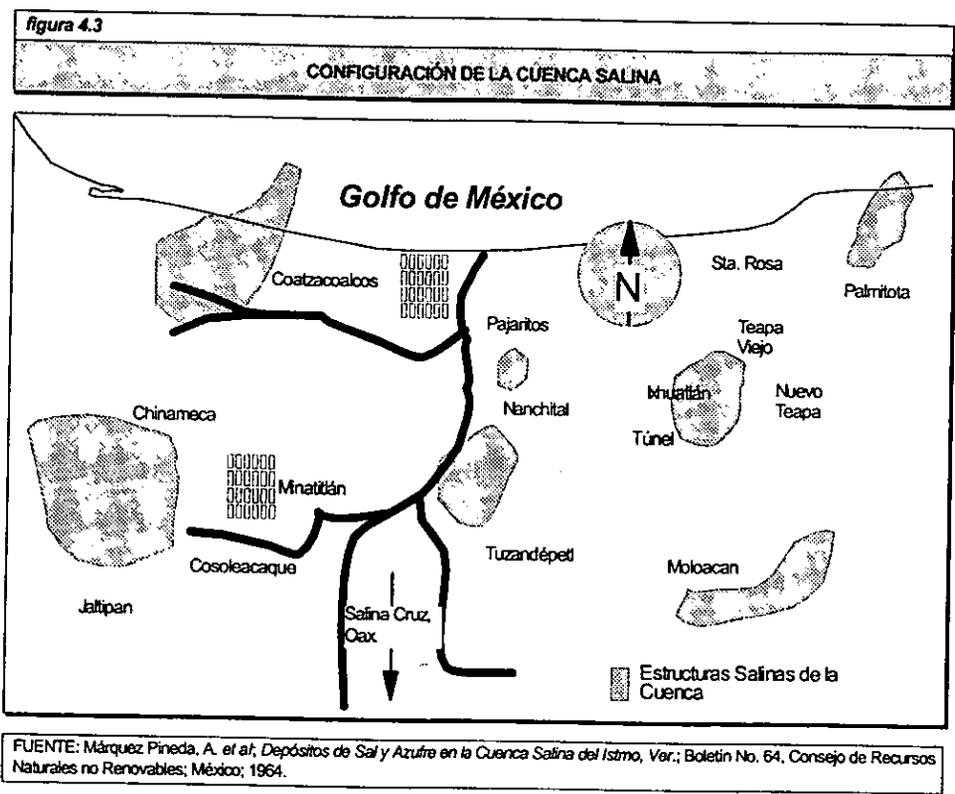
Usos.

La sal tiene un gran número de aplicaciones tan específicas y diversas que la convierten en una materia prima de gran importancia para la industria. Se usa directa o indirectamente en la obtención de:

- *Carbonato de sodio.* Pasta de dientes, cosméticos, cerámica y vidrio.
- *Silicato de sodio.* Jabones, adhesivos, catalizadores.
- *Cloro.* Papel, purificación de agua.
- *HCl.* Procesos metalúrgicos, acidificación de pozos petroleros o azufreros, procesos industriales.
- *NaOH.* Fibras sintéticas, películas de celulosa, refinación del petróleo, refinación de aceites vegetales, aditivo en el hule.
- *Sodio.* Detergente, agente deshidratador, explosivos y jabones.
- *CaCl.* Refrigerante, anticongelante en el carbón y en el concreto, cementación en calizas y plásticos.
- *NaNO₃.* Pirotecnia, fertilizante, explosivos y vidrio.
- *Bisulfato de sodio.* Lavado de textiles, limpiador de porcelana, industria metalúrgica.
- *Clorato de sodio.* Pirotecnia, cerillos, explosivos.
- *Cianuro de sodio.* Extracción de metales, acondicionadores de suelos, plásticos.

4.2 Localización de Domos Salinos en México.

La Costa del Golfo de México, forma parte de una de las provincias salinas más importantes del mundo, la cual abarca también varios estados de los E. U. y parte del Caribe. En la República Mexicana existen estructuras salinas en diferentes lugares, tales como Coahuila, Monterrey, Chihuahua y principalmente en la cuenca salina de Tehuantepec. Esta cuenca abarca los estados de Veracruz y parte de Tabasco⁽³⁶⁾ (en una porción de la plataforma marítima).

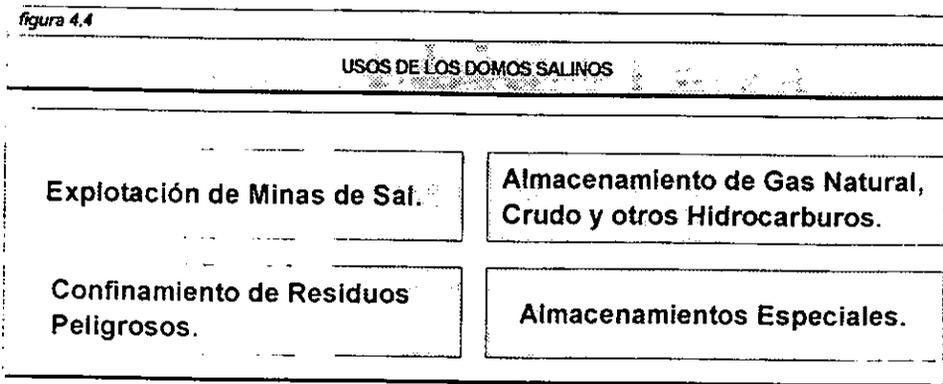


Una de las regiones salinas más importantes es entonces, la que se encuentra en el estado de Veracruz, delimitada de Norte a Sur por el río Coatzacoalcos y ésta es un área donde el manto salino tiene poca profundidad donde existen varios domos y terrazas de sal de buena

calidad. Ésta área salina se extiende en una vasta región alrededor de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz y comprende diversas estructuras salinas. Tal es el caso de los domos de Moloacan, Ixhuatlán, Túnel, Nuevo Teapa, Teapa Viejo, Santa Rosa, Pajaritos El Plan, Los Soldados y Tuzandépetl, todos ellos en el Estado de Veracruz. Otras masas salinas se encuentran un tanto aisladas de los centros de población como es el caso de los domos de Salsomera, Jaltipan y Chinameca⁽³⁶⁾ (figura 4.3).

4.3 Usos de los Domos Salinos.

El primer uso dado a estas formaciones salinas era la explotación de minas de sal. Pero el estudio de las características de estos cuerpos geológicos llevó a algunos investigadores a idear algunos usos para las estructuras de sal (figura 4.4) como lugares de confinamiento de algunos compuestos especiales. Por ejemplo, en Inglaterra, Francia, Alemania, Finlandia y Estados Unidos se tienen sistemas de almacenamiento en domos salinos para crudo y gas natural⁽¹⁾.

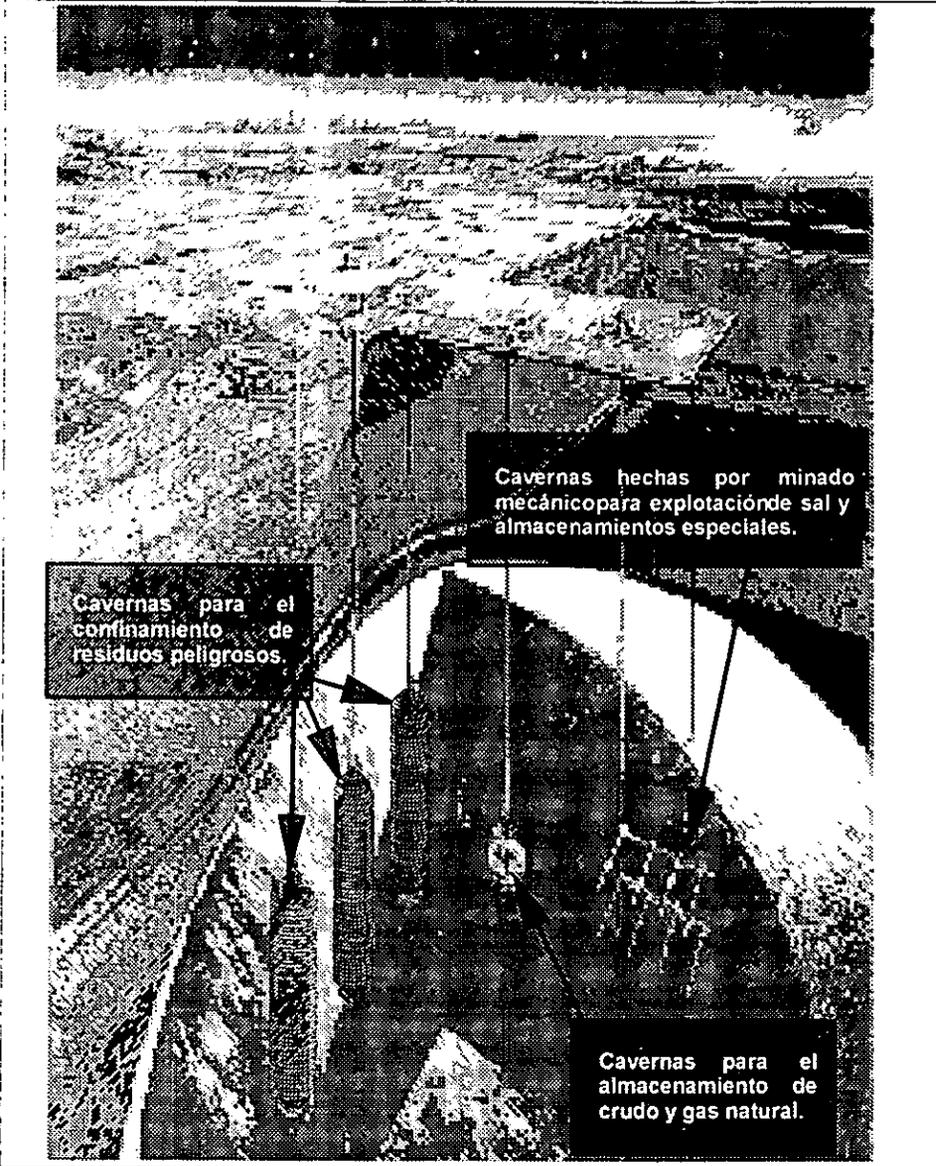


Actualmente, existen 2,000 cavernas en uso en el mundo, con más de 1,000 en los Estados Unidos y algunas más en México. Las cavernas salinas de solución minera en los Estados Unidos se utilizan para el almacenamiento de gas natural y otros productos petroquímicos, así como para los más de 750 millones de barriles de petróleo crudo que comprende la Reserva Estratégica de Petróleo de los Estados Unidos⁽¹⁾.

PEMEX también proyectó utilizar cavernas salinas para almacenar petróleo en sus instalaciones de Tuzandépetl, Veracruz. Hoy en día, la gran mayoría de almacenamientos en cavernas salinas se realiza para productos petroquímicos (incluyendo gases a presiones arriba de 250 bar) y en la mayoría de los casos se trata de sustancias volátiles. En más de cuarenta años de uso de las cavernas de domos salinos, nunca ha habido fallas en la sal⁽⁴⁾.

figura 4.5

USOS DE LOS DOMOS SALINOS



En los Estados Unidos, el lodo de perforación (residuos de las perforaciones de explotación de crudo) se confina actualmente en cavernas de domo salino. Sin embargo, éste no está todavía legalmente definido como "peligroso", aunque en realidad lo es. En 1990, el Departamento de Energía de los Estados Unidos recibió una "Variación de No Migración" de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, por sus siglas en inglés), para almacenar desechos peligrosos y radiactivos en camas salinas subterráneas, en una instalación cerca de Carlsbad, Nuevo México. Este permiso (que tuvo posteriores revisiones en 1992) sólo es otorgado cuando la EPA considera que los residuos no migrarán al menos en 10,000 años⁽²³⁾.

La prueba más impresionante de la fuerza de la sal subterránea fue la detonación de dos mecanismos nucleares de 5 kilotoneladas en un domo salino de Mississippi, en 1964. La explosión no alteró la integridad del domo y sólo aumentó el tamaño de la caverna a 15 m. Hasta la fecha no se ha producido ninguna filtración desde la caverna^(9 y 44).

4.3.1 Uso para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.

El concepto de confinamiento de residuos peligrosos surge en Alemania hace más de una década, como una solución a los problemas de contaminación y generación de residuos industriales. La utilización de estos sistemas se derivó completamente de la tecnología utilizada para la formación de cavernas lixiviadas dentro del domo salino para el confinamiento de gas natural e hidrocarburos.

La sal es un medio receptor ideal para almacenar los desechos peligrosos, ya que es un sólido semiplástico, prácticamente impermeable. Esto evita la migración de los líquidos, más notablemente de las aguas de pozo, a o fuera de las cavernas salinas de solución minera. En los confinamientos que se han desarrollado se especifica un mínimo de 180 m de sal sólida en todas las direcciones entre las cavernas y las camas de piedras alrededor del domo salino. En comparación, un campo a la intemperie (un cementerio

industrial típico) depende de un fondo de arcilla compactado de 1.5 m (que es 200 mil millones de veces más permeable que la sal), más dos forros artificiales⁽³³⁾ (que son 200 millones de veces más permeables que la sal). La sal no es susceptible a la degradación por procesos químicos en temperaturas naturales. Ya que los domos salinos están bajo una gran presión externa, sellan (proceso conocido como "curar") de una manera natural cualquier fractura en la sal. En una presión baja, la sal se "arrastrará" lentamente, llenando espacios vacíos entre las paredes de la caverna y el desecho depositado, "confinando" así el residuo.

Al utilizarse este tipo de confinamientos, tanto en Alemania, como en otros países (tales como Estados Unidos, Francia, etc.), se mostraron tres grandes ventajas en este tipo de instalaciones: las técnicas, estratégicas y económicas. Entre las ventajas técnicas se pueden señalar las siguientes: seguridad por las mínimas posibilidades de evaporación por estar confinado y situado en promedio a 500 m bajo la superficie, lo que impide el desprendimiento de gases, protección al medio ambiente por ser subterráneo, instalaciones superficiales de manejo de fluidos mínimas; la capacidad para el depósito de residuos tóxicos (y también para el almacenamiento de hidrocarburos) estará limitada por la extensión de la estructura del domo salino. De las estratégicas podemos mencionar: riesgos mínimos y a salvo de cualquier contingencia superficial desfavorable (ya sea climáticas, o causadas por la actividad humana), lo cual garantiza seguridad para todo tipo de confinamiento.

En cuanto a lo económico, cabe señalar que; en la operación y mantenimiento del sistema el costo es mínimo, ya que se limita solamente a las instalaciones superficiales, en la construcción a mayor capacidad el costo unitario es menor. Es decir, si se quiere formar otra cavidad minada en el domo salino, se usa la misma infraestructura que para la o las primeras cavidades. Fundamentalmente se considera que este tipo de instalaciones proporcionan servicio a las grandes industrias (que también son las grandes responsables en el problema de la generación de residuos peligrosos), ya que

existe una demanda importante de instalaciones de confinamiento adecuadas por parte de estas industrias.

La demanda esta motivada por: una creciente conciencia pública acerca de las consecuencias de una eliminación inadecuada, una inevitable y estricta presión del gobierno, la necesidad de buenas relaciones públicas y experiencias con limpiezas costosas, que se han requerido en otros países por métodos de eliminación inadecuados. Las experiencias exitosas para eliminar los desechos peligrosos y radiactivos en formaciones salinas, las deficiencias comprobadas de los campos al aire libre y la tecnología de incineración, así como la disponibilidad de numerosos domos salinos pone a México en una posición ventajosa para la aplicación de esta tecnología. Pero desde el punto de vista normativo, se habrán de hacer los análisis correspondientes para testificar la seguridad de un confinamiento de este tipo.

Capítulo V

Tópicos Sobre las Cavernas en los Domos Salinos para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.

*"La imaginación es generosa y desprendida;
la inteligencia calcula y se aferra a lo que
sea."*

Julio Cerón

(nacido en 1928), escritor español.

La presente sección incluye lineamientos para cavemas en domos salinos que serán usadas para la disposición de residuos peligrosos solidificados. Esta es una "pequeña lista" de requerimientos y puntos dominantes para la selección del domo salino, así también en dónde y cómo se deberán crear las cavemas dentro de la estructura salina de acuerdo a sus características y los requerimientos del proyecto. Finalmente, se mencionarán las especificaciones generales y capacidad de un confinamiento típico.

5.1 Localización Estratégica del Domo Salino para el Depósito de Residuos Peligrosos.

Las formaciones salinas cumplen con varias expectativas que las hacen el candidato principal para el confinamiento de residuos peligrosos. Y después de estudiar la viabilidad de un proyecto de este tipo, el siguiente paso es saber dónde se van a localizar las instalaciones del mismo. Las instalaciones para el confinamiento de residuos deberán localizarse estratégicamente para poder recibir los desechos, ya sea de una sola industria, o de todo un corredor o parque industrial. Esto con el fin de reducir costos en transporte y mantener un adecuado desplazamiento de estos residuos. Además, se deben considerar también las instalaciones superficiales para el pretratamiento de los residuos peligrosos. A continuación también se establecen algunos de los lineamientos generales para la localización del domo factible para el sistema de confinamiento^(1, 2, 3, 7, 15, 26, 29, 41 y 56).

- Geohidrogeología, topografía, clima y efluentes acuosos locales y regionales del sitio (sobre todo cercanías peligrosas a mantos freáticos, a ambientes sensitivos a la humedad o al agua, condiciones locales de intemperie, ríos para usar el agua en la lixiviación de cavemas, etc.).
- Proximidad a áreas pobladas y caminos de uso público frecuente, a otras industrias o instalaciones de operaciones riesgosas, a otras actividades subterráneas tales como almacenamientos vecinos, o cavemas de salmuera o pozos de producción de hidrocarburos.
- Manejo y disposición de la salmuera generada de la formación de las cavemas salinas.
- Acceso rápido a respuestas de emergencia para instalaciones superficiales (bomberos, etc.).

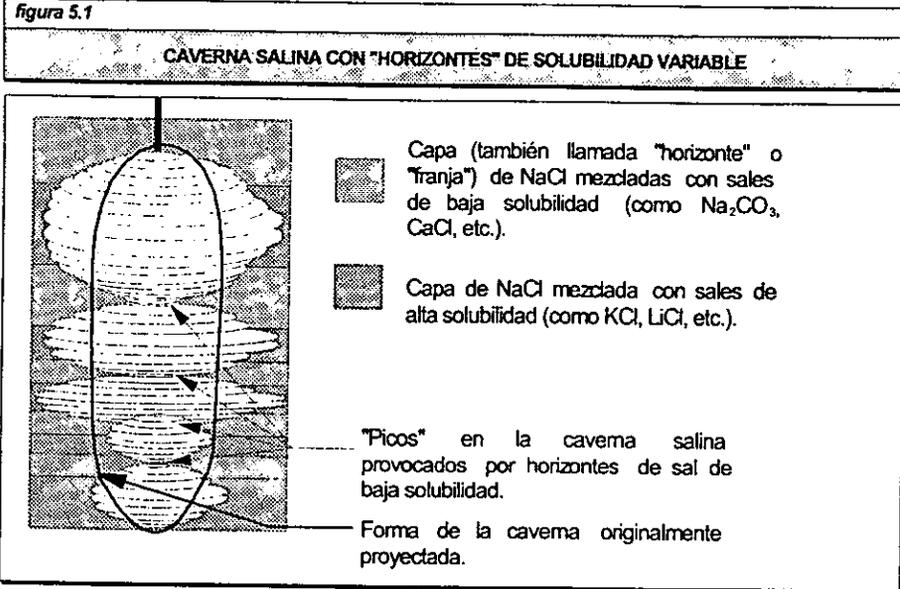
5.2 Criterios de Selección del Lugar de Ubicación para la Creación de las Cavernas en un Domo Salino.

Los criterios principales para la creación de cavernas en un domo salino se especifican en este apartado, desde el punto de vista de la seguridad requerida ante la aplicación de una tecnología determinada al confinamiento de residuos peligrosos.

5.2.1 Características Geológicas.

El lugar de creación de la caverna lixiviada requiere de ciertas características geológicas de la estructura salina, tales como un espesor suficientemente grande, una extensión por arriba de los 2,000 m y si se quiere un control bastante estricto sobre la forma de la caverna lixiviada, la sal deberá tener una composición relativamente pura. De esta manera, pueden establecerse los puntos principales como son^(1, 2 y 3):

- Las cavernas deben estar ubicadas a una profundidad mínima de 460 m (1,500 ft), de acuerdo a la normatividad vigente.
- Debe existir una cubierta de sal de por lo menos 91 m (300 ft) entre las cavernas y los límites del domo salino, en cualquier dirección.
- Los estudios de los lugares de ubicación deben incluir las investigaciones de cualquier actividad minera previa; las áreas de azufre y/o explotación de salmuera deben tomarse en cuenta.
- Si durante la explotación minera de cavernas se encuentra (con un análisis riguroso de la composición del domo salino) o se sospecha la existencia de sales de alta solubilidad (de potasio, de litio, etc.) o de baja solubilidad (como los carbonatos de calcio, de sodio), se deberán tomarse medidas de precaución especiales. Una disolución excesiva o un estrechamiento (ver figura 5.1) puede requerir que las cavernas se reubiquen lejos de lugares problemáticos ya sea situando las cavernas en otra parte del domo, o crearlas a mayor profundidad (a mayor profundidad, la sal es más uniforme).
- Las cavernas deben ubicarse de manera que sean cubiertos todos los requisitos ambientales y de seguridad que sean aplicables.



De acuerdo al análisis y estudio realizado con los puntos anteriores, se establece el lugar adecuado para formar la caverna salina. Y considerando el tamaño del domo salino también se proyectan el número de cavernas que podrán ser formadas en la misma estructura. Tal proyección está también en función de las dimensiones de las cavernas salinas. Pero las especificaciones de espaciamiento entre las cavernas se verán más adelante.

5.2.2 Cubierta de Sal y Espaciamiento de las Cavernas.

En ocasiones resulta difícil definir de manera precisa la superficie de reservas salinas, especialmente si la superficie es irregular y está bajo roca de cubierta. Es aconsejable ubicar las cavernas de almacenamiento en reservas, de manera que se asegure la existencia de una "cubierta de sal" alrededor de ellas. La "capa" superficial también debe ubicarse a una distancia adecuada, en la reserva salina de manera que haya una

cubierta de sal impermeable sobre las cavernas. Un grosor utilizado normalmente en las cavernas de almacenamiento de hidrocarburos de los domos de la Costa del Golfo es de 91.4 m⁽⁴⁴⁾ (300 ft).

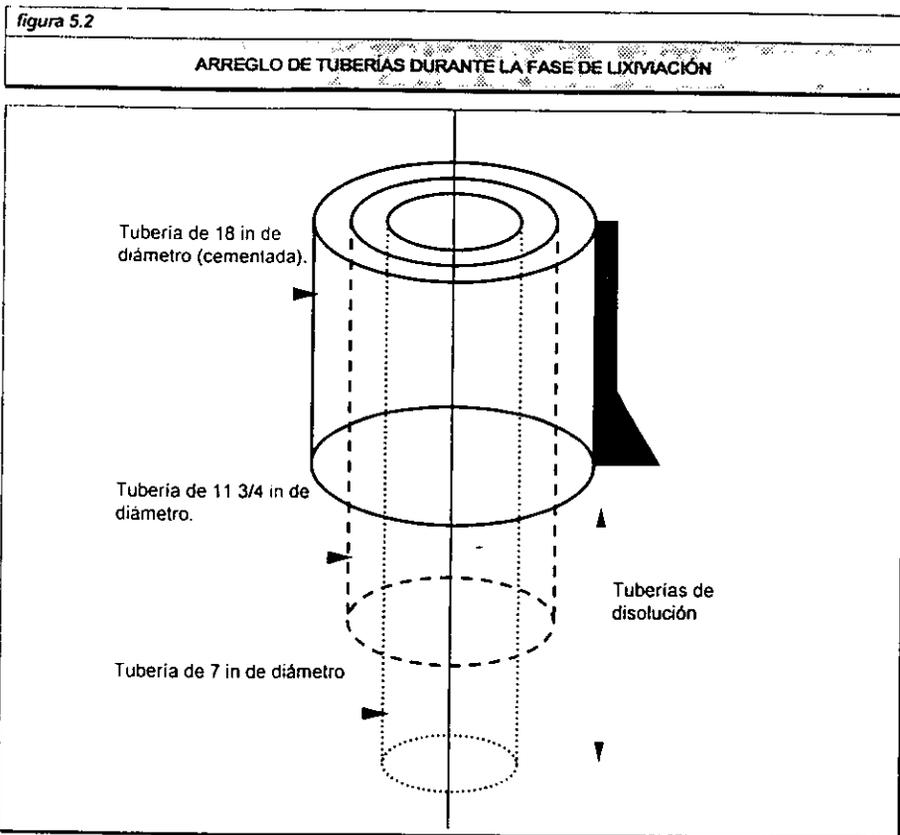
El espaciamiento entre las cavernas salinas de almacenamiento varía en el mundo y de un estado a otro en E. U.; y depende también qué tipo de material se esté almacenando o confinando. El espaciamiento entre cavernas se regula generalmente especificando una proporción $\frac{P}{D}$ mínima, en donde P es el grosor del "pilar" de sal (pared) entre las cavernas y D es el diámetro de la caverna. Por ejemplo, la proporción $\frac{P}{D}$ mínima para la Reserva Estratégica de Petróleo de E. U. es de 1.78^(2 y 3). De acuerdo con la EPA, una proporción $\frac{P}{D}$ de 1.5 a 1.8 es suficiente para el confinamiento de residuos peligrosos, de acuerdo a las propiedades del domo salino.⁽²²⁾

Generalmente, la proporción $\frac{P}{D}$ también especifica la distancia *mínima* desde las líneas de propiedad de cada caverna. Para el confinamiento de residuos peligrosos se requiere que la caverna tenga al menos 30.5 m (100 pies) desde su línea de propiedad por lo que se especifica un grosor mínimo de sal de 61 m (200) pies entre las cavernas. Ello implica que $\frac{P}{D} = 1.5$ para residuos peligrosos es la relación *mínima*⁽²²⁾. La reglamentación de espaciamiento de cavernas puede implicar una "diferencia" (modificación) fundamentada en los resultados obtenidos en los estudios de lugares de ubicación específicos. Este tipo de estudios frecuentemente también se utilizan para determinar el espaciamiento de las cavernas para el almacenamiento de gas natural. Desde un punto de vista normativo y estratégico, el número de cavernas está de acuerdo a las características de los residuos peligrosos, dado que por normatividad, hay algunas tipos clasificados de residuos (como los ya estudiados en el capítulo I) que no pueden ser mezclados entre sí, por lo que cabe la necesidad de hacer más cavernas en el macizo salino. Después de realizar las consideraciones anteriores, se tiene un panorama muy general acerca de las características geológicas del domo salino y la estrategia de creación de las cavernas en su interior se establece, siguiendo los pasos generales que se estudiarán más adelante.

5.3 Creación de la Caverna Lixiviada.

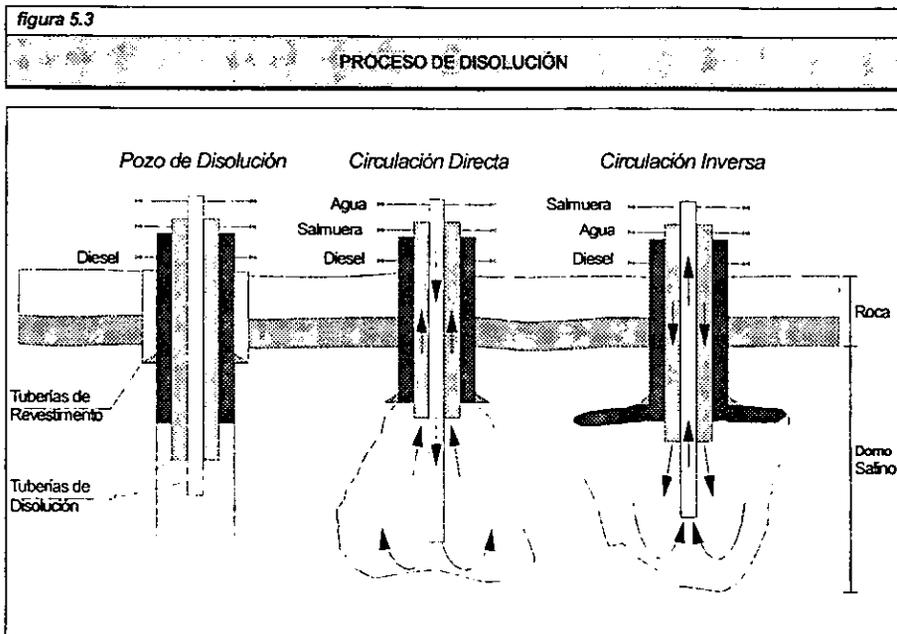
5.3.1 Lixiviación.

El proceso de lixiviación (formación) de las cavidades es simple y consiste en inyección de agua a los pozos y extracción de salmuera. Sin embargo, esta es la parte más importante en la creación de las cavernas y que involucra tecnología específica para crear la cavidad con forma geométrica lo más estable posible y conforme a las necesidades y forma de operación de la misma.



De acuerdo a las características geológicas, climáticas y geotécnicas del domo salino y a las especificaciones técnicas de la operación, normalmente se utilizan los siguientes diámetros del aparejo de tuberías para la lixiviación (figura 5.2): de 18 in para la tubería de revestimiento, 11 ¾ in para la extracción de salmuera y 7 in para la inyección de agua; las dos primeras servirán posteriormente para la operación de las cavidades y la de 7 in se podrá utilizar en otras operaciones de perforación del mismo tipo, para futuras cavernas a lixiviar^(1, 2, 3, 28 y 56).

El proceso de lixiviación de las cavidades se logra (figura 5.3) mediante la introducción de agua dulce por la tubería de 7 in de diámetro y extracción de la salmuera obtenida por la disolución de la masa salina, por el espacio anular entre la tubería mencionada y la de 11 ¾ in, operación llamada lixiviación o circulación directa. En el caso de inyectar el agua por el anular de 7 - 11 ¾ in y obtener la salmuera por la tubería de 7 in se le llama lixiviación inversa^(1, 2, 3, 28 y 56).



La combinación de estas dos formas de circulación de fluidos y modificando la altura de colocación de las tuberías se logra la forma geométrica requerida^(1, 2, 3 y 44). El tipo de lixiviación (directa, inversa, figura 5.3) proporciona diferentes configuraciones de cavidad por la disolución de la sal tal que, con circulación directa se obtiene una cavidad con mayor diámetro en la parte inferior del tramo en lixiviación y con la inversa se obtiene un diámetro mayor en la parte superior. Cabe mencionar que para confinar la disolución de la sal a la altura deseada se coloca un sello de algún aceite más ligero e insoluble (algún hidrocarburo, por ejemplo diesel) en el anular de la tubería de revestimiento de 18 in y la de 11 ¾ in.

La lixiviación se hace por etapas mediante el posicionamiento de las tuberías de 7 y 11 ¾ in en diferentes alturas y haciendo circular el agua en formas directa y/o inversa se establece el programa de formación de la cavidad, que es confirmado por un programa de simulación. Para la comprobación de la forma real de la cavidad durante la lixiviación, se mide varias veces mediante una sonda sonar la forma geométrica real obtenida y se aporta como datos de entrada a programa de cómputo basados en técnicas de ingeniería estructural y simulación de procesos para evaluar en el transcurso del tiempo los esfuerzos y deformaciones que se presentaran en el macizo de sal, que tiene un comportamiento complejo debido a las características viscoplásticas de la sal, observándose si la estabilidad de la cavidad está dentro de los límites de tolerancia. La parte más vulnerable es el techo de la cavidad, por lo que en su formación se hace crítico el control del sello de diesel que fija la altura de la disolución deseada.

Antes de que los residuos peligrosos sean depositados, se prueba si hay posibilidad de filtrado en la caverna y ésta se presuriza con gas de nitrógeno a una presión de 1,000 psi. Si la caverna mantiene esa presión por 96 horas, entonces la salmuera se bombea hacia afuera y puede producirse el secado de la caverna. El proceso de secado que se describirá más adelante (en la sección 5.4), puede tardar varios meses (la caverna finalmente tendrá una forma como en la figura 5.4).

Como una aproximación cercana de las capacidades de los equipos para una instalación típica, se darán los siguientes datos, tomados de la especificación de las instalaciones para el almacenamiento de hidrocarburos en el año de 1990 en el domo salino de Tuzandépetl, Veracruz⁽¹⁾. Para la formación de las cavidades se emplea suficiente agua de algún río, lago o laguna, que puede captarse en una bocatoma con una capacidad (aproximada) de 1,000 m³ y llevada mediante 6 bombas con un flujo de operación de cada una de 50,000 BPD (bariles por día, 331,250 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$) a través de dos acueductos de 16 in, la cual es recibida en un estanque llamado de balance, de 4,000 m³ y cuyo tiempo de residencia es de 3 horas; de éste se toma el agua para inyectarla a los pozos por medio de 3 bombas (para cada pozo) con un flujo de 100,000 BPD ($662,500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$). La capacidad normal del sistema es de 200,000 BPD ($1,325,000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$), considerando que sólo operan 2 sistemas de bombeo (para tener uno de relevo). Dependiendo del alcance del proyecto se tendrán los equipos necesarios para formar un determinado número de cavidades simultáneamente.

La salmuera obtenida de las cavidades se recibe en una presa en la cual se decantan los sólidos suspendidos que contenga la salmuera y mediante un sistema de bombeo consistente de 3 bombas de 100,000 BPD ($662,500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$) se envía al mar, o una laguna de regulación por un salinoducto de 20 in. Es importante mencionar que deberán realizarse estudios a los sistemas de vertimiento de salmuera al mar para establecer un diseño adecuado de difusión el que ayudará a tener un menor detrimento ecológico. Adicionalmente deberán efectuarse campañas de monitoreo con el fin de medir la alteración del sistema ecológico. En algunos países, se ha encontrado que los resultados hasta la fecha obtenidos indican que cuando la salmuera es revertida hacia el mar, el sistema se restablece rápidamente después de suspender el vertimiento de salmuera, no teniéndose alteraciones ecológicas permanentes.

5.4 Operación de la Cavema Lixiviada en el Domo Salino.

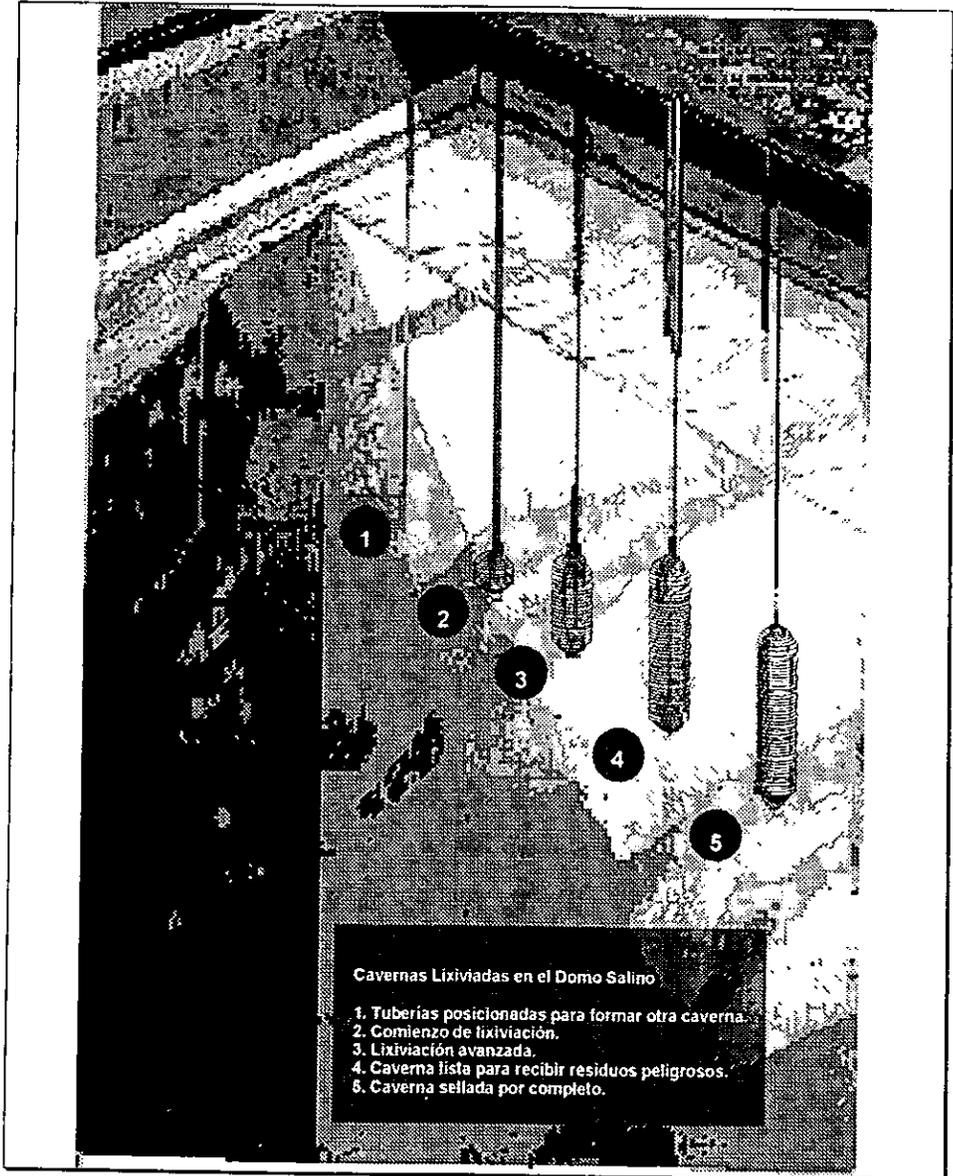
Para la operación de las cavidades después de haberlas lixiviado, se elimina la salmuera de la siguiente manera: Se desplaza la tubería de 7 in hacia el fondo de la cavema, donde se empieza a extraer la salmuera por medio de bombeo. Por el anular de la tubería de 11 ¾ in, se inyecta aire seco, para mantener la presión litostática dentro de la cavema y también para crear presión adicional que expulse la salmuera (junto con el diesel inyectado al principio) de la cavema. Como información adicional afirmamos que puede inyectarse aire caliente para optimizar el secado de la cavema, aunque por la humedad natural del domo salino no se podrá eliminar completamente el agua de la cavema lixiviada.

Cuando toda la salmuera es retirada (hasta donde sea posible), se elimina la tubería de 7 in, quedando únicamente la de 11 ¾ in hasta una parte media de la cavidad y la cementada de 18 in. Posteriormente se inyecta una mezcla cementosa (de concreto normal) hasta el fondo de la cavema, de manera que se tenga una capa uniforme cubriendo la parte baja de la cavema, para así mantener un área superficial suficientemente grande y empezar a introducir el desecho tóxico. Después, se empiezan a inyectar los "pellets" (los trozos de residuos peligrosos solidificados con concreto, lo cual se explicará en el capítulo VI) al interior de la cavema, por la tubería de 11 ¾ in, manteniendo la uniformidad en el grosor del nivel llenado en la cavema. De manera simultánea se retira poco a poco la tubería de operación.

Una vez que la cavema ha sido llenada a su máxima capacidad con los desechos, se despresuriza hasta presión atmosférica. Después cualquier espacio que quede en el techo de la cavema se llenará con una capa de cemento Portland y una capa de cemento asfáltico (las cavemas en forma final se observan en la figura 5.5). El tramo perforado restante se llenará con sal para que con el tiempo la cavema de confinamiento quede completamente enterrada en el domo salino. Finalmente, la perforación superficial será sellada con concreto y tierra, formando un tapón impenetrable.

figura 5.5

CAVERNAS LIXIVIADAS EN EL DOMO SALINO

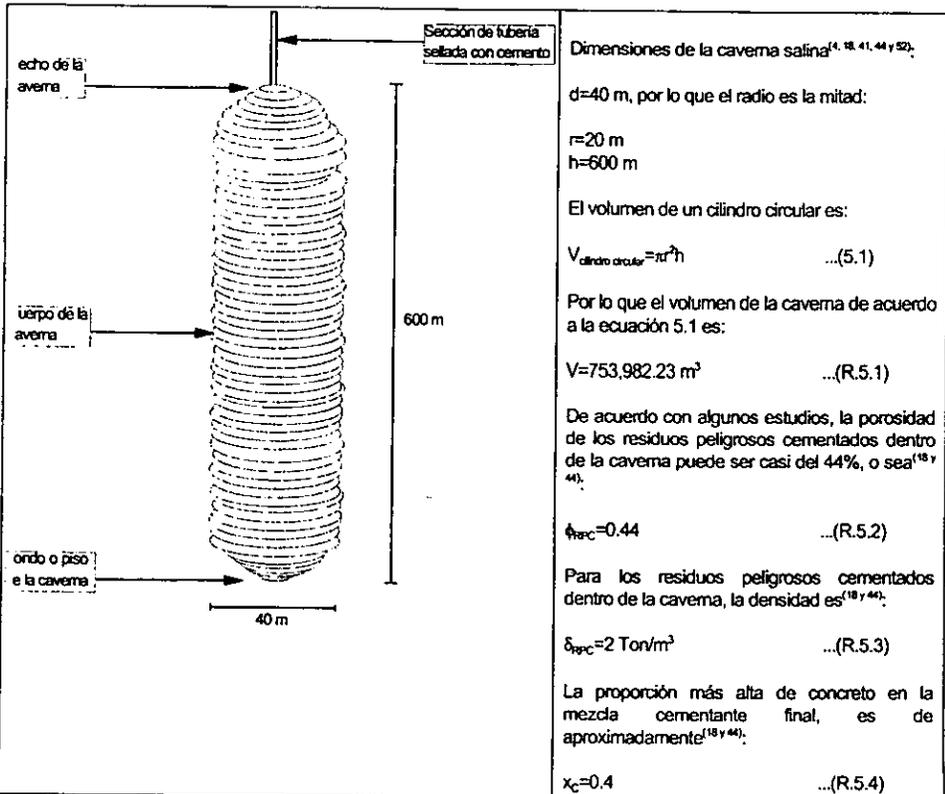


5.5 Especificaciones Generales de Capacidad de una Caverna Lixiviada en un Domo Salino para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.

De acuerdo con diversos estudios y experiencias que se han realizado para el confinamiento de residuos peligrosos en este tipo de instalaciones en diferentes partes del mundo, las especificaciones de diseño más usadas son las que se observan en la figura 5.4. Tal diseño (600 m de altura y 40 de diámetro^(4, 18, 41, 44 y 52) asegura la estabilidad mecánica de la caverna, al mismo tiempo que la capacidad del depósito se calcula de acuerdo a la densidad de los residuos peligrosos cementados, a la porosidad de los mismos y a la proporción existente entre los residuos peligrosos y la mezcla cementante.

figura 5.4

CARACTERÍSTICAS DEL CONFINAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS



De acuerdo a la figura 5.4, el volumen total de la cavema es de:

$$V=753,982.23 \text{ m}^3 \quad \dots(\text{R.5.1})$$

Cuando se agregan los residuos peligrosos cementados, quedan huecos cuya porosidad (en algunos casos extremos) puede llegar a ser tan alta como del 44%⁽¹⁸⁾, por lo que el volumen efectivo se calcula así:

$$V_{\text{efec}} = (1 - \phi_{\text{RPC}})V \quad \dots(\text{5.2})$$

$$V_{\text{efec}}=422,230.04 \text{ m}^3 \quad \dots(\text{R.5.5})$$

Ahora, podemos calcular la cantidad de residuos peligrosos cementados confinados (usando R.5.3 y R.5.5):

$$m_{\text{RPC}} = \delta_{\text{RPC}} V_{\text{efec}} \quad \dots(\text{5.3})$$

$$m_{\text{RPC}}=844,460.09 \text{ Ton} \quad \dots(\text{R.5.6})$$

De acuerdo con algunos datos, la relación másica que existe en los residuos peligrosos cementados, con respecto a la mezcla cementante y los residuos varía entre el 10% hasta el 40%, dependiendo de la naturaleza del residuo⁽⁹⁾ (10 a 40% de concreto en 100% del residuo peligroso cementado). Tomando el dato de 40%, se obtiene la masa total de residuos peligrosos (usando R.5.4 y R.5.6):

$$m_{\text{RP}} = (1 - x_c)m_{\text{RPC}} \quad \dots(\text{5.4})$$

$$m_{\text{RP}}=506,672.05 \text{ Ton} \quad \dots(\text{R.5.7})$$

En 1997 se produjeron en México 7.5 millones de toneladas de residuos peligrosos⁽²⁰⁾, lo que equivaldría mensualmente a una producción de 625,000 Ton. Así pues, de acuerdo con R.5.8, la capacidad de una cavema de confinamiento cubriría más del 80% de la producción total mensual de residuos peligrosos en nuestro país.

$$\frac{506,672.05}{625,000} * 100 = 81.06 \quad \dots(\text{R.5.8})$$

Cabe mencionar que la forma, dimensiones y capacidad de la cavema lixiviada pueden variar de acuerdo a los alcances del proyecto de confinamiento, a las características del domo salino y las propiedades del mismo residuo. Por lo cual, los datos presentados aquí muestran los criterios más usados que rigen a los confinamientos de este tipo.

Capítulo VI

Tratamiento de los Residuos Peligrosos y Metodología de Confinamiento.

"¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta es ésta, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino."

Albert Einstein

(1879-1955), físico germano-estadounidense.

6.1 Introducción.

El objetivo del presente capítulo es dar alguna información antecedente acerca del proceso de solidificación de residuos peligrosos antes de depositarlos en la cavema formada por disolución mineral en domos salinos. De acuerdo a las investigaciones previas realizadas para los sistemas de confinamiento afines, esta metodología es considerada la que ofrece más ventajas debido a que los residuos peligrosos son inmovilizados en una fase sólida, facilitando su manejo y reduciendo los riesgos asociados a ellos^(5 y 23).

La instalación destinada al confinamiento consiste de una superficie en la que se reciben los residuos, se almacenan y son tratados para formar un producto sólido que después es transportado neumáticamente dentro de la cavema salina en un flujo de aire enriquecido con nitrógeno. Los residuos peligrosos que se reciben son de una gran variedad y la gran mayoría con un gran volumen, como flujos de residuos industriales comunes o suelo y lodos contaminados. Las instalaciones superficiales no están especificadas para manejar residuos que en condiciones de temperatura y presión normales se encuentren en estado gaseoso, ni compuestos inflamables, explosivos o materiales radioactivos. Por lo que dentro de este contexto, se sintetizará y expondrá la "guía" de tratamiento de los residuos peligrosos y su disposición en la cavema lixiviada en el seno del domo salino.

6.2 Guía de Tratamiento de Residuos Peligrosos y Solidificación Cementosa.

Después de establecer los convenios correspondientes con las industrias a las que se les brindará el servicio del confinamiento de sus residuos peligrosos, se procede a un análisis químico de los flujos de residuos por parte del generador de los mismos y el mismo análisis se realiza periódicamente en las instalaciones de tratamiento del sitio de confinamiento. En estas instalaciones, los residuos se clasifican en términos de su potencial reactivo y tratamiento requerido. La guía de tratamiento consiste de los siguientes pasos^(5, 9 y 23) (figura 6.1):

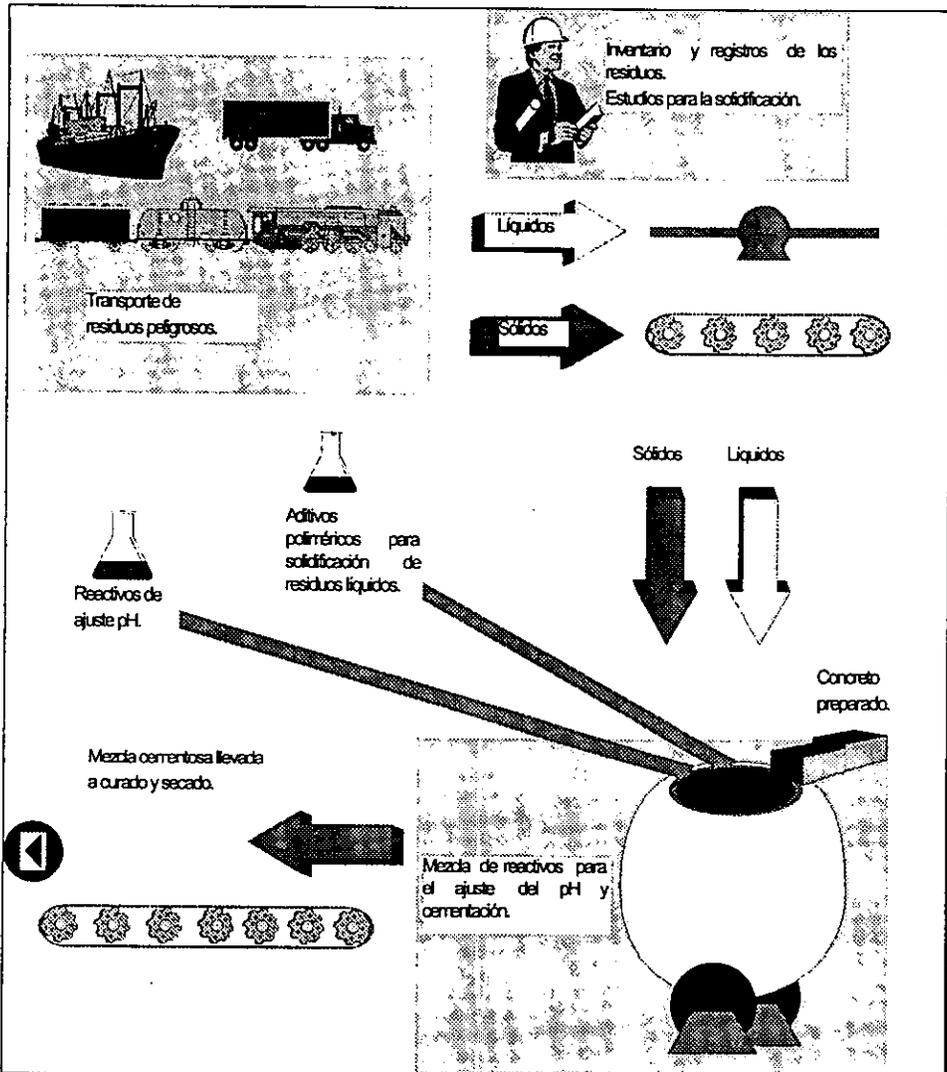
1. *Estudios de solidificación de balanza.* Teniendo el inventario de desechos a la mano, la solidificación de balanza se llevará a cabo en flujos de residuos particulares o en flujos de residuos mezclados para asegurar que se logre una solidificación satisfactoria. El proceso de solidificación tiene una base cementosa o puzolánica. Para los residuos líquidos existe una amplia gama de productos aglutinantes usados para su solidificación completa (geles de polímeros con silicatos, epóxidos, poliésteres, etc.). El criterio para lograr una solidificación satisfactoria es: desarrollar resistencia a la compresión abierta mayor a 50 psi, que no haya líquidos libres en el residuo solidificado y que no exista potencial de liberación de líquidos en compresión como se establece por la EPA^(5, 9 y 23).
2. *Ajuste de pH.* Los procesos de solidificación con base cementosa o puzolánica incluyen la adición de materiales totalmente básicos ($\text{pH} > 7$) para los residuos. Si el residuo es muy ácido, la reacción puede ser muy fuerte. De esta forma, el ajuste del pH bajo condiciones controladas prepara a los residuos para un siguiente tratamiento. El grado al cual el pH se ajusta será valorado en el paso 1 de la guía del tratamiento.
3. *Mezcla de reactivos y cementación.* Los reactivos sólidos y/o líquidos apropiados para el ajuste de pH se mezclan con los residuos en una mezcladora por lotes con agitación continua. Después, se agrega la base cementosa (concreto) preparada con porcentajes de agua mínimos según las especificaciones de fraguado para obtener un secado más rápido. Algunas compañías (como la Alemana PB-KBB⁽⁴¹⁾) incluyen dentro de sus especificaciones el agregar cierto aditivo especial (un compuesto combinado de polímeros cerámicos y silicatos) con lo que puede obtenerse un producto final con acabado casi cerámico. Por lo demás, se espera que el producto resultante sea

un material semisólido, probablemente con una consistencia similar a la del concreto antes de ser colocado a secar.

4. *Curado.* El material se dejará reposar, aproximadamente a la temperatura ambiente por un período mayor a tres días. Este período permite que se lleve a cabo una cantidad significativa de reacción de hidratación en los agentes aglutinantes para producir un material completamente sólido.
5. *Secado.* El proceso de secado se llevará a cabo calentando el material solidificado en un secador rotatorio en presencia de una corriente de aire seco y enriquecido con nitrógeno que fluye por encima del material. La temperatura en el secador será desde 70 a 160 °C. El paso de secado reducirá el contenido de humedad "libre" a aproximadamente 3%.
6. *Dimensionamiento.* El material seco se pasará por un triturador para reducir el tamaño de los pellets a aproximadamente el tamaño de un chícharo, para poder ser transportados neumáticamente.

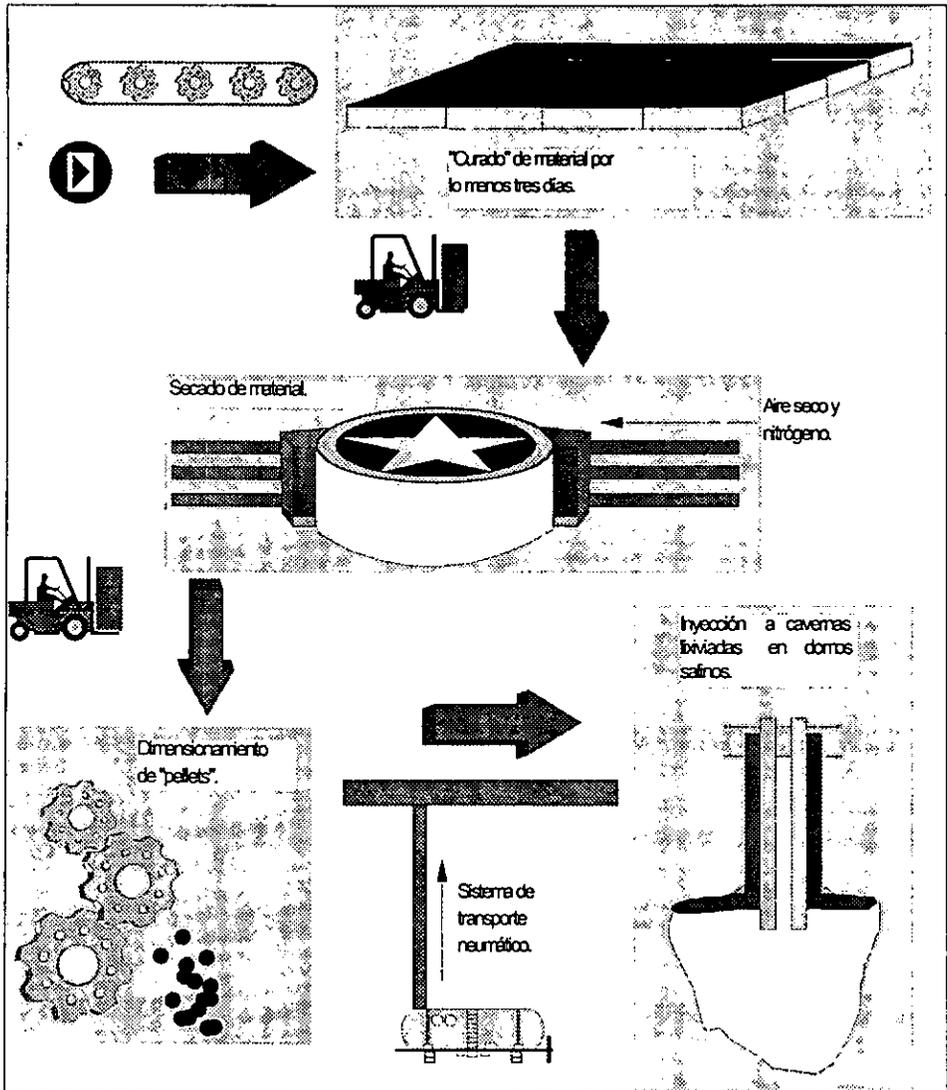
figura 6.1

GUÍA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS



El tratamiento de los residuos peligrosos para su posterior confinamiento depende por mucho del estado físico y el pH de ellos. El objetivo es llegar a una mezcla cementosa con cierta estabilidad química que permita una solidificación completa e integrada de estos residuos peligrosos.

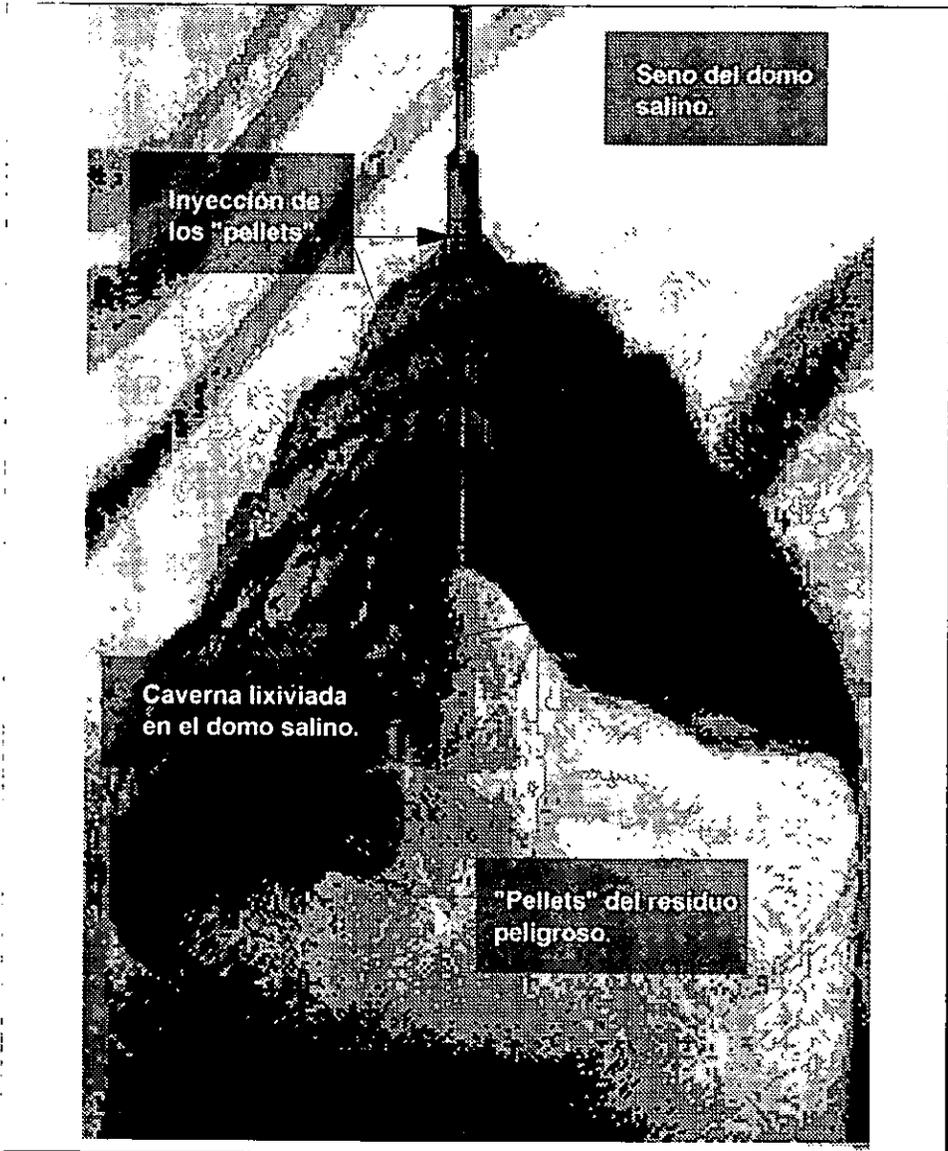
figura 6.1 (continuación)



Posteriormente a este tratamiento de residuos peligrosos, se procede a la operación de la cavema lixiviada, lo cual se estudió en el capítulo V en la sección 5.4, quedando finalmente como en la figura 6.2.

figura 6.2

CONFINAMIENTO DE LOS "PELLETS" DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA CAVERNA EN EL DOMO SALINO



En el proceso general de pretratamiento de residuos peligrosos se usa el término de "solidificación cementosa" para designar el proceso de tratamiento con cemento o puzolánica y otros aditivos para convertir el material residual en una forma apropiada para almacenarse en los domos salinos. Por supuesto, algunos de los compuestos estarán ya en la forma sólida, pero serán adicionalmente "solidificados" con agentes cementosos. El proceso de "solidificación- estabilización" o "fijación química" de residuos líquidos previos a su disposición en el confinamiento es una práctica comúnmente aceptada.

Este proceso ha sido ampliamente estudiado y ha sido descrito en numerosas monografías y artículos en revistas especializadas. De hecho, desde que las áreas restringidas para el almacenamiento de materiales peligrosos se incluyeron en las enmiendas de la EPA de 1984⁽¹⁴⁾, esta investigación y el uso práctico de la tecnología ha tenido una gran expansión. Como es sabido, la tecnología incluye el uso de polímeros orgánicos, incluyendo algunos naturales como asfalto o bitumen, además de materiales de cementosa y materiales puzolánicos. Sin embargo, en la práctica la solidificación cementosa es la única forma comúnmente utilizada en el área de disposición de residuos.

La investigación de esta tecnología debe enfocarse en la cuestión de si los constituyentes peligrosos del material solidificado han sido inmovilizados. Cuando se utilice un confinamiento para residuos tóxicos, los residuos solidificados estarían en contacto con agua freática y de esta forma los constituyentes tóxicos representarían una amenaza para la salud humana y al medio ambiente, a través de la migración hacia los mantos freáticos y su transferencia a un manto acuífero que esté o estará en uso. En el caso de la disposición en domos salinos, la sal presenta una barrera efectiva que evita la filtración a los mantos freáticos, la cual será analizada ampliamente en los capítulos VII y VIII.

Capítulo VII

Transferencia de Masa del Confinamiento de Residuos Peligrosos en Cavemas Lixiviadas en Domos Salinos.

"Los científicos necesitamos especialmente la imaginación. No bastan las matemáticas ni la lógica: necesitamos algo de estética y poesía."

María Mitchell

(1818-1889), astrónoma estadounidense.

7.1 Introducción a los Mecanismos de Transferencia de Masa de un Confinamiento de Residuos Peligrosos.

Los fenómenos de transferencia de masa son comunes en la naturaleza e importantes en todas las ramas de la ciencia e ingeniería. La expresión "transferencia de masa" que se ha popularizado sólo durante los últimos años, se refiere al movimiento de moléculas o elementos de fluidos causado por alguna forma de energía potencial o "fuerza impulsora". Esto incluye no sólo la difusión molecular, sino también el transporte por convección y a veces la mezcla simple de materiales como el flujo de un fluido por un conducto.

Después de lo visto en los capítulos anteriores, conviene hacer una delimitación efectiva de los alcances del estudio de transferencia de masa de este trabajo. Por lo que el análisis de este fenómeno se ha delimitado a tres mecanismos de transporte de materia que consideramos abarcan cualquier tipo de "migración" presente en las cavernas de confinamiento de residuos peligrosos. Estos mecanismos son:

- *Flujo de salmuera en la caverna.* Este tipo de transporte nos lleva al análisis del peligro de lixiviación de los residuos peligrosos al cuantificar el flujo de salmuera llevado hacia dentro de la caverna para formar soluciones peligrosas.
- *Transferencia de masa en estado líquido.* Con esto se analiza cuál es el riesgo que existe si el residuo peligroso se vuelve (por algún tipo de interacción) al estado líquido y éste migra a la masa salina.
- *Transferencia de masa en estado gaseoso.* Cuando un residuo peligroso es confinado, pueden ocurrir reacciones químicas que produzcan gases tóxicos y peligrosos. Entonces se analiza la transferencia de estos gases a través del macizo salino.

Desde un punto de vista regulatorio, un sistema de confinamiento de residuos peligrosos deberá cumplir el requisito de "no migración" requerido por la Agencia de Protección Ambiental⁽²³⁾ (EPA). La "no migración" implica un confinamiento de residuos por 10,000 años.

Para la demostración de ésta condición se requerirá del cálculo de modelos matemáticos y dichos modelos deberán estar basados en características físicas y químicas de los residuos y del medio ambiente geológico. Una característica original del requerimiento de "no migración" es que está rutinariamente dirigido a cavidades de confinamiento para residuos líquidos, mientras que nosotros consideramos residuos en forma sólida.

De acuerdo con algunos estudios llevados a cabo por especialistas en hidrogeología y petroquímica^(18 y 19), las entidades que componen a una caverna y sus alrededores en el domo salino están bien definidas e incluyen una zona de inyección y una de confinamiento (figura 7.1). Estas zonas son partes de unidades geológicas donde las secciones de inyección tienen una alta permeabilidad y las secciones de confinamiento deben ser poco permeables. Los requerimientos de "no migración" para domos salinos no son los de rutina por varias razones, sobre todo (como se mencionó anteriormente) porque los residuos son sólidos, no líquidos y serán situados en cámaras lixiviadas de un tamaño y formas específicas.

Para que la migración se lleve a cabo, en primer lugar los residuos sólidos tienen que ser convertidos a una forma fluida. Segundo, cómo todo esto puede ocurrir en un domo salino no es tan sencillo. La sal y los domos salinos, en particular, no son normalmente considerados como un medio fluido por que su permeabilidad y contenido de agua son muy bajos. Sin embargo, aún si asumimos que los residuos pasaran a su forma líquida después de algún tiempo de haber sido colocados, la pregunta es: ¿cómo estos serán transportados fuera de las paredes de la caverna de sal? Dos mecanismos pueden ser utilizados para explicar estas cuestiones: un flujo fluido y la difusión molecular a través de los poros de la roca salina. En este trabajo cada uno de estos será examinado.

Pero antes de comenzar este análisis, se procederá a redefinir cuáles son las características típicas de un confinamiento de residuos peligrosos, debido que deben establecerse algunas condiciones (como profundidad, humedad, presión, etc.), que se manejarán en el estudio de

transferencia de masa precedente. También se definirán las zonas activas de una caverna de confinamiento.

7.1.1 Características Generales de un Confinamiento Típico.

En la figura 7.1, se muestran las dimensiones proyectadas de un sistema de confinamiento de residuos peligrosos (tal como se establecieron en el capítulo V). Bajo las regulaciones ambientales que son inherentes al sistema propuesto, se establece un parámetro de seguridad para la "no migración" de residuos peligrosos confinados en este tipo de cavernas.

El espacio de inyección es tomado como la medida de la caverna, que es de 40 m de diámetro y aproximadamente 600 m de altura (de acuerdo con la sección 5.5), más 15.25 m adicionales radiales, hacen aproximadamente un cilindro de 70.5 m de diámetro. La zona de inyección se extiende otros 15.25 m en todas direcciones desde el espacio de inyección y la zona de confinamiento es el resto del medio ambiente de la roca salina. El objetivo de la "no migración" es demostrar que las condiciones del sitio, son aquellas en las que los residuos no migrarán fuera de la zona de inyección^(18 y 23). Esta restricción permite que el transporte de residuos a distancia no exceda 30.5 m radialmente desde la pared de la caverna o, aproximadamente, 50.5 m desde el eje de la caverna.

7.1.2 Definición de Zonas Activas.

Las zonas activas son áreas en donde la concentración de residuos peligrosos lixiviados en fase líquida sería máxima y por ende, es el origen de migración para presentar fenómenos de transferencia de masa instantánea. En este caso, son los límites de la caverna sellada y llena de residuos con la masa salina (figura 7.2).

figura 7.1
ZONAS DE INYECCIÓN Y CONFINAMIENTO

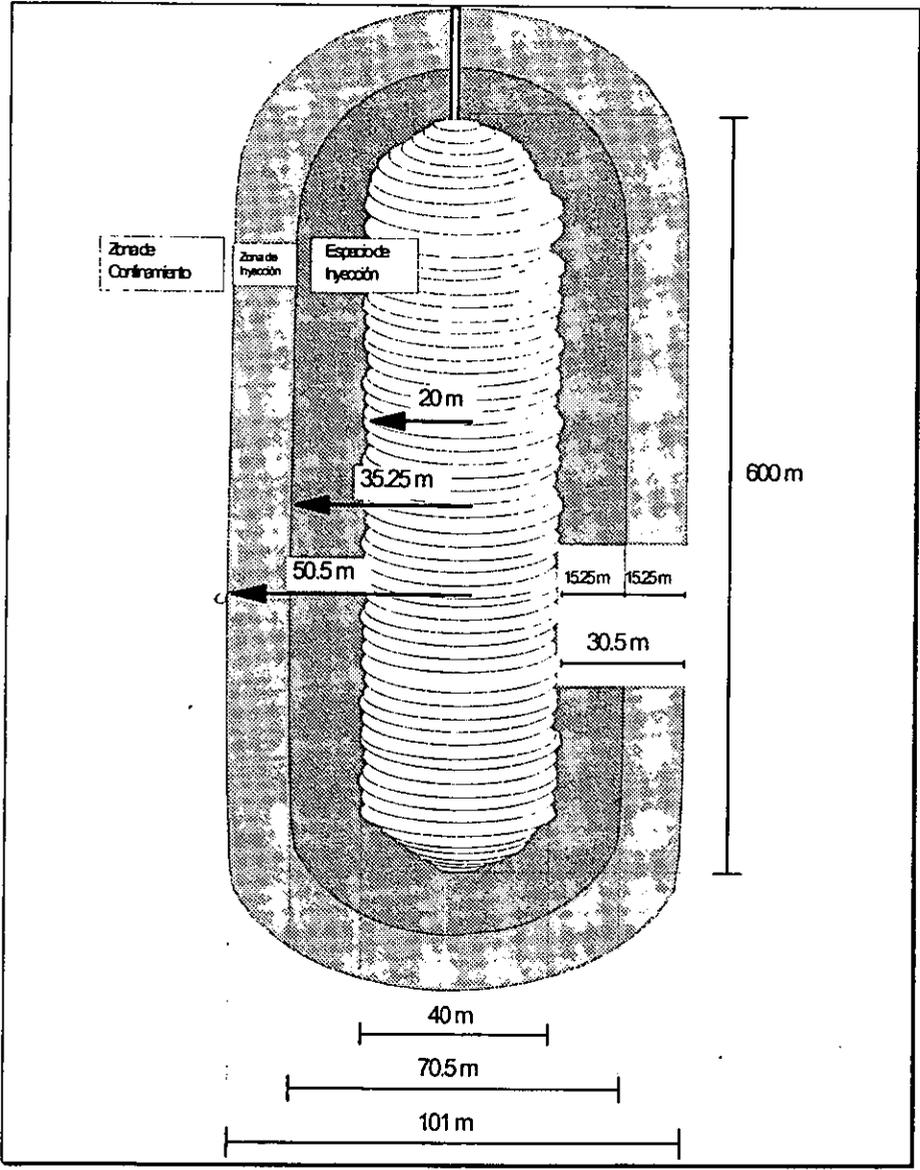
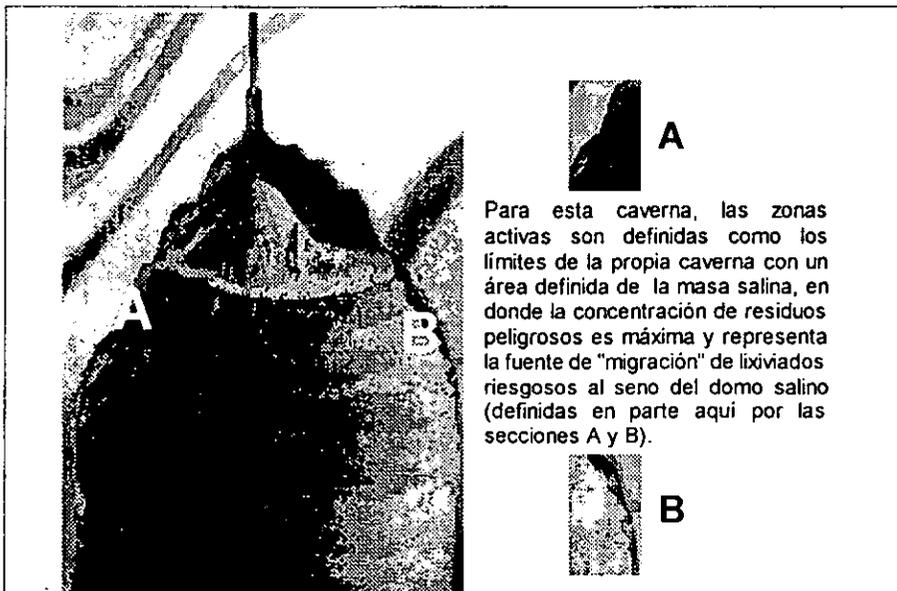


figura 7.2

DEFINICIÓN DE ZONAS ACTIVAS



7.2 Flujo de Salmuera en la Caverna.

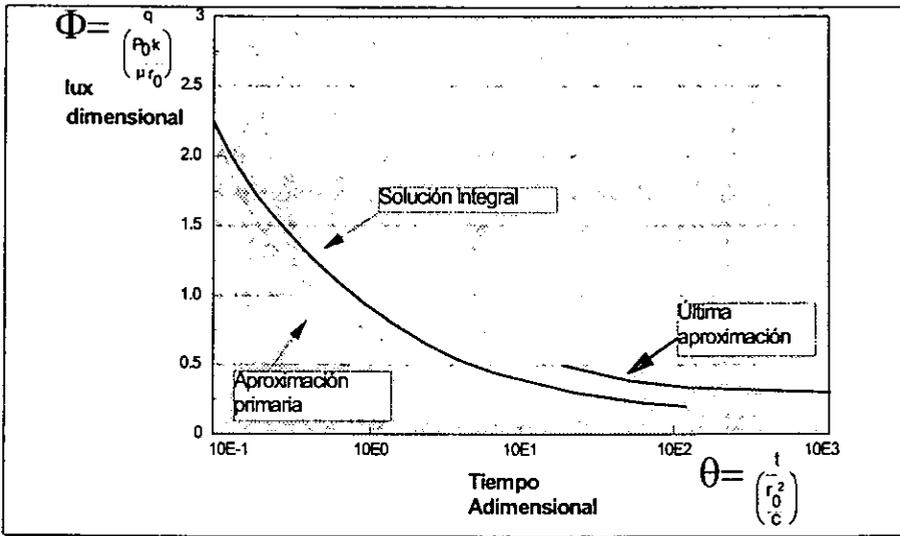
7.2.1 Modelos Conceptuales.

La mayoría de los estudios sobre la migración de la salmuera en los cuerpos salinos se centran en el movimiento de las inclusiones de este fluido intercrystalino llevado por campos térmicos asociados con el confinamiento de residuos radiactivos. Como se espera que los residuos sólidos no afecten los bajos gradientes de temperatura en el domo, la contribución de salmuera por esta causa puede ser insignificante. Sin embargo, existe la posibilidad de transportar salmuera a la caverna por flujo Darciano, definido como el flujo en el espacio interconectado del poro, llevado por un gradiente de presión que puede ser causado por las condiciones de presión atmosférica en la caverna minada y por las presiones del fluido en el poro de la roca en el seno del domo salino⁽¹⁸⁾. Estas últimas presiones pueden variar entre hidrostáticas y litostáticas. Por otro lado, la movilización de los residuos en forma sólida no puede ocurrir sin su transformación a una forma fluida (líquido o gas).

Dos son los modelos conceptuales propuestos para describir esta condición de flujo. En primer lugar y probablemente el más realista, asumimos que existe al menos alguna porosidad interconectada en la masa salina y esta porosidad contiene salmuera. Estos escasos fluidos limítrofes están probablemente tan comprimidos que el flujo sólo puede ocurrir en respuesta a un elevado gradiente de presiones, como en la región cercana a la caverna. Sin embargo, no lejos, un fenómeno de flujo de salmuera podría presentarse por la ausencia de fuertes fuerzas acarreadoras sobre una escala regional en dirección contraria al depósito⁽¹⁸⁾. Estos modelos predicen una afluencia limitada de la salmuera que tiende a cero en un período de tiempo corto. Muy probablemente, la única salmuera asequible para entrar en la cámara sería aquella retenida en la zona activa en la pared de la cavidad.

Un segundo modelo conceptual asume un campo saturado de salmuera lejano y la continuidad de la porosidad efectiva hasta el depósito salino. El gradiente de presión es libremente transmitido desde el campo cercano al lejano. Este modelo de un medio poroso con la enorme diferencia de presiones predice grandes volúmenes de afluencia.

gráfica 7.1
FLUX PARA UNA CÁMARA CIRCULAR



FUENTE: Domenico, P. A. and Schwarz F. W.; *Physical and Chemical Hydrogeology*; John Wiley and Sons; New York; 1990.

La solución general para el modelo del medio poroso se muestra como una gráfica de tiempo adimensional contra flux adimensional (gráfica 7.1). Estos se calculan con:

$$\theta = \frac{t}{\left(\frac{r_0^2}{c}\right)} \quad \dots(7.1)$$

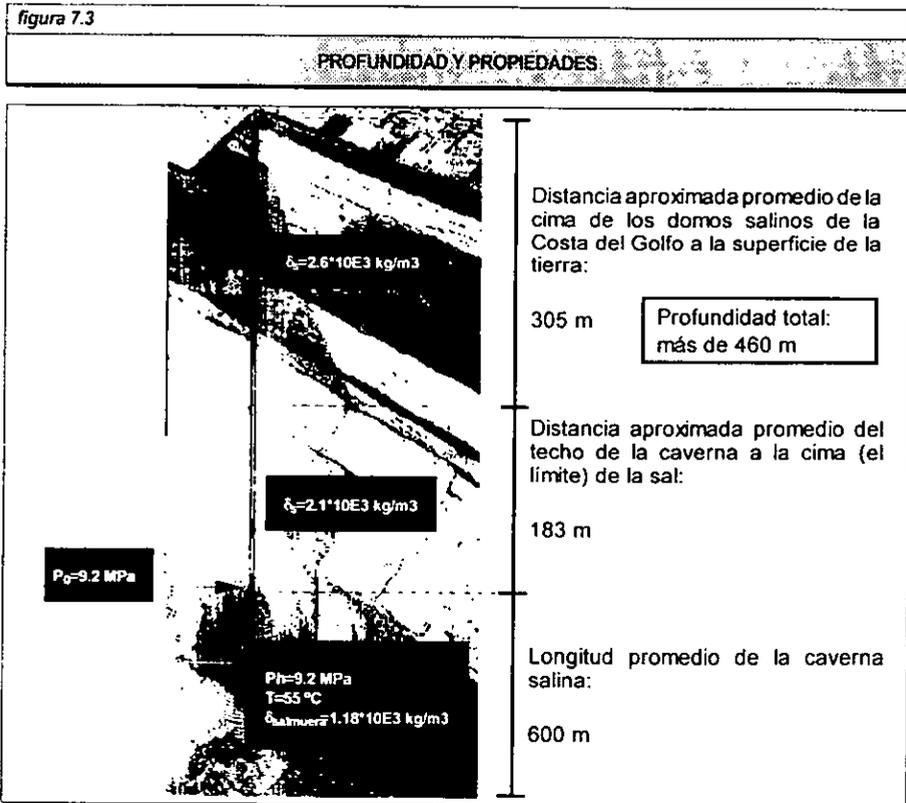
$$\Phi = \frac{q}{\left(\frac{P_0 k}{\mu r_0}\right)} \quad \dots(7.2)$$

Donde las variables θ y Φ son el tiempo y flux adimensionales respectivamente, t es el tiempo (s), r_0 es el radio de la cámara (m), c es la difusividad del fluido $\left(\frac{m^2}{s}\right)$, q es la velocidad del fluido $\left(\frac{m}{s}\right)$, P_0 es la presión hidrostática o litostática (MPa), k es la

determinación de un tiempo adimensional permite predecir el flujo dimensional, del cual la velocidad de flujo de la salmuera q puede ser calculado para el tiempo de interés.

7.2.2 Parámetros e Incertidumbres.

Ahora existe el problema de la selección y establecimiento de los parámetros para los cálculos y estimaciones necesarias. Primero, asumimos que la caverna tiene un radio de 20 m. En la roca salina el radio disminuirá un poco, cuando las condiciones de presión litostática son restablecidas en la cavidad debido al desplazamiento natural hacia adentro de la sal, esto es debido a las características elastoviscoplasticas de las masas salinas.



La compactación de la cavema también afecta la selección del período de tiempo de infiltración. Cuando el agregado sólido está dispuesto en la cavidad, su porosidad puede ser tan alta como un 44% y la presión es atmosférica. Con el deslizamiento plástico, esta porosidad se reducirá hasta, tal vez, un 10% y la presión en el cuerpo del agregado será eventualmente de la misma magnitud que la de la roca sin perturbar. Lo cual significa que la fuerza transmisora del movimiento del fluido en la cavema será eliminada. El tercer parámetro es la viscosidad y se toma como $1.6 \cdot 10^{-3}$ Pa-s, establecido por especialistas en hidrogeología^(15, 19, 37) durante el estudio de los domos salinos de Nuevo México, Ohio y Texas, en E. U.

Una de las selecciones de parámetros más críticos es la fuerza transmisora del movimiento del fluido que puede abarcar desde la presión hidrostática hasta la presión litostática. La presión litostática se define como el resultado de la compresión debido a las capas geológicas (desde el nivel del terreno hasta una determinada profundidad) y las presiones asociadas a los movimientos de compresión de la corteza terrestre hacia una determinada zona. La presión hidrostática es la presión estimada del agua (o salmuera, más específicamente en este caso) bajo la influencia de las fuerzas de compresión debidas a las profundidades geológicas⁽⁴²⁾. Mientras ésta se puede obtener de cálculos por modelos establecidos, la presión litostática puede obtenerse por modelos y estimaciones, o por un análisis real en el sitio mediante sensores puestos en sondas de excavación⁽¹⁶⁾.

En nuestro modelo la presión litostática será tomada de 18.6 MPa. Esta es la presión litostática estimada en la parte media de la cavidad (figura 7.3: alrededor de 500 m de profundidad, con una presión aproximada de 11.5 MPa) y del fondo de la cavema (cerca de 1,100 m, 26 MPa). La presión hidrostática a esta misma profundidad es de alrededor de 9 MPa⁽¹⁸⁾. Como el flujo será directamente proporcional al gradiente de presión, los flujos calculados y los volúmenes determinados bajo condiciones de presión litostática serían mayores en un factor de cerca de dos para los estimados bajo presión

hidrostática. Con el fin de mantenernos en un rango de seguridad, utilizamos la mayor fuerza litostática transmisora en el análisis.

Otro parámetro importante es la permeabilidad del depósito de sal. La permeabilidad también afecta las estimaciones de la difusividad del fluido, pero se requiere de otro parámetro como se discutirá más adelante. Hay dos valores de permeabilidad que son de consideración. El primero, es la permeabilidad en la zona activa en inmediata vecindad con la pared de la cavema. El segundo, es la permeabilidad del cuerpo salino fuera de la zona activa. Las permeabilidades de las zonas activas en la sal no están bien documentadas, aunque se ha sugerido que la migración sobreestimada (aunque lejos de ser potencialmente peligrosa) en el sitio WIPP es debida exclusivamente a la alta permeabilidad de la zona⁽⁴⁶⁾. Enfatizamos que el sitio WIPP contiene una sal "húmeda" con un peso de agua no enlazada del 0.1 al 1%⁽¹⁵⁾. La zona activa de la mina Asse en Alemania ha sido determinada alrededor de 3 m, donde la permeabilidad disminuye desde 10^{-17} m^2 en la superficie de la roca hasta su valor ambiente de 10^{-21} m^2 a 3 m⁽¹⁸⁾. La mina Asse ha sido mecánicamente minada, mientras que nosotros planteamos la posibilidad de una cavema lixiviada.

Es anticipado que la lixiviación diera como resultado una zona activa más pequeña que la producida por el minado mecánico. Para quedar con un margen de seguridad, distribuimos todo el potencial de agua en la zona activa de 3 metros de ancho al periodo de tiempo cero y ajustamos la afluencia sobre la variante de tiempo en un periodo de 100 años (ver figura 7.5). La permeabilidad de la zona activa es muy baja. La permeabilidad de la roca salina a la presión litostática se reporta de 0.05 microdarcios ($4.8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$)⁽¹⁸⁾. Las pruebas sobre las formaciones salinas de Castilla, España, con taladro de vástago han mostrado permeabilidades menores que la capacidad medida en los aparatos de prueba⁽²⁵⁾. Esto indica una permeabilidad no mayor de 1 nanodarcio ($1 \cdot 10^{-14} \frac{\text{m}}{\text{s}}$) de conductividad hidráulica o $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ y menores. Tablas de permeabilidades basadas en pruebas con taladro de vástago en sales^(16 y 25) muestran un rango de permeabilidades desde $9 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ hasta $2.5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

La mayoría de la información sobre la permeabilidad salina proviene del sitio WIPP, donde el objetivo es la colocación de residuos nucleares en lechos salinos en Nuevo México. En nuestro modelo de domos salinos se propone la roca salina como huésped, además de ser considerablemente seca y de más baja permeabilidad que la del lecho salino. Los domos salinos contienen un 0.002% del peso del total del agua (libre y enlazada químicamente), anticipamos una permeabilidad algo menor, de 10^{-21} m². Con la finalidad de mantener un margen de seguridad, asumimos una permeabilidad de $1 \cdot 10^{-21}$ m² para nuestro análisis⁽¹⁸⁾.

Ahora se procede a la determinación del coeficiente de difusión. El coeficiente de difusión depende de la presión, temperatura y la composición del sistema. En contraste con los gases, para los cuales existe una teoría cinética avanzada para explicar el movimiento molecular, las teorías de que se dispone para explicar la estructura de los líquidos y sus características de transferencia aún son inadecuadas para permitir un tratamiento riguroso. Los líquidos se caracterizan por una combinación de fuerzas intermoleculares fuertes además de los arreglos caóticos irregulares de los átomos presentes en la fase gaseosa. Esta combinación ha agravado el problema de describir con precisión el estado líquido cuantitativamente y ha hecho difícil predecir las propiedades de transporte. Varios intentos para tratar datos de líquidos han generado diversas divisiones estructurales para el estado líquido variando desde un gas denso hasta un sólido (con restricciones).

El uso de modelos gaseosos para describir el estado líquido se debió en parte al hecho de que el movimiento atómico en un líquido era un proceso al azar. En contraste, los modelos de tipo sólido se han basado en el comportamiento de los metales líquidos, a causa de los conglomerados atómicos los cuales se presentan como arreglos atómicos casi regulares que existen justo arriba del punto de fusión debido a sus grandes fuerzas intermoleculares⁽⁵⁵⁾.

La dificultad de tratar al estado líquido llega a ser fácilmente evidente ya que los líquidos en realidad consisten en conglomerados de átomos o moléculas dispuestos en forma irregular, los cuales existen en un estado activado y presentan movimientos molecularmente aleatorios. Aunque se pueden obtener valores relativamente exactos de los coeficientes de difusión a partir de las soluciones a la ley de Fick para gases, líquidos y sólidos, se conoce poco del mecanismo real de la difusión de líquidos en comparación con los gases y sólidos.

Debido a la falta de un modelo estructural teórico preciso para líquidos, se ha realizado un considerable trabajo en esta área. La situación se complica cuando se trata de establecer las leyes de la difusión para soluciones acuosas electrolíticas. En este contexto, el cloruro de sodio, NaCl, se dispersa en agua como iones Na^+ y Cl^- .

Por tanto, los estudios previos para evaluar la difusividad de una solución electrolítica han sido llevados a cabo para este caso de estudio, bajo condiciones especificadas en el ambiente geohidrológico de los domos salinos. Así pues, mediante la correlación de propiedades de soluciones electrolíticas encontraron que la difusividad del fluido c puede ser entonces calculada utilizando el siguiente grupo de ecuaciones^(15 y 18), donde todos los parámetros están citados en el cuadro 7.1:

$$C = \frac{k}{\mu} \frac{2G(1-v)}{(1-2v)} B^2 \frac{(1+v_u)}{9} \frac{(1-2v)}{(1-v_u)(v_u-v)} \quad \dots(7.3)$$

$$\frac{1}{B} = 1 + \frac{K}{K_f} \frac{(1-\frac{K_f}{K_g})}{(1-\frac{K}{K_g})} \quad \dots(7.4)$$

$$v_u = \frac{3v+B(1-2v)(1-\frac{K}{K_g})}{3-B(1-2v)(1-\frac{K}{K_g})} \quad \dots(7.5)$$

7.2.3 Cálculos y Resultados del Flujo de Salmuera.

El cálculo de la permeabilidad, según los datos del cuadro 7.1 y sustituyendo los valores en las ecuaciones 7.3, 7.4 y 7.5 queda de la siguiente manera:

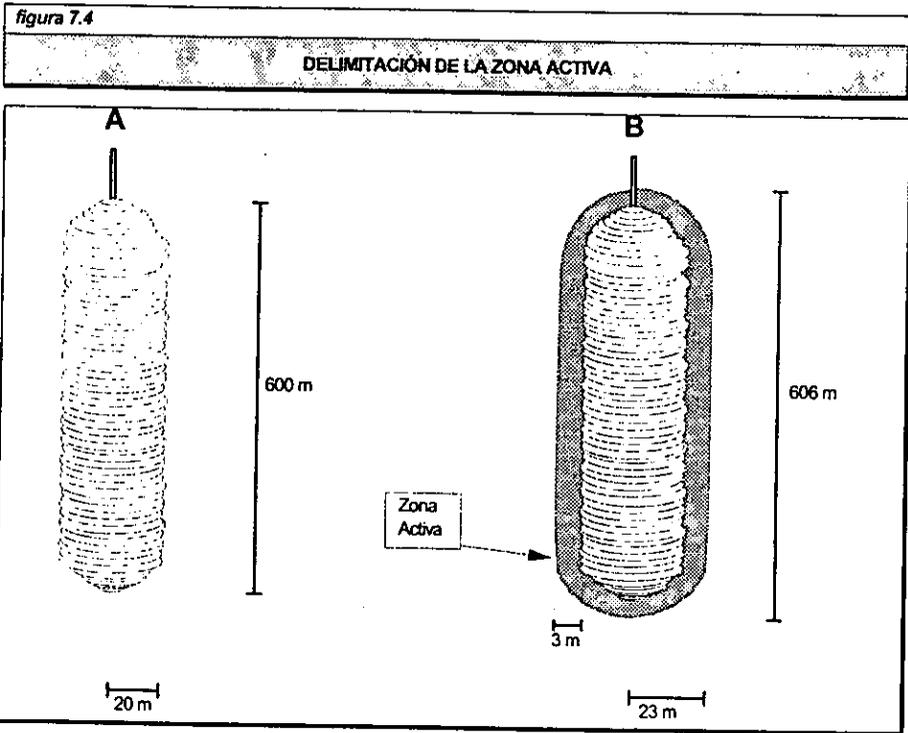
$$B=1.2426 \cdot 10^{-2}$$

$$v_u=0.2503$$

$$c=1.0781 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \dots(R.7.1)$$

El volumen de afluencia desde la zona activa puede ser estimado restando el volumen de la caverna de un volumen mayor que consiste en el radio de la cavidad más 3 m de la zona activa (figura 7.4).

cuadro 7.1			
PROPIEDADES MATERIALES ESTIMADAS PARA DOMOS SALINOS			
Propiedad	Valor	Símbolo	Unidades
Térmica			
Conductividad térmica	5	k	W/m·K
Difusividad térmica	$2.5 \cdot 10^{-6}$	λ	m
Elástica			
Módulo de drenado	20.7	K	GPa
Módulo de corte	$12.4 \cdot 10^2$	G	GPa
Relación de Poisson drenado	0.25	ν	
Módulo en el seno del fluido	2	K_f	GPa
Módulo del seno del sólido	23.5	K_s	GPa
Expansividad del fluido (28 °C)	$4.6 \cdot 10^{-1}$	α	
Expansividad del sólido	$1.2 \cdot 10^{-1}$	α_s	
Hidráulica			
Permeabilidad	10^{21} a 10^{20}	k	m^2
Porosidad	$1 \cdot 10^3$	ϕ_i	
Viscosidad del fluido (28 °C)	$1.6 \cdot 10^{-3}$	μ	Pa·s
Derivada			
Difusividad del fluido	$1.0781 \cdot 10^{-6}$	c	m^2/s
Relación de Poisson	0.25	ν_u	
Coefficiente de presión	0.93		
FUENTE: Domenico, P. A. and Lerman, A.; <i>Waste Containment in Domes Salt</i> ; Paper prepared for the Texas Water Commission; 1991.			



$$V_{\text{cilindro circular}} = \pi r^2 h \quad \dots(7.6)$$

Figura 7.4 A	Figura 7.4 B
$r=20 \text{ m}$	$r=23 \text{ m}$
$h=600 \text{ m}$	$h=606 \text{ m}$
$V_A=753,982.23 \text{ m}^3 \quad \dots(R.7.2.A)$	$V_B=1,007,112.92 \text{ m}^3 \quad \dots(R.7.2.B)$

Volumen de la zona activa:

$$V_{ZA} = V_B - V_A \quad \dots(7.7)$$

$$V_{ZA}=253,130.69 \text{ m}^3 \quad \dots(R.7.3)$$

De acuerdo a los datos recopilados en el sitio WIPP, en Texas, E. U.

Densidad de la masa salina	Densidad de la salmuera
$\rho_{ms} = 140 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 2242.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_{sal} = 65 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1041.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Masa total de la zona activa:

$$m_{ZA} = \delta_{ms} V_{ZA} \quad \dots(7.8)$$

$$m_{ZA}=565,670,876.6 \text{ kg} \quad \dots(R.7.4)$$

Masa total de la salmuera en la zona activa:

$$m_{sal} = m_{ZA}(0.002\%)\left(\frac{1}{100\%}\right) \quad \dots(7.9)$$

$$m_{sal}=11,353.41 \text{ kg} \quad \dots(R.7.5)$$

Volumen total de salmuera en la zona activa (que se considera presente al tiempo cero y que puede fluir al interior de la cavema):

$$V_{sal} = \frac{m_{sal}}{\delta_{sal}} \quad \dots(7.10)$$

$$V_{sal}=10.90 \text{ m}^3 \quad \dots(R.7.6)$$

Estos cálculos (y los posteriores de esta sección) tienen como base, que toda el agua medida en el domo salino se encuentra en estado líquido.

Ya se tiene entonces el agua (por salmuera incluida en el seno del domo salino) al tiempo cero del análisis y ahora se procede al cálculo del flujo de salmuera al tiempo mayor de cero, con el segundo modelo conceptual. El segundo modelo se basa en la gráfica adimensional de la gráfica 7.1 con la inherente suposición de un flujo en un medio poroso. Recalamos que no esperamos que un domo salino se comporte como un medio poroso y que los cálculos basados en la gráfica adimensional para este modelo sobrestiman la afluencia de la salmuera. Las variables usadas para el cálculo, son las siguientes:

Para el tiempo adimensional (θ)	Para el flujo adimensional (Φ)
$c=1.0781 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ $r_0=20 \text{ m}$	$P_0=18.6 \text{ MPa}=18.6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ $k=1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ $\mu=1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $r_0=20 \text{ m}$

La primera parte del cálculo, es expresar el tiempo de cálculo t (en el que se desea saber la afluencia de la salmuera), en segundos. Después, tomando la ecuación del tiempo adimensional:

$$\theta = \frac{1}{\left(\frac{r_0^2}{c}\right)} \quad \dots(7.1)$$

Para sintetizar el cálculo, tenemos que:

$$\frac{r_0^2}{c} = 371,007,189.4 \text{ s} \quad \dots(R.7.7)$$

Después de calcular el tiempo adimensional θ , se procede a localizar la abscisa sobre la curva y se determina la ordenada al origen Φ , que es el flujo adimensional, determinado por:

$$\Phi = \frac{q}{\left(\frac{P_0 k}{\mu r_0}\right)} \quad \dots(7.2)$$

Donde q , es la afluencia de la salmuera al tiempo dado. Para calcular esta afluencia de salmuera, se arregla la ecuación 7.2:

$$q = \Phi \left(\frac{P_0 k}{\mu r_0}\right) \quad \dots(7.11)$$

Para facilitar el cálculo, sintetizamos:

$$\frac{P_0 k}{\mu r_0} = 5.8125 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \dots(R.7.8)$$

Por lo que la afluencia tendrá unidades en $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Para calcular el volumen de afluencia en m^3 solamente, se usa la relación siguiente:

$$V_{\text{afluencia}} = S t \quad \dots(7.12)$$

Donde S es la superficie del cilindro considerado como la caverna de confinamiento, t es el tiempo de afluencia y q la afluencia de salmuera en el tiempo dado.

La superficie se calcula de acuerdo a:

	$S = 2\pi r h + 2\pi r^2$...(7.13)
	$r = r_0 = 20 \text{ m}$ $h = 600 \text{ m}$ $S = 77,911.49 \text{ m}^2$...(R.7.9)

Entonces, la salmuera total (líquido al cual se considera no enlazado químicamente con el NaCl) se calcula por:

$$V_{\text{salmuera total}} = V_{\text{sal}} + V_{\text{afluencia}} \quad \dots(7.14)$$

De acuerdo al procedimiento anterior, el volumen de afluencia estimado para diferentes tiempos, se muestra en el cuadro 7.2 (con el tiempo de cálculo expresado en años para una representación más clara).

Considerando que el volumen de la caverna (según R.7.2.A) es de 753,982.23 m³, entonces el volumen acumulado de salmuera en 10,000 años de confinamiento, equivale a menos del 6% del volumen total del confinamiento.

cuadro 7.2	
VOLUMEN DE AFLUENCIA DE SALMUERA A DIFERENTES TIEMPOS	
Tiempo (años)	Volumen Total (m ³)
0	10.90
10	279.23
100	1,472.31
1,000	7,970.04
10,000	43,357.74

En el capítulo VIII se mostrará el comportamiento a largo plazo y las conclusiones correspondientes a este estudio.

7.3 Transferencia de Masa en Estado Líquido.

7.3.1 Transporte Difusivo Fuera de la Caverna.

Se mencionó anteriormente que la difusión molecular es uno de los posibles mecanismos de transporte de residuos químicos fuera de las cavernas salinas. Para que la difusión se lleve a cabo, la salmuera debe primero infiltrarse en la caverna y disolver una porción de residuos sólidos. Además, el transporte difusivo de materiales peligrosos hacia el exterior de la caverna podría encontrar un flujo advectivo de salmuera al interior de la cavidad, después de algunas décadas de confinamiento, lo cual disminuiría el efecto de dicho flujo difusivo. Aún así, las más estrictas suposiciones se requieren para desarrollar un modelo de análisis confiable.

Primero suponemos que el transporte difusivo no es afectado por el flujo de salmuera en una caverna llena de residuos. También suponemos que existe un suficiente flujo de salmuera disponible para transformar al menos parte de los residuos sólidos a un estado acuoso inmediatamente después del cierre de caverna, indicando que el transporte difusivo puede tener lugar en los 10,000 años de confinamiento. De idéntica manera supondremos, como en el cálculo del flujo de salmuera, el espacio poroso interconectado está lleno de líquido, por lo que la difusión toma lugar continuamente en la fase acuosa.

Las velocidades de difusión de los residuos disueltos en la caverna se espera sean más rápidas en los espacios porosos, por lo tanto, la máxima concentración de residuos siempre estará en la pared de la cavidad (la diferencia esperada entre las velocidades de difusión es debida a que la porosidad en la caverna llena de residuos es mayor que en la roca salina).

En términos matemáticos esto significa que existe una fuente infinita y constante de solutos en la pared de la cavidad que están disponibles para que por difusión puedan entrar en el seno del domo salino (ver figura 7.5). Debemos recordar que la zona activa se encuentra en la pared original de la cavema y que el transporte difusivo dentro de esta zona será considerablemente más rápido que el dado a través de la roca salina sin perturbar.

El espesor de la zona activa ha sido estimado en 3 m aproximadamente. Entonces, para mayor seguridad, supondremos que en una zona activa de 3 m el transporte es instantáneo. Por lo que al tiempo cero, un estado constante de concentración máxima de contaminantes disueltos de los residuos ya existe 3 m afuera de la pared de la cavema y esto es una fuente de difusión constante durante un periodo de tiempo de 10,000 años. Pero, debido a la disminución del radio de la cavema en 3 o 4 m (como ya se analizó en la sección 7.2.2), observamos que el transporte de contaminantes en 10,000 años debe ser contenido en una zona de 30.5 m de radio. De esta manera, en el establecimiento de las condiciones de frontera para el problema de transferencia de residuos por difusión en la fase acuosa, el grado de aproximación es consistente con las suposiciones hechas para el flujo de salmuera.

7.3.2 Coeficiente Efectivo de Difusión.

En cualquier estudio del movimiento molecular en el seno de un medio sólido, la explicación de la transferencia de masa se centra en uno de los campos de mayor interés: la difusión de los gases o líquidos en los poros del sólido. La difusión en los poros se puede explicar por medio de tres mecanismos: difusión de Fick, difusión de Knudsen y difusión superficial. Si los poros son grandes y el fluido relativamente denso, la transferencia de masa se llevará a cabo por medio de una difusión de Fick. La difusión de Knudsen es descrita como el transporte molecular a través de los poros, los cuales

son pequeños en comparación con la trayectoria libre media del fluido. En la difusión superficial, las moléculas se adsorben sobre la superficie del material y después se transportan de un lugar a otro en la dirección del decrecimiento de la concentración^(34 y 55). Por lo que este caso de difusión molecular, se caracteriza por la difusión de Fick, debido a que supone mayores velocidades de difusión y por ende, una cuantificación más grande del riesgo asociado a estos confinamientos (aunque se enfatiza el hecho de que la porosidad de la masa salina es casi inexistente). Dentro de la masa salina, las trayectorias de difusión son como canales de forma irregular, por lo tanto el flujo es menor de lo que sería en poros uniformes de la misma longitud y radio promedio. Por otro lado, la magnitud del coeficiente depende de las variables que influyan en la fase de difusión, tales como la temperatura y la presión, así como de las propiedades de la masa salina. Esto implica serias dificultades para la determinación de un coeficiente efectivo de difusión. Algunas aproximaciones diferentes son utilizadas para definir el coeficiente de difusión en un medio poroso, todas las cuales son de la forma⁽¹⁹⁾:

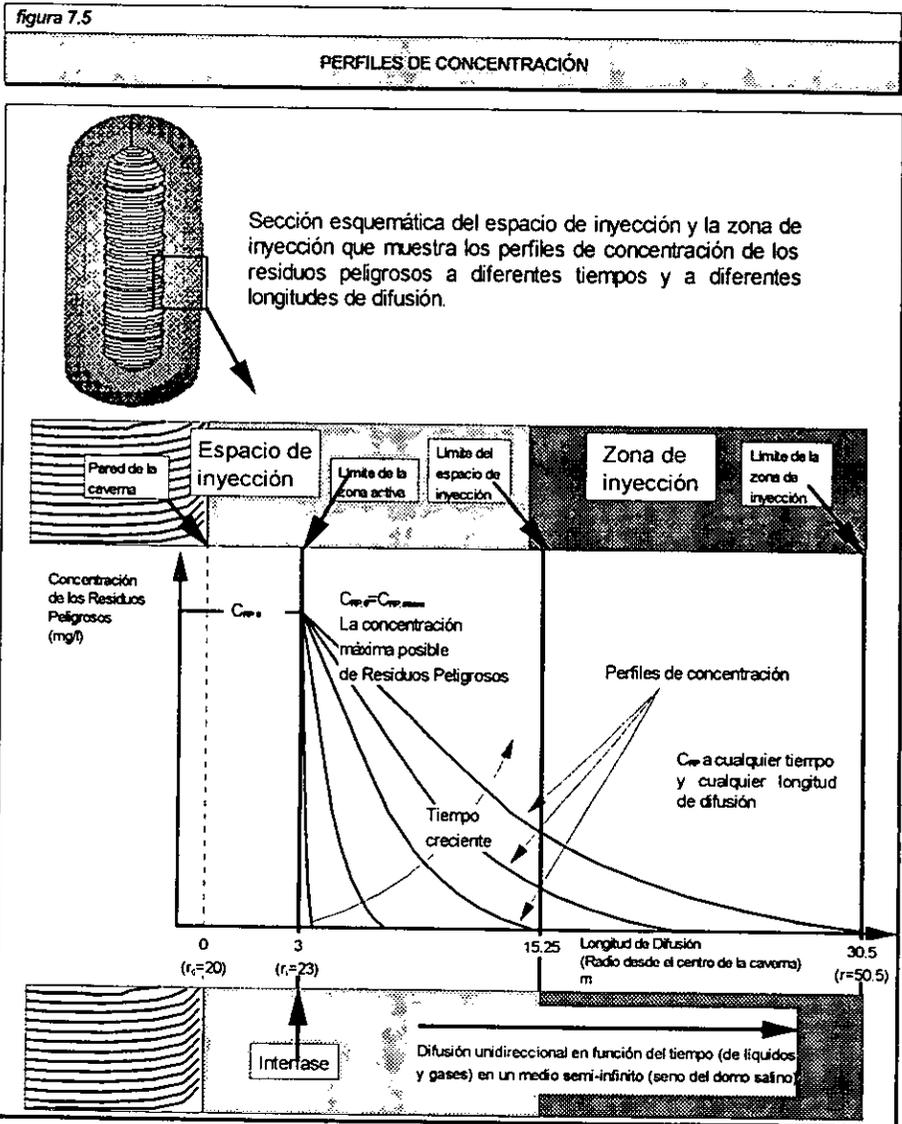
$$D = D_0 D' \quad \dots(7.15)$$

Donde D es el coeficiente molecular de difusión en un medio poroso, D_0 es el coeficiente de difusión en una solución libre y D' es alguna constante más pequeña que aquella considerada por la estructura del medio poroso. Este tipo de formulación es necesaria porque el coeficiente de difusión en un medio poroso es más pequeño que el coeficiente en un líquido puro, debido a las colisiones que tienen los iones o moléculas difundidas, con lo sólidos del medio que impiden la difusión. Frecuentemente, D' es tomado como la sinuosidad del medio por lo que:

$$D = \tau D_0 \quad \dots(7.16)$$

Donde τ es la tortuosidad (o torca), es decir, un factor que describe la relación entre la longitud real de la trayectoria del fluido y la longitud nominal del medio poroso. Los valores de torca para arcillas es de 0.1 hasta 0.7 para arenas⁽¹⁶⁾. Como las arcillas y las

sales son similares en la propiedad en la que ambos contienen un gran número de espacios porosos sin conectar, utilizaremos $\tau=0.1$ para la sal.



Esto significa que el coeficiente de difusión de los constituyentes de un cuerpo salino saturado es de 0.1 de su valor en agua. Otra aproximación para evaluar el coeficiente de difusión en un modelo poroso es considerar el parámetro D' como la porosidad dividida por la torca⁽¹⁹⁾, donde la torca $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ es un número mayor de 1. Así, con una porosidad de 0.001 (cuadro 7.5) y una torca de $10\left(\frac{1}{0.1}\right)$, el factor D' llegará a ser de $1 \cdot 10^{-4}$. Lo que significa que los coeficientes de difusión de los constituyentes disueltos en los cuerpos salinos son pequeñas fracciones de sus valores en salmuera libre. Como margen de seguridad, tomaremos a D' en un valor medio entre $1 \cdot 10^{-1}$ y $1 \cdot 10^{-4}$, como $D' = 6 \cdot 10^{-2}$.

Abundan las tabulaciones sobre coeficientes de difusión en la literatura. Lerman⁽²⁰⁾ reporta valores característicos en varios ambientes. Foust⁽²⁴⁾ da valores para compuestos orgánicos en agua variando desde $3.7 \cdot 10^{-10}$ hasta $1.5 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$. Li y Gregory⁽³²⁾ reportan valores para iones metálicos y aniones en agua, incluyendo Cr^{+3} , que generalmente son del orden de 10^{-10} hasta $10^{-9} \frac{m^2}{s}$. En soluciones diluidas como aguas de manantial y agua de océano, cercanas a los 25 °C, los coeficientes de difusión molecular de iones acuosos y gases comunes disueltos están en el rango que va desde $5 \cdot 10^{-10}$ hasta $2 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ (18).

A temperaturas cercanas a los 55 °C, que es la temperatura que se espera sea alcanzada en promedio en la caverna de confinamiento, los coeficientes y los flujos de difusión deben ser más altos de un factor de 2. Un efecto opuesto a la alta temperatura es el expresado por la alta concentración de sal en la salmuera: en soluciones saturadas con NaCl, los coeficientes de difusión de iones acuosos y gases son alrededor de $\frac{1}{2}$ a $\frac{2}{3}$ de sus valores en soluciones diluidas⁽³⁰⁾. En nuestro análisis el transporte difusivo subsecuentemente utilizado será:

$$D_0 = 8 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s} \text{ y } D = 0.06 \cdot 8 \cdot 10^{-10} = 4.8 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s} \quad \dots(R.7.10)$$

7.3.3 Longitud de Difusión.

En el caso de la transferencia de masa desde la pared salina, la magnitud del espacio de inyección y la zona de inyección son extremadamente pequeños en comparación con el tamaño del domo salino. Por lo mismo, se considera que la transferencia de masa se lleva a cabo de la pared de la caverna más 3 m de zona activa (interfase), al límite de la zona de inyección (a 30.5 m de la pared).

Este análisis puede delimitarse a una zona de geometría plana (como se observa en la figura 7.5), para no considerar la dispersión radial de residuos peligrosos que, por otro lado, reportaría valores menores de concentración radial en comparación un análisis de geometría plana (debido a que, al aumentar el radio de un cilindro, también aumenta el área de segregación de los residuos peligrosos y por ende, menor penetración en el macizo salino). Con esto se tiene la ventaja de un análisis con cálculos y consideraciones más estrictos en el estudio de la transferencia de masa de los residuos peligrosos. Consideremos ahora el problema de difusión en un medio semi-infinito donde el límite se mantiene a alguna concentración constante $C_{RP,0}$ y la concentración inicial en todo el medio es cero. El sistema es no permanente, también llamado a "régimen transiente" o en función del tiempo. Si definimos como C_{RP} la concentración de residuos peligrosos y D el coeficiente de difusión en la masa salina, entonces la solución corresponde a la transferencia de masa, tal como la define la segunda "ley" de Fick^(34 y 55).

$$\frac{\delta C_{RP}}{\delta t} = D \left[\frac{\delta^2 C_{RP}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 C_{RP}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 C_{RP}}{\delta z^2} \right] \quad \dots(7.17)$$

Dado que la difusión ocurre unidireccionalmente, entonces:

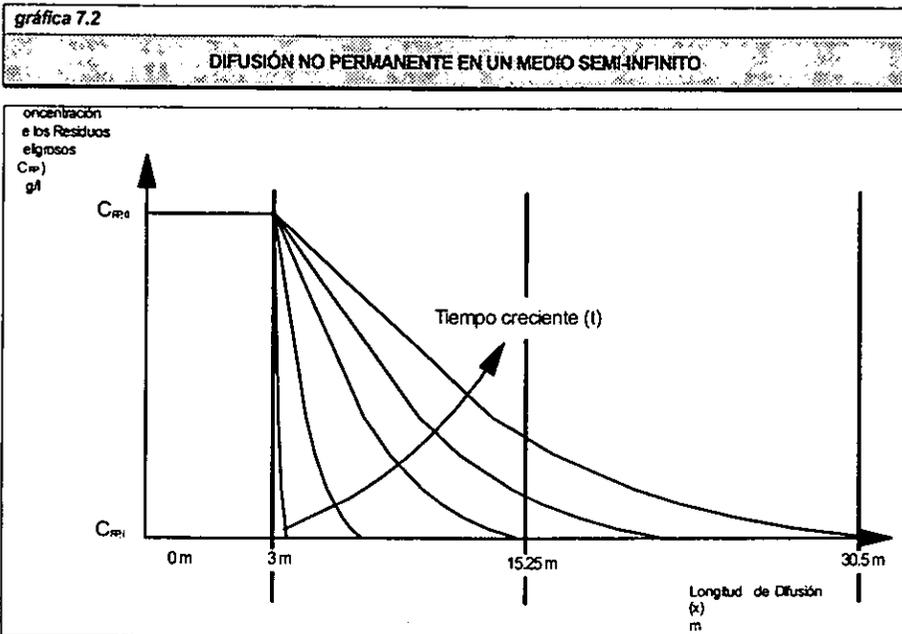
$$\frac{\delta C_{RP}}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C_{RP}}{\delta x^2} \quad \dots(7.18)$$

Esta ecuación diferencial parcial describe una situación física en la que no existe ninguna contribución por parte del movimiento global y ninguna reacción química. Esta situación se tiene cuando la difusión tiene lugar en los sólidos (como en este el caso), en

los líquidos estacionarios o en los sistemas que cuentan con contradifusión equimolar. Antes de proceder con la solución, la concentración se escribirá⁽³⁴⁾ en forma adimensional al definir una nueva variable, de acuerdo a la gráfica 7.2:

$$f = \frac{C_{RP} - C_{RP,i}}{C_{RP,0} - C_{RP,i}} \quad \dots(7.19)$$

Donde C_{RP} representa la concentración de residuos peligrosos a cualquier distancia y tiempo, $C_{RP,0}$ es la concentración de residuos peligrosos en la zona activa (que se denomina también como la fuente de difusión molecular) y $C_{RP,i}$ es la concentración de residuos peligrosos contenidos al tiempo cero en el seno del domo salino (fuera de la zona activa). Debido que el domo salino no tiene alguna concentración de residuos peligrosos antes de que éstos sean introducidos en él, este parámetro tiene un valor de cero.



Por lo que, la variable definida como f , finalmente se muestra de la manera siguiente sustituyendo con la consideración anterior.

$$f = \frac{C_{RP}-0}{C_{RP,0}-0} = \frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} \quad \dots(7.20)$$

En la definición de variables, debe considerarse que la zona activa resta 3 m a la longitud de difusión total x (figura 7.5 y gráfica 7.2: $x=30.5-3=27.5$ m), por lo que entonces consideraremos a x la distancia total del límite de la zona activa (definida como interfase en la figura 7.5) al límite de la zona de inyección. Entonces, las condiciones a la frontera quedan definidas de la siguiente manera:

C.F.A1	$C_{RP}=C_{RP,0}$, en	$t=0$	$x=0$
C.F.A2	$C_{RP}=C_{RP,0}$, en	$t>0$	$x=0$
C.F.A3	$C_{RP} \rightarrow C_{RP,0}$, cuando	$t \rightarrow 0$	a toda x

Si escribimos la concentración como se muestra en la ecuación 7.20, la ecuación diferencial 7.19 es adimensional y con condiciones limitantes homogéneas. Después de introducir la variable adimensional dada por la ecuación dicha, la ecuación 7.19 se puede escribir así:

$$\frac{\delta f}{\delta t} = D \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} \quad \dots(7.21)$$

Con las nuevas condiciones limitantes:

C.F.B1	$f=1$, en	$t=0$	$x=0$
C.F.B2	$C_{RP}=C_{RP,0}$, en	$t>0$	$x=0$
C.F.B3	$C_{RP} \rightarrow C_{RP,0}$, cuando	$t \rightarrow 0$	a toda x

La ecuación 7.21 se puede transformar a una ecuación diferencial ordinaria con sólo combinar las variables x y t en términos de la variable de similitud siguiente:

$$\eta = \frac{x}{(4Dt)^{1/2}} = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad \dots(7.22)$$

Sustituyendo la variable de similitud en la ecuación 7.21 y transformándola a una ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{\delta f}{\delta x} = \frac{\delta f}{\delta \eta} \frac{\delta \eta}{\delta x} \quad \dots(7.23)$$

$$\frac{\delta^2 f}{\delta x^2} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta f}{\delta x} \right) = \frac{d^2 f}{d\eta^2} \left(\frac{\delta \eta}{\delta x} \right)^2 \quad \dots(7.24)$$

$$y \quad \frac{\delta f}{\delta t} = \frac{df}{d\eta} \left(\frac{\delta \eta}{\delta t} \right) \quad \dots(7.25)$$

Después de extraer la derivada de η con respecto a la variable apropiada y sustituir esos valores en las ecuaciones 7.24 y 7.25, tenemos:

$$\frac{d^2 f}{d\eta^2} + 2\eta \frac{df}{d\eta} = 0 \quad \dots(7.26)$$

Las nuevas condiciones limitantes, que también se obtienen con la transformación de similitud son:

C.F.C1	$f=0, a$	$\eta=\infty$
C.F.C2	$f=1, a$	$\eta=0$

Debería notarse que, continuando la transferencia, sólo quedan dos opciones limitantes independientes.

Para resolver la ecuación 7.26 se define que $\psi = \frac{df}{d\eta}$. Así que:

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{df}{d\eta} \right) + 2\eta \left(\frac{df}{d\eta} \right) = \frac{d\psi}{d\eta} + 2\eta\psi = 0 \quad \dots(7.27)$$

Resolviendo la ecuación diferencial por variables separables:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{d\eta} &= -2\eta\psi \\ &= \int \frac{d\psi}{\psi} = -2 \int \eta d\eta \\ &= \ln \psi = -2 \left(\frac{\eta^2}{2} \right) + c \\ &= e^{\ln \psi} = e^{-\eta^2 + c} \\ &= \psi = e^c e^{-\eta^2} \quad \text{si } e^c = c_1 \\ \psi &= c_1 e^{-\eta^2} \quad \dots(7.28) \end{aligned}$$

Sustituyendo $\frac{df}{d\eta} = \psi$ e integrando por segunda vez:

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\eta} &= c_1 e^{-\eta^2} \\ &= \frac{df}{d\eta} = c_1 e^{-\eta^2} \\ &= \int df = c_1 \int e^{-\eta^2} d\eta \end{aligned}$$

$$f = c_1 \int e^{-\eta^2} d\eta + c_2 \quad \dots(7.29)$$

Sustituyendo la condición a la frontera C.F.C2 en 7.29.

$$1 = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta + c_2$$

$$c_2 = 1 \quad \dots(7.30)$$

Sustituyendo la condición a la frontera C.F.C1 en 7.29.

$$0 = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta + 1$$

$$c_1 = -\frac{1}{\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta} \quad \dots(7.31)$$

La función $\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta$ se redefine según las tablas de integración infinita⁽¹³⁾ como $\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta = \sqrt{\pi}$.

Entonces la ecuación 7.31 queda:

$$c_1 = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad \dots(7.32)$$

Sustituyendo las ecuaciones 7.30 y 7.32 en la 7.29.

$$f = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} d\eta \quad \dots(7.33)$$

La integral está relacionada con una forma que se encuentra a menudo llamada *función de error*, que se define como:

$$\text{fer}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} d\eta \quad \dots(7.34)$$

Por lo que la ecuación queda:

$$f = 1 - \text{fer}(\eta) \quad \dots(7.35)$$

Sustituyendo 7.20 en 7.35.

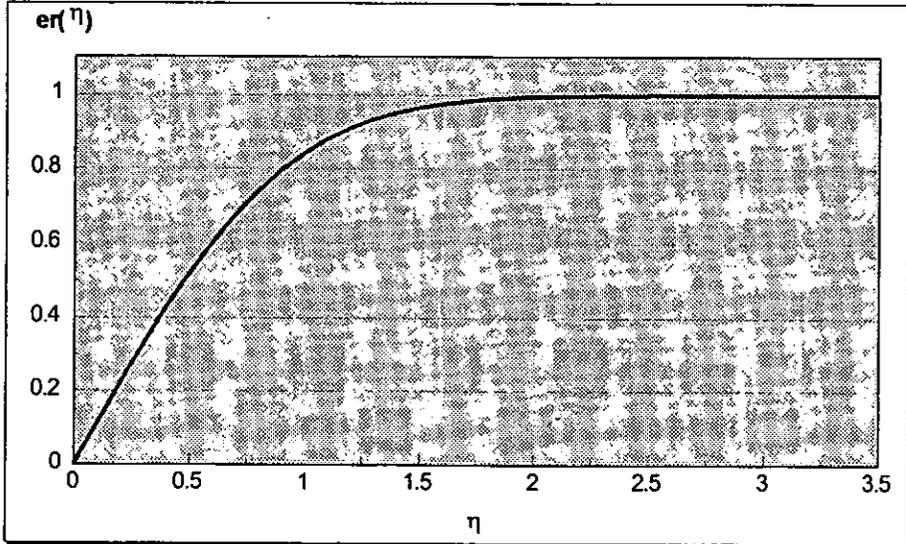
$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1 - \text{fer}(\eta) \quad \dots(7.36)$$

Finalmente, se cambia la variable de similitud $\eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ y entonces la ecuación final se especifica como::

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1 - \text{fer}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots(7.37)$$

figura 7.6

GRÁFICA DE LA FUNCIÓN ERROR DE GAUSS Y TABULACIÓN CORRESPONDIENTE



η	er(η)	η	er(η)	η	er(η)
0.00	0.0000	0.4	0.4284	1.3	0.9340
0.01	0.0113	0.5	0.5205	1.4	0.9523
0.02	0.0226	0.6	0.6039	1.5	0.9661
0.04	0.0451	0.7	0.6778	1.6	0.9763
0.06	0.0676	0.8	0.7421	1.8	0.9891
0.08	0.0901	0.9	0.7969	2.0	0.9953
0.10	0.1125	1.0	0.8427	2.2	0.9981
0.20	0.2227	1.1	0.8802	2.5	0.9996
0.30	0.3286	1.2	0.9103	→∞	1.0000

FUENTE: Maddox, Robert N. y Hines, Anthony L.; Transferencia de Masa; Prentice Hall; México; 1987.

Al redefinir las variables tenemos a C_{RP} como la concentración de residuos peligrosos a cualquier distancia x (de la interfase al límite de la zona de inyección) al tiempo t , D es el coeficiente efectivo de difusión y $C_{RP,0}$ es la concentración inicial de residuos peligrosos (concentración en la zona activa). La función de error aparece en la figura 7.6.

Ahora podemos calcular la concentración relativa con los datos que se especifican en la siguiente tabulación. De esta manera, queda definida x (como se observa en la figura 7.5) como la distancia total a partir de la pared salina (más 3 m de zona activa) a los límites de la zona de inyección.

$x=30.5-3=27.5$ m $D=4.8 \cdot 10^{-11}$ m ² /s $t=10,000$ años = $3.1536 \cdot 10^{11}$ s	(según R.7.10)
---	----------------

Sustituyendo en 7.37, queda:

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1 - \text{erf}(3.5340) \quad \dots(7.38)$$

Extrapolando sobre los datos de la figura 7.6, tenemos que:

$$\text{erf}(3.5340)=0.9999655466 \quad \dots(R.7.11)$$

Entonces, la ecuación 7.38 queda:

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1 - 0.999965546$$

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 3.44 \cdot 10^{-5} \quad \dots(7.39)$$

$$C_{RP}=3.44 \cdot 10^{-5} C_{RP,0} \quad \dots(7.40)$$

De esta manera, la ecuación 7.40 en el límite indica que la concentración inicial ha sido reducida por un factor de $3.44 \cdot 10^{-5}$. Esta reducción en la concentración es llamada *atenuación* y será analizada en las siguientes secciones con más detalle.

cuadro 7.2	
PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y DE TRANSPORTE DE UN MODELO DE CAVIDAD CILÍNDRICA EN UN DOMO SALINO	
Caverna cilíndrica.	radio $r_0=20$ m altura $h=600$ m volumen= $753,982.23$ m ³ porosidad ϕ_0 (post-cerrado)=0.1 volumen insaturado= $0.1 \cdot 753,982.23=75,398.223$ m ³
Tiempo de confinamiento.	$t=10,000$ años= $3.1536 \cdot 10^{11}$ s
Distancia de la pared de la caverna a la zona llímite de inyección.	$r-r_0=30.5$ m

cuadro 7.2 (continuación)

Temperatura en la roca salina.	45 °C (318 K) en el nivel superior 55 °C (328 K) en el nivel intermedio 66 °C (339 K) en el nivel inferior
Presión hidrostática	5.4 MPa en el nivel superior 8.9 MPa en el nivel intermedio 12.5 MPa en el nivel inferior
Presión litostática	11.5 MPa en el nivel superior
Salmuera saturada de NaCl, concentración.	26% (10 °C) a 27% (65 °C) peso 6.11 (10 °C) a 6.37 (65 °C) (gmoles NaCl)/(kg H ₂ O) 6.29 (gmoles NaCl)/(kg H ₂ O) 55 °C
Densidad.	1.20 (10 a 15 °C), 1.18 (55 °C) [unidades 10 ³ kg/m ³]
Viscosidad (NaCl 5 molar). (Salmuera WIPP.)	2.21 (10 °C), 1.36 (25 °C), 0.94 (50 °C), 0.81 (60 °C) [unidades 10 ⁻³ Pa·s] (1.6·10 ⁻³ Pa·s)
Roca salina.	permeabilidad $k=10^{-21}$ m ² porosidad $\phi_1=0.001$
Constante de los gases.	R=82.06 (atm·cm ³)/(gmoles·K) =0.08315 (bar·litros)/(gmoles·°C) =8.315 (Pa·m ³)/(gmoles·°C) =8.315·10 ⁻⁵ (bar·m ³)/(gmoles·°C) =8.315·10 ⁻⁶ (MPa·m ³)/(gmoles·°C)

FUENTE: Domenico, P. A. and Leman, A.; *Waste Containment in Dornal Salt*; Paper prepared for the Texas Water Commission; 1991.

La reducción de la concentración como se indica en la ecuación 7.40 significa que a una concentración inicial $C_{RP,0}$ tan alta como $1 \cdot 10^8$ ppb ($1 \cdot 10^5 \frac{mg}{l}$) en la cavidad será reducida a $3.44 \cdot 10^4$ ppb ($34.45 \frac{mg}{l}$) en 30.5 m desde la pared de la cavema en unos 10,000 años de tiempo de transporte. Para la mayoría de los constituyentes, un estándar genérico de salud es 1 ppb el cual es el límite aproximado de detección⁽³³⁾. Para las concentraciones de solubilidad limitada, la concentración inicial $C_{RP,0}$ es aproximada por su máxima solubilidad en la salmuera de la pared de la cavema, la cual nunca se acerca a $1 \cdot 10^8$ ppb. Esto es demostrado en el cuadro 7.3, que nos muestra las solubilidades de muchos de los contaminantes más comunes.

Tomando la solubilidad de 1-2-Dicloroetano como $8.690 \cdot 10^6$ ppb ($8,690 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$), la concentración en el límite de la zona de inyección de la cavema se calcula por la ecuación 7.40 y el resultado es $C_{RP} = 299.40$ ppb ($0.29 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$).

cuadro 7.3
COMPONENTES DE RESIDUOS Y SUS LÍMITES DE SOLUBILIDAD

Componente	Límite de Solubilidad (mg/l) ¹	Componente	Límite de Solubilidad (mg/l) ¹
Benceno	820-1,600	1,1,1-Tricloroetano	480-4,400
Bromoformo	3,010-3,190	1,1,2-Tricloroetano	4,500
Tetracloruro de carbono	785	Cloruro de vinilo	1,100
Clorobenceno	448-500	Fenol (total)	1.1-60
Clorodibromometano	-	Fenol (total)	-
Cloroetano	5,740	Cianuro (total)	0.0054
Cloroetilvinil eter ²⁾	15,000	2,4,6-Triclorofenol	-
Cloroformo	8,200	Arsénico	$2.1 \cdot 10^6$
Diclorobromometano	-	Hierro	0.0098
1,1-Dicloroetano	5,500	Cobre	0.10554
1,2-Dicloroetano	8,690	Plomo	20.58
1,1-Dicloroetileno	400	Zinc	$2.063 \cdot 10^7$
1,2-Dicloropropano	2,700	Mercurio	$2.307 \cdot 10^{21}$
1,3-Dicloropropileno	2,700-2,800	Niquel	-
Etilbenceno	152	Bario	0.563
Bromuro de metilo	900	Cadmio	-
Cloruro de metilo	6,450-7,250	Cromo	$2.61 \cdot 10^4$
1,1,2,2-Tetracloroetano	2,900	Manganeso	N/A
Tetracloroetileno	150-200	Plata	$3.46 \cdot 10^9$
Tolueno	534	Selenio	Soluble
1,2-Trans-Dicloroetileno	600		

1. Límites de solubilidad para sustancias inorgánicas son calculadas utilizando EQ3-Pitzer.
2. Inestable en agua.

FUENTE: Becerra Albarrán, J. y Navarrete Rodríguez M.; *Recopilación, Aplicación y Evaluación de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación para el Tratamiento de Residuos Peligrosos*; Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Químicos; México; Enero de 1993

7.3.4 Atenuación en la Zona Límite de Inyección.

El transporte de un contaminante disuelto fue discutido anteriormente, mostrando que la difusión molecular desde el límite mantenida a una concentración constante produciría una concentración de aproximadamente $3.44 \cdot 10^{-5}$ del valor inicial a una distancia de

30.5 m de la pared de la caverna (27.5 m de la interfase) después de 10,000 años. La forma de la caverna se ha tomado como cilíndrica circular lo que permite tener un modelo simple en una dimensión. En cada modelo, los contaminantes pueden ser liberados a la salmuera que llena los espacios porosos de la caverna por disolución o por lixiviado de los residuos. La misma suposición sobre una concentración constante de contaminante en toda la caverna y en los 3 m de zona activa después de la pared de la caverna ($C_{RP,0}$), que fue discutida en el punto 7.3.3, se aplica al modelo cilíndrico. Por último, se estima la proporción de la concentración $\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}}$ en el límite de la zona de inyección, concéntrica a la pared del cilindro y a una distancia de 30.5 m de la pared de la caverna (27.5 m desde la interfase), a un tiempo de 10,000 años después de iniciada la migración del contaminante. Los fundamentos de este modelo también se muestran en la figura 7.5, donde la distancia de la pared de la caverna al límite de la zona de inyección (30.5 m) y el tiempo de confinamiento (10,000 años) son condiciones impuestas por los principios regulatorios.

A cualquier distancia desde el límite, la concentración del contaminante difusivo debe ser menor que en la pared de la caverna y la proporción $\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}}$ debe ser más pequeña que la unidad. La proporción $\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}}$ es el valor atenuado de la concentración inicial de algún tiempo y distancia específicos desde la fuente. Para valores pequeños, $\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}}$ es llamado atenuación. La atenuación en la zona límite de inyección en 10,000 años se calcula utilizando el modelo de una dimensión dado anteriormente.

Con referencia en el modelo mostrado en la figura 7.5, la concentración constante de un contaminante disuelto ($C_{RP,0}$) que se encuentra en la pared de la cavidad, a una distancia igual al radio del cilindro (r_0) hasta la interfase de la zona activa (r_1 , a 3 m de la pared de la caverna, o definiéndolo numéricamente: $r_1=23$ m) desde el centro de la sección transversal circular. La zona de atenuación es:

$$r_1=23 \text{ m}$$

...(R.7.12.A)

$$r-(r_0+3m)=50.5-(20+3)=27.5 \text{ m} \quad \dots(\text{R.7.12.B})$$

$$r-r_i=50.5-23= 27.5 \text{ m} \quad \dots(\text{R.7.12.C})$$

Y el valor de la concentración C_{RP} es calculado a la distancia r desde el centro de la caverna, al tiempo $t=10,000$ años. Para el modelo de transporte en una dimensión y de acuerdo a la ecuación 7.37 con la referido arriba:

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1 - \text{erf}\left(\frac{r-r_i}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots(7.41)$$

Para valores específicos del sistema de geometría (r_i , r_0 y r) y el tiempo t , un rango de valores del coeficiente de difusión D puede utilizarse para obtenerse un rango de atenuaciones $\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}}$ como se muestra en la figura 7.5 (y que se mostrará ampliamente en el capítulo VIII). El resultado del modelo unidimensional-cilíndrico de la ecuación de atenuación 7.41, muestra que, para coeficientes efectivos de difusión de $D=4.8 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, una atenuación más fuerte que 10^{-4} a 10^{-5} se obtendrá en el límite de la zona de inyección. En otras palabras, la concentración del contaminante difundido después de 10,000 años será menor que $\frac{1}{10,000}$ de su concentración en la salmuera a la longitud de difusión propuesta.

7.3.5 Masa Acumulada del Contaminante Liberado.

Explicación.

La difusión molecular de un contaminante disuelto desde la pared de la cavidad hasta el límite de la zona de inyección (30.5 m), en un período de 10,000 años, transporta una cierta cantidad de masa contaminante al exterior de la caverna. Los resultados que muestran que la atenuación fuerte de la concentración del contaminante es anticipada dentro de la zona de inyección. Aquí queremos estimar la masa acumulada liberada desde la caverna como una fracción de la masa permanente de los contaminantes disueltos en la salmuera dentro de los espacios porosos de la cavidad.

Es necesario recordar, que tanto en la fuente de contaminantes en el modelo de transporte difusivo como en la atenuación, la concentración fue constante ($C_{RP,0}$ en r_0) en la salmuera de la pared de la cavema. Aunque nuestros cálculos muestran que la saturación de los espacios porosos de la cavema con salmuera no se espera que llegue a ocurrir. Un modelo seguro requiere una fuente homogénea de contaminante disuelto en la salmuera dentro de la cavema. La masa permanente del contaminante disuelto o lixiviado dentro de los espacios porosos ($M_{RP,0}$) es la fuente de masa contaminante que podría ser transportada desde la pared de la cavema hacia el exterior en un período de 10,000 años ($M_{RP,1}$). Por lo que, la proporción $\frac{M_{RP,1}}{M_{RP,0}}$ es una fracción de la masa del contaminante disuelto dentro de la cavema que ha migrado al exterior de la roca salina. Esta fracción depende únicamente de las características de transporte del sistema salmuera-sal, pero nunca tiene en cuenta alguna característica química de los sistemas salmuera-contaminante, tal como la naturaleza del residuo o de las fases del contaminante, o de las solubilidades de alguno de los contaminantes que se encuentran en los residuos.

Modelos y parámetros.

La fuente de masa contaminante, contenida dentro de un área transversal a lo largo del radio del cilindro entre el centro y la pared es:

$$M_{RP,0} = \phi_0 C_{RP,0} r_0 \quad \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \right) \quad \dots(7.42)$$

Donde ϕ_0 es la fracción de salmuera en los espacios porosos de la cavidad, $C_{RP,0}$ es la concentración uniforme del contaminante en la salmuera de la cavema y en la pared de la cavidad, r_0 es el radio de la cavema. El flujo difusivo de un contaminante disuelto desde la pared de un cilindro circular hasta el exterior es:

$$F = \phi_1 D \left[\frac{dC_{RP}}{dr} \right]_{r=r_0} \quad \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right) \quad \dots(7.43)$$

Donde ϕ_1 es la porosidad de la roca salina al exterior de la pared de la cavidad. La masa contaminante ($M_{RP,1}$) transportada en 10,000 años por difusión en la salmuera desde la interfase hacia el exterior, es una integral del flujo con respecto al tiempo:

$$M_{RP,1} = \int_0^{10^4} F dt = \frac{r_0^2}{D} \int_0^Y F dY \quad \dots(7.44)$$

En donde:

$$Y = \frac{Dt}{r_0^2} \quad \dots(7.45)$$

Para la integración de la ecuación 7.44 utilizamos la forma explícita de la ecuación de flujo en la pared de un cilindro, que es válida para valores pequeños de la ecuación 7.45.

La masa acumulada que ha emigrado al exterior de la caverna en 10,000 años es:

$$M_{RP,1} = \phi_1 C_{RP,0} r_0 \left[\frac{2Y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\pi}} + \frac{Y}{2} - \frac{Y^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{\pi}} + \frac{Y^2}{16} \dots \right] \left(\frac{mg}{m^2} \right) \quad \dots(7.46)$$

La fracción de masa liberada es la proporción $\frac{M_{RP,1}}{M_{RP,0}}$:

$$\frac{M_{RP,1}}{M_{RP,0}} = \frac{\phi_1}{\phi_0} \left[\frac{2Y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\pi}} + \frac{Y}{2} - \frac{Y^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{\pi}} + \frac{Y^2}{16} \dots \right] \quad \dots(7.47)$$

La ecuación 7.47, dados un radio de interfase y tiempo de transporte ($r_0=20$ m y $t=10,000$ años), muestra que la liberación de masa acumulada se incrementa al aumentar el valor del coeficiente efectivo de difusión D y que también depende de la proporción entre la porosidad de la roca y la porosidad de la caverna, $\frac{\phi_1}{\phi_0}$. La porosidad de la roca-sal es la más baja, es decir, lo menos que el contaminante migrante podría alojar en 10,000 años. Nuestras estimaciones seguras están basadas en los valores característicos del coeficiente efectivo de difusión D y la porosidad de la roca-sal ϕ_1 que utilizamos en las secciones anteriores y son repetidas a continuación:

$r_0=20$ m $D=4.8 \cdot 10^{-11}$ m ² /s $t=10,000$ años = $3.1536 \cdot 10^{11}$ s	(según R.7.10)	$\phi_0=0.1$ $\phi_1=0.001$
--	----------------	--------------------------------

El cálculo de Y sustituyendo las condiciones anteriores en la ecuación 7.45 queda:

$$Y = 0.0378432 \quad \dots(R.7.13)$$

Resultados.

De la ecuación 7.47, la masa acumulada del contaminante en el exterior de la caverna, 10,000 años desde que comenzó la migración y sustituyendo todos los parámetros anteriores es:

$$\frac{M_{RP,1}}{M_{RP,0}} = 2.3782 * 10^{-3} \rightarrow 0.23782\% \quad \dots(7.48)$$

Este resultado muestra que sólo una pequeña fracción, menor al 0.3%, de la masa contaminante disuelta en la salmuera del poro dentro de la caverna, migraría al exterior de la cavidad en un período de 10,000 años. La porosidad de la roca salina al exterior de la cavidad y características del espacio poroso son los factores principales que retardan la migración del contaminante disuelto desde la pared de la caverna hasta la zona de inyección, cuando la longitud del tiempo de proceso de migración y las dimensiones físicas del sistema han sido estipuladas con anticipación.

Capítulo VIII

Seguridad a Largo Plazo de una Cavema Salina para el Confinamiento de Residuos Peligrosos.

"La mayor parte de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos."

Albert Einstein

(1879-1955), físico germano-estadounidense.

8.1 Introducción.

En este capítulo se resume y profundiza en los cálculos mostrados en el capítulo VII, con los cuales se pretende demostrar la seguridad inherente a un confinamiento de residuos peligrosos de este tipo. En este contexto, podemos resumir que existen tres tipos de análisis de transferencia de masa que son factibles de estudio a través del tiempo (en el orden de miles de años). Tales casos son el de *flujo de salmuera en la caverna*, *transferencia de masa en estado líquido* y *transferencia de masa en estado gaseoso* (de los cuales sus fundamentos, desarrollo de modelos y parámetros fueron ampliamente analizados en el capítulo VII).

De tal manera y de acuerdo con el requisito de "no migración" para confinamientos de este tipo según la EPA⁽²³⁾, los análisis que se presentarán a continuación tendrán un parámetro de tiempo de comparación y estudio de 10,000 años (de los cuales, muchos se han hecho ya en el capítulo VII). Estos análisis también mostrarán el comportamiento detallado de los fenómenos de transferencia de masa a través del tiempo (en su caso), o a través de la longitud de difusión (de la pared de la caverna al límite de la zona de inyección).

8.2 Análisis del Flujo de Salmuera.

Mediante el análisis presentado en la sección 7.2 en el capítulo VII y con el mismo procedimiento de cálculo, se obtienen los datos del cuadro 8.1. Podemos observar que el volumen de afluencia a 10,000 años de confinamiento corresponde a menos del 6% del volumen total de la caverna. La tendencia de la afluencia (gráfica 8.1) muestra un crecimiento riesgoso de este flujo. El modelo conceptual supone que existe una fuente inagotable de salmuera en el ilimitado espacio poroso interconectado de las rocas salinas. En todos los domos salinos sucede el caso contrario. Gradientes de presión a grandes distancias no pueden ser establecidos o conservados en un bajo rendimiento en rocas de permeabilidad del orden de 10^{-20} a 10^{-21} m². En la ausencia de un sistema de flujo lejano, únicamente las rocas en vecindad con la caverna pueden contribuir a la afluencia. Adicionalmente, la salmuera con 0.002% en peso de los dos tipos de agua (libre y químicamente enlazada), no es lo suficientemente importante como para soportar la afluencia en estas rocas.

Por otro lado, se ha establecido que la caverna después de ser sellada, tendrá una modificación en su forma por el deslizamiento de la sal, llenando los espacios vacíos del confinamiento, envolviendo e integrando completamente el residuo solidificado a su estructura. Desde esta perspectiva, determinamos que después de un cierto tiempo no existirá el gradiente de presiones necesario para crear la afluencia de salmuera del seno del domo salino al interior de la caverna.

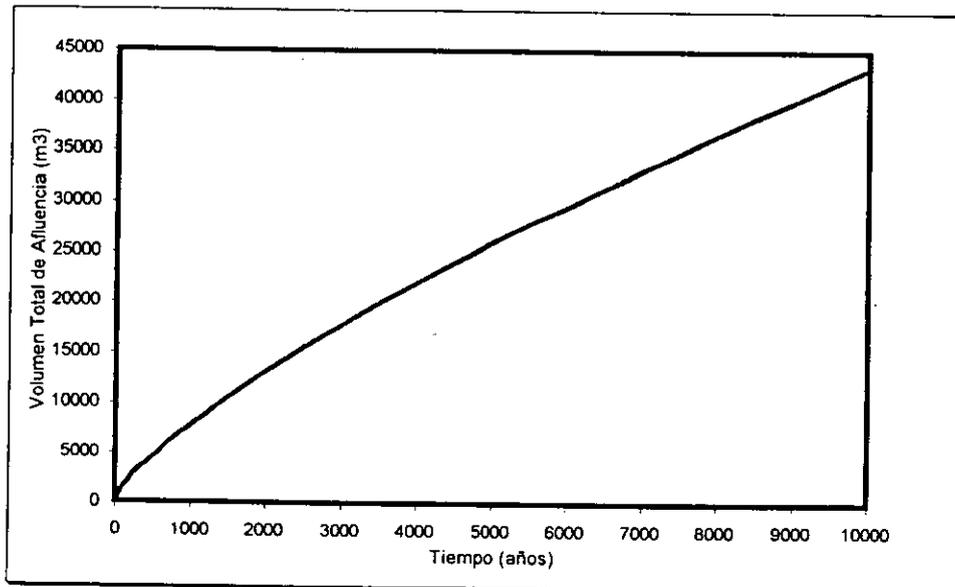
cuadro 8.1			
VOLUMEN TOTAL DE FLUJO DE SALMUERA			
Tiempo (años)	V _{afluencia} (m ³)	V _{salmuera total} (m ³)	V _{salmuera total} /V _{caverna} *100%
0	0	10.90	1.44*10 ⁻³
10	268.33	279.23	0.0370
20	446.96	457.86	0.0607
30	602.40	613.30	0.0813
40	744.48	755.38	0.1001
50	877.38	888.28	0.1178
60	1,003.40	1,014.30	0.1345

cuadro 8.1 (continuación)

Tiempo (años)	$V_{\text{afluencia}} \text{ (m}^3\text{)}$	$V_{\text{salmuera total}} \text{ (m}^3\text{)}$	$V_{\text{salmuera total}} / N_{\text{cavidad}} \cdot 100\%$
70	1,123.96	1,134.86	0.1505
80	1,240.05	1,250.95	0.1659
90	1,352.36	1,363.26	0.1808
100	1,461.49	1,472.31	0.1952
150	1,969.67	1,980.57	0.2626
200	2,434.22	2,445.12	0.3242
300	3,280.80	3,291.70	0.4365
400	4,054.58	4,065.48	0.5362
500	4,778.38	4,789.28	0.6351
600	5,464.68	5,475.58	0.7262
700	6,121.30	6,132.20	0.8133
800	6,753.54	6,764.44	0.8971
900	7,365.20	7,376.10	0.9782
1,000	7,959.14	7,970.04	1.0570
2,000	13,257.19	13,268.09	1.7597
3,000	17,867.79	17,878.69	2.3712
4,000	22,081.94	22,092.84	2.9301
5,000	26,023.87	26,034.77	3.4529
6,000	29,761.61	29,772.51	3.9487
7,000	33,337.68	33,348.58	4.4229
8,000	36,780.94	36,791.84	4.8796
9,000	40,112.13	40,123.03	5.3214
10,000	43,346.84	43,357.74	5.7504

gráfica 8.1

VOLUMEN TOTAL DE FLUJO DE SALMUERA



Aún con la afluencia creciente que se observa en la gráfica 8.1, el porcentaje referido al volumen de afluencia por el volumen de la caverna no sufre de grandes variaciones a través del tiempo. Sin embargo, el establecimiento de estas bases de riesgo para la posible lixiviación de los residuos peligrosos contenidos en el domo salino por la afluencia de salmuera (ya sea como agua libre o químicamente enlazada) permite definir que tal riesgo es mínimo, en comparación con la peligrosidad asociada a otro tipo de confinamientos (como los cementerios industriales).

Concluimos que no hay potencial para el establecimiento de presiones de fluido en la caverna, aún en exceso de estas alrededor del confinamiento salino. En su lugar, existen en la caverna largas fracciones insaturadas de espacios porosos, que podrían indicar una salida potencial para la migración del gas. Como una analogía remota, esto podría ser comparado con un sitio de los residuos peligrosos que está libre de infiltraciones y procesos de lixiviación.

8.3 Transferencia de Masa en Estado Líquido.

Dentro de este tipo de transporte, existen dos casos para analizar a través del tiempo. Uno de ellos, es la longitud de difusión y otro es la masa acumulada de contaminante liberado. Dentro del primero, podemos establecer el cálculo del tiempo en el cual la concentración de un contaminante difundido será de 1 ppb (límite de detección) siendo su concentración tan alta como la del 1,2-Dicloroetano. Como en la sección anterior, los cálculos están basados en un período de tiempo de 10,000 años.

8.3.1 Longitud de Difusión.

Utilizando el mismo procedimiento de cálculo de las secciones 7.3.3 y 7.3.4 y realizando la consideración de la zona activa, tenemos los datos del cuadro 8.2 y la gráfica 8.2. Como podemos observar en la gráfica, la *atenuación* es definida, después de los 3 m de la zona activa desde la pared de la caverna. Esta atenuación es claramente acelerada antes de los 15.25 m (a la mitad de la zona de inyección) y después tiende infinitesimalmente a 1. En el límite de la zona de inyección (a 30.5 m de la pared de la caverna), la atenuación tiene un valor final de $3.44 \cdot 10^{-5}$. Esto nos dice que un contaminante será atenuado en menos de 0.004% después de recorrer los 30.5 m de la zona de inyección, en un período de tiempo de 10,000 años.

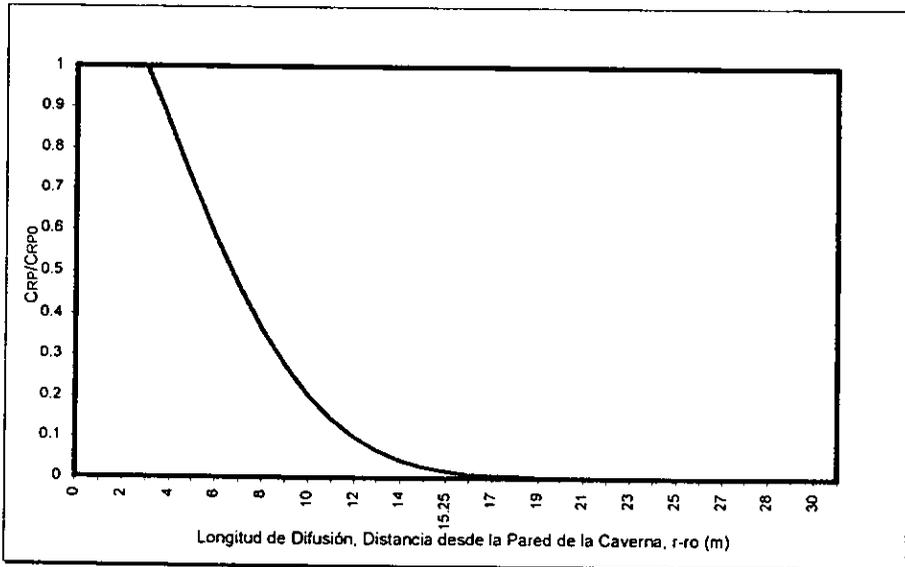
cuadro 8.2	
LONGITUD DE DIFUSIÓN Y ATENUACIÓN EN ESTADO LÍQUIDO A 10,000 AÑOS	
Longitud de Difusión, $r-r_0$ (m)	$C_{RP}/C_{RP,0}$
0	1
1	1
2	1
3	1
4	0.85607899
5	0.76691008
6	0.58603294
7	0.46778159
8	0.36464553
9	0.27649796

cuadro 8.2 (continuación)

Longitud de Difusión, $r-r_0$ (m)	$C_{wp}/C_{wp,0}$
10	0.20332524
11	0.14676186
12	0.10275906
13	0.06952487
14	0.04581770
15	0.02960044
15.25	0.01917742
16	0.01095261
17	0.00694158
18	0.00594561
19	0.00391315
20	0.00211397
21	0.00133385
22	0.00069129
23	0.00032974
24	0.00020123
25	0.00009756
26	0.00008608
27	0.00007461
28	0.00005166
29	0.00004019
30	0.00002871
30.5	0.00003445=3.44*10 ⁻⁴

gráfica 8.2

LONGITUD DE DIFUSIÓN Y ATENUACIÓN EN ESTADO LÍQUIDO A 10,000 AÑOS



Adicionalmente, en el reporte publicado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA)⁽²³⁾, se afirma que reducciones de la concentración en un orden de 10^{-3} a 10^{-6} son apropiadas en la mayoría de los casos. Por lo que, un factor de atenuación de $3.44 \cdot 10^{-5}$ es aceptable para el requisito de "no migración". Esto no sorprende demasiado, ya que hasta la fecha todos los requerimientos de no migración han sido preparados para flujos en un medio poroso de sustancial permeabilidad. La roca elegida aquí es un domo salino muy compacto.

8.3.2 Cálculo del Tiempo de Difusión, caso 1,2-Dicloroetano.

En esta sección, calcularemos el tiempo en el que llega a su límite de detección ($C_{RP}=1$ ppb) la concentración del 1,2-Dicloroetano, siendo su concentración inicial la máxima permitida por su solubilidad en el agua ($C_{RP,0}=8.690 \cdot 10^6$ ppb). Por lo que la relación de atenuación queda:

$$\frac{C_{RP}}{C_{RP,0}} = 1.150747986 \cdot 10^{-7} = 1 - \text{erf}(\eta) \quad \dots(8.1)$$

Despejando la función error:

$$\text{erf}(\eta) = 0.9999998849 \quad \dots(8.2)$$

Utilizando la figura 7.6, obtenemos el valor de η .

$$\eta = 3.918668095 \quad \dots(R.8.1)$$

Utilizando la variable de similitud de la relación 7.37, tenemos que:

$$t = \frac{1}{D} \left(\frac{x}{2\eta} \right)^2 \quad \dots(8.3)$$

$x=r-r_0=30.5-3=27.5$ m $D=4.8 \cdot 10^{-11}$ m ² /s	$\eta=3.918668095$
---	--------------------

Sustituyendo los datos del cuadro, queda:

$$t = 8,133.55 \text{ años} \quad \dots(R.8.2)$$

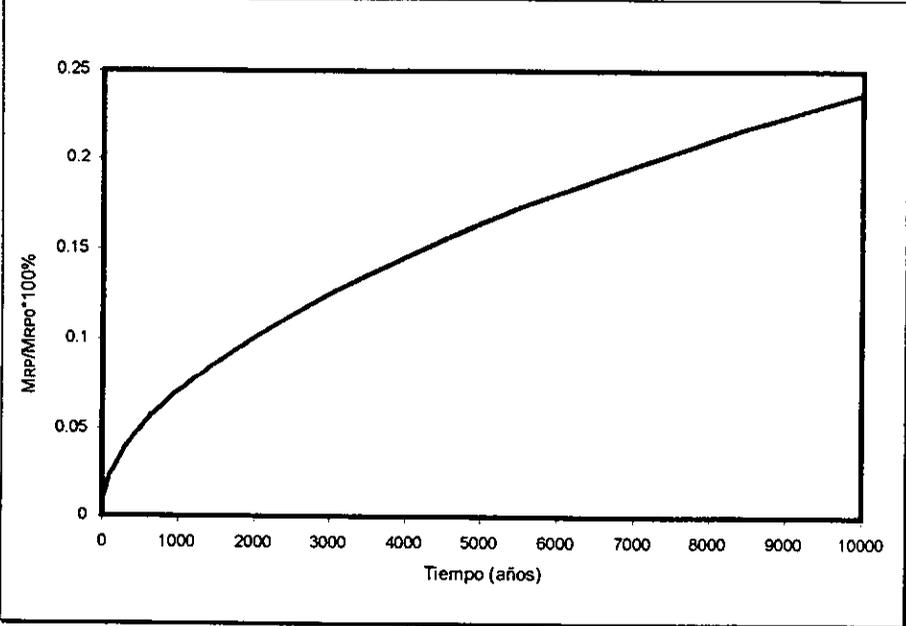
Por lo tanto, posiblemente un resultado de más de 8,000 años nos dice que el confinamiento es seguro, considerando también que el macizo salino es mucho más extenso que las delimitaciones de la zona de inyección.

8.3.3 Masa Acumulada del Contaminante Liberado.

Utilizando las ecuaciones 7.45 y 7.47 con los mismos parámetros y manejando la variable del tiempo (t) con valores desde 0 hasta 10,000 años, generamos el cuadro 8.3 y la gráfica 8.3. La migración de los contaminantes disueltos fuera de la caverna es un proceso lento: una fracción de aproximadamente $2.0477 \cdot 10^{-3}$ (0.204%) del total de los residuos peligrosos en 10,000 años se transforma a fase líquida y "migra" al exterior.

cuadro 8.3		
MASA ACUMULADA DE CONTAMINANTE LIBERADO A 10,000 AÑOS		
Tiempo (años)	$M_{RP,t}/M_{RP,0}$	$M_{RP,t}/M_{RP,0} \cdot 100\%$
0	0	0
10	$6.9603 \cdot 10^{-6}$	0.0069
20	$9.8544 \cdot 10^{-6}$	0.0098
30	$1.2079 \cdot 10^{-5}$	0.0120
40	$1.3958 \cdot 10^{-5}$	0.0139
50	$1.5615 \cdot 10^{-5}$	0.0156
60	$1.7176 \cdot 10^{-5}$	0.0171
70	$1.8497 \cdot 10^{-5}$	0.0184
80	$1.9784 \cdot 10^{-5}$	0.0197
90	$2.0994 \cdot 10^{-5}$	0.0209
100	$2.2139 \cdot 10^{-5}$	0.0221
200	$3.1419 \cdot 10^{-5}$	0.0314
300	$3.8583 \cdot 10^{-5}$	0.0385
400	$4.4652 \cdot 10^{-5}$	0.0446
500	$5.0021 \cdot 10^{-5}$	0.0500
600	$5.4893 \cdot 10^{-5}$	0.0548
700	$5.9388 \cdot 10^{-5}$	0.0593
800	$6.3584 \cdot 10^{-5}$	0.0635
900	$6.7537 \cdot 10^{-5}$	0.0675
1,000	$7.1285 \cdot 10^{-5}$	0.0712
2,000	$1.0189 \cdot 10^{-4}$	0.1018
3,000	$1.2579 \cdot 10^{-4}$	0.1257
4,000	$1.4623 \cdot 10^{-4}$	0.1462
5,000	$1.6445 \cdot 10^{-4}$	0.1644
6,000	$1.8109 \cdot 10^{-4}$	0.1810
7,000	$1.9653 \cdot 10^{-4}$	0.1965
8,000	$2.1103 \cdot 10^{-4}$	0.2110
9,000	$2.2475 \cdot 10^{-4}$	0.2247
10,000	$2.378261776 \cdot 10^{-4}$	0.2378261776

gráfica 8.3
MASA ACUMULADA DE CONTAMINANTE LIBERADO A 10,000 AÑOS



Si la concentración de contaminante disuelto en la salmuera de la cavidad permanece constante, entonces el promedio anual de migración es equivalente a la velocidad de disolución promedio anual del residuo que lleva la masa migratoria al exterior de la cavema. Con el análisis realizado anteriormente de la afluencia de salmuera, podemos corroborar que efectivamente, la salmuera disponible para lixiviar y formar soluciones con los residuos peligrosos es mínima (menor del 0.25%), aún en un periodo de tiempo de 10,000 años.

8.4 Transferencia de Masa en Estado Gaseoso.

8.4.1 Gas Disuelto: Difusión y Atenuación.

Complementando el análisis presentado en la sección 7.4.4, se presenta en el cuadro 8.4 y la gráfica 8.4 la tendencia de la difusión y la atenuación de un gas disuelto en la salmuera hacia el macizo salino. En el caso que nos ocupa, consideramos que el gas es soluble en la salmuera, con una concentración máxima en la pared de la caverna (r_0) hasta la interfase (límite de la zona activa, r_1) y una disminución teórica basada en la distancia de penetración en el seno del domo salino. Esta curva es exactamente igual a la correspondiente de la transferencia de masa en estado líquido. Precisamente por que nos ocupamos de un gas que es soluble en la salmuera y por lo tanto, esta difusión corresponde a un valor de atenuación de $3.44 \cdot 10^{-5}$ en la pared de la caverna, en un periodo de tiempo de 10,000 años. Por ende, las mismas conclusiones para esta sección son las dadas en la sección 8.3.1.

8.4.2 Expansión de Volumen del Gas.

En el cuadro 8.4 y la gráfica 8.4 (curva segmentada) se muestran los resultados en base a la forma de cálculo presentada en la sección 7.4.5.

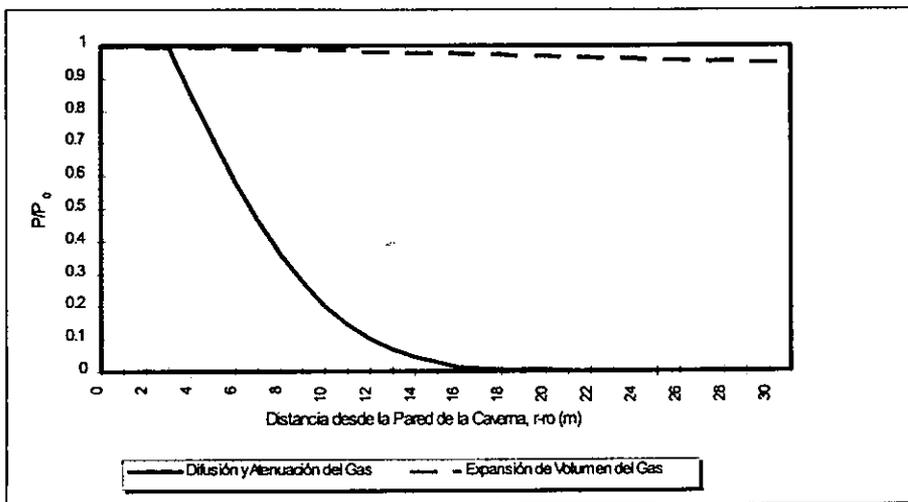
cuadro 8.4		
DIFUSIÓN-ATENUACIÓN Y EXPANSIÓN DE VOLUMEN DE GASES A 10,000 AÑOS		
Distancia Desde la Pared de la Caverna Salina, $r-r_0$ (m)	Difusión y Atenuación del Gas, P_{Dw}/P_0	Expansión de Volumen del Gas, P_{Dv}/P_0
0	1	1
1	1	0.99897604
2	1	0.99790440
3	1	0.99678536
4	0.85607899	0.99561927
5	0.76691008	0.99440646
6	0.58603294	0.99314728

cuadro 8.4 (continuación)

Distancia Desde la Pared de la Caverna Salina, $r-r_0$ (m)	Difusión y Atenuación del Gas, P_{0w}/P_0	Expansión de Volumen del Gas, P_{0v}/P_0
7	0.46778159	0.99184209
8	0.36464553	0.99049128
9	0.27649796	0.98909522
10	0.20332524	0.98765432
11	0.14676186	0.98616898
12	0.10275906	0.98463962
13	0.06952487	0.98306667
14	0.04581770	0.98145058
15	0.02960044	0.97979179
16	0.01095261	0.97809076
17	0.00694158	0.97634797
18	0.00594561	0.97456388
19	0.00391315	0.97273898
20	0.00211397	0.97087378
21	0.00133385	0.96896877
22	0.00069129	0.96702446
23	0.00032974	0.96504137
24	0.00020123	0.96302003
25	0.00009756	0.96096096
26	0.00008608	0.95886470
27	0.00007461	0.95673180
28	0.00005166	0.95456281
29	0.00004019	0.95235827
30	0.00002871	0.95014876
30.5	0.00003445=3.44*10 ⁻⁶	0.9489860677

gráfica 8.4

DIFUSIÓN-ATENUACIÓN Y EXPANSIÓN DE VOLUMEN DE GASES A 10,000 AÑOS



La disminución en la presión descrita por la curva de la expansión del volumen para la distancia de 30.5 m desde la pared de la cavema hasta el límite de la zona de inyección es de acuerdo con el siguiente cálculo:

$$\left[1 - \left(\frac{P_{Ev}}{P_0} \right)_{r=r_0=30.5} \right] * 100\% = 5.10139\% \quad \dots(R.8.3)$$

Por lo que esta disminución es pequeña, alrededor del 5% de la presión inicial del gas dentro de la cavema, P_0 . Este es el efecto de la baja porosidad relativa de la roca salina a la porosidad de la cavema: $\frac{\phi_1}{\phi_0} = 0.001$. Un incremento en la distancia desde la pared de la cavema añade un pequeño volumen relativamente libre al volumen inicial del gas en la cavema. Si la porosidad fuera de la cavema es mucho más pequeña que adentro, se añadiría más volumen libre a los espacios porosos de la cavema acomodando una fracción más grande del gas expandido (como se observa en la gráfica 7.3). Esto considerado para fuertes disminuciones en la presión del gas con un incremento en la distancia desde la pared de la cavema. En otras palabras, a cualquier distancia dada desde la pared de la cavema, la porosidad en la roca salina es más alta, donde la mayor parte del volumen está disponible para la expansión del gas y lo más bajo sería la presión del gas a esa distancia. Para reiterarlo, el valor de la presión calculada para 30.5 m de distancia desde la pared de la cavema al límite de la zona de inyección no describe la migración de un gas expandido en nuestro modelo del sistema de cavema y roca salina, pero ayuda a entender la naturaleza física de las ecuaciones correspondientes.

8.5 Sumario de las Conclusiones y Puntos Establecidos del Estudio a Largo Plazo de la Transferencia de Masa.

En este apartado no se pretende mostrar y repetir todos los resultados numéricos establecidos en el capítulo VII y en las secciones anteriores, sino que se discute y complementa un compendio de los comentarios y conclusiones que se generan de los análisis realizados para todos los casos de transferencia de masa considerados para este trabajo.

En primer lugar, encontramos que un volumen nominal de salmuera se acumulará en la caverna a lo largo de un periodo de tiempo de 10,000 años. Aún considerando esta salmuera, los espacios vacíos entre los "pellets" de los residuos peligrosos solidificados inyectados permanecerán insaturados. Esta salmuera podrá interactuar con los residuos peligrosos confinados y formar soluciones peligrosas con una lixiviación mínima de los "pellets" saturados de residuos.

Por otro lado, considerando como base que ya existen soluciones líquidas de residuos peligrosos lixiviados en el interior del domo salino y en una zona determinada alrededor de la caverna desde el mismo momento de confinamiento de los "pellets", la migración de éstos será mínima y en el orden de miles de años para que su concentración en el límite de la zona de inyección caiga dentro de los límites de detección.

De la misma manera se establece la conclusión para la difusión de la masa gaseosa, ya que éste se delimita de acuerdo a sus propiedades como soluble en la salmuera y se difunde con un mecanismo idéntico a la transferencia de masa en fase líquida, incluyendo la consideración de la zona activa alrededor de la caverna lixiviada en el seno del domo salino. Dentro de este análisis en estado gaseoso, definimos que la velocidad de recorrido del gas a través del macizo salino es mínima y la distancia del recorrido del gas es mucho menor que la distancia de la pared de la caverna al límite de la zona de inyección.

Conclusiones

"En mi opinión, he sido un niño pequeño que, jugando en la playa, encontraba de tarde en tarde una piedra más fina o una concha más bonita de lo normal. El océano de la verdad se extendía, inexplorado, delante de mí."

Isaac Newton

(1642-1727), físico y matemático británico.

Después de establecer todos los puntos en este estudio teórico de la propuesta para la disposición final de residuos peligrosos y recapitulando los aspectos tocados en el desarrollo de este trabajo, podemos establecer algunas conclusiones que darán fin al análisis efectuado en este trabajo.

De acuerdo con los tres primeros capítulos de este estudio, se ha mostrado un panorama general sobre la problemática ambiental referida a los residuos peligrosos, sus consecuencias y algunas alternativas de solución. Por supuesto, las alternativas (entre las que se encuentra nuestra propuesta) no ofrecen el 100% de seguridad. Es decir, cada propuesta de solución al problema de disposición de residuos peligrosos tiene puntos de discusión con respecto a su efectividad de eliminar definitivamente los problemas asociados a estos desechos.

Aún con lo anterior, la propuesta del confinamiento en cavernas lixiviadas en domos salinos ofrece algunas ventajas inherentes sobre todas las demás propuestas de tratamiento y disposición. Y ello se establece por los principios básicos que han propuesto a los domos salinos como una alternativa viable para el confinamiento de residuos peligrosos. Entre las cuales pueden nombrarse a la tecnología disponible, monitoreo nulo y porque algunos países han aplicado con éxito este sistema de disposición final.

Por lo tanto, se explicó la metodología y técnicas existentes para la construcción de cavidades en los domos salinos para su posterior utilización en el confinamiento de residuos peligrosos. Tal tecnología es la misma (en su mayor parte) a la usada para la perforación de pozos petroleros, de lo cual México cuenta con vasta experiencia y recursos. Tal vez el parámetro que establece un gran porcentaje de seguridad es el pretratamiento de los residuos peligrosos. Este tratamiento reduce la peligrosidad de los residuos (más no la elimina). Todo ello con el fin de uniformizar las propiedades de transporte de los residuos (que pueden ser líquidos o sólidos),

reduciéndolos a "pellets" cementados para su disposición en la caverna lixiviada en el domo salino.

Una revisión a grosso modo del proceso completo de disposición final de los residuos peligrosos parece ofrecer la solución final y más óptima para la generación de los mismos. Pero, de acuerdo con las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA⁽²³⁾), tal propuesta mantenía puntos no aclarados sobre la "migración" de los residuos (aún estando encapsulados en "pellets"). Algunos estudios previos se habían hecho para tratar de explicar los fenómenos de transporte de materia de la caverna lixiviada al domo salino (si es que la hubiera), pero aún así, no englobaban en su totalidad el problema, ni explicaban satisfactoriamente los puntos discutidos.

Por lo que, se desarrollaron los modelos de transferencia de masa mediante el análisis de la difusión molecular y expansión de gases, que explicaran mediante los parámetros adecuados la totalidad de los sistemas de "migración" de residuos peligrosos (en fase líquida y gaseosa) que podrían presentarse en un confinamiento de este tipo. Con los modelos propuestos, se establecieron los rangos de seguridad que se presentarían bajo condiciones reales de operación, es decir, en 10,000 años, se estimó la cantidad de residuos peligrosos que "migrarían" hacia los alrededores de la caverna en el seno del domo salino. De manera análoga, se obtuvo el tiempo en que se moverían los residuos peligrosos hasta ciertas profundidades geológicas propuestas (tales puntos se muestran en el capítulo VIII con sus respectivas conclusiones particulares).

Posiblemente, este estudio se complementaría con un análisis completo de los eventos que ocurrirían en el interior de la caverna salina después del sellado de esta. Como son: las reacciones químicas y la generación de subproductos (que pueden tener características diferentes a los residuos originalmente confinados, tal como su estado físico) que lleguen a alterar las condiciones y parámetros tomados para este trabajo, haciendo que los modelos sean

inaplicables o parcialmente explicativos. Aún así y debido en primer lugar al tamaño de la caverna y en segundo lugar al pretratamiento ya mencionado, no se cree que haya cambios "revolucionarios" en las consideraciones hechas para este estudio.

Y otro aspecto que posiblemente haya esquematizado aún más las ventajas de esta propuesta es un breve análisis económico sobre un proyecto tentativo para el confinamiento de residuos peligrosos en algún domo salino, para tomarlo como un ejemplo base.

Con todo lo anterior y como conclusión final, podemos decir que la propuesta analizada aquí tiene grandes ventajas de ser aplicada (ya sea en México o en otra parte del Mundo) y una de ellas es precisamente su seguridad inherente al presentar (por el análisis teórico) magnitudes de transferencia de residuos peligrosos casi despreciables, considerando las propiedades, naturaleza y tamaño de estas estructuras salinas. Tal es así, que virtualmente pasarían más de 8,000 años para (con la tecnología de hoy) poder ser detectada alguna traza de desecho peligroso a 31 m de distancia de la pared de la caverna lixiviada (lo que para entonces pasaría una de tres situaciones: o se han desarrollado ya tecnologías para no solamente tratar los residuos peligrosos, sino eliminarlos completamente tanto en su generación en la fuente, como en todos los rincones de este mundo, o hemos dejado tan maltrecho e inservible el planeta Tierra que ha optado por colonizar otros mundos, o, simplemente, la raza humana ha desaparecido de todo el Universo -y esperando que los problemas asociados a ella, también-).

Bibliografía

*"El mundo está lleno de libros preciosos que
nadie lee."*

Umberto Eco

(nacido en 1932), escritor italiano.

1. Aguilar M. C.; *Almacenamiento Subterráneo de Crudo en Cavidades en Domas Salinos, Tuzandépetl, Ver.*; Ponencia presentada en LXXV Reunión de Expertos de Arpel; IMP-SIPE, Ingeniería de Proyectos; México D. F.; 13 al 17 de Agosto de 1990.
2. API 1115; *Operation of Solution-Mined Underground Storage Facilities*; First Edition; September 1994.
3. API RP 1114; *Design of Solution-Mined Underground Storage Facilities*; First Edition; June 1994.
4. Barron, Thomas F.; *Perpetual Containment of Hazardous Waste in Salt Formations*; Presented for Textor at the EPA's Innovative Treatment Technology Conference; Dallas, Texas; March 3, 1988.
5. Becerril Albarrán, J. y Navarrete Rodríguez M.; *Recopilación, Aplicación y Evaluación de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación para el Tratamiento de Residuos Peligrosos*; Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Químicos; México; Enero de 1993.
6. Bird, R. B. et al; *Transport Phenomena*; John Wiley and Sons; New York; 1960.
7. Black, S. R. et al; *Results of Site Validation Experiments*; Supporting Document 10, Brine Content of Facility Internal Strata, USDOE Waste Isolation Pilot Plant; 1983.
8. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.; *Conduction of Heat in Solids*; Oxford University Press; 1959.
9. Cartledge, Frank K.; *Waste Hazardous Solidification for the Disposal in Dormal Salt*; Paper prepared for the Texas Water Commission; November 29, 1991.
10. Castillo, Carlos and Bond, Otto F.; *Diccionario Inglés-Español, Español-Inglés, Universidad de Chicago*; Pocket; U. S.; 1980.
11. Contenido; Junio de 1995.
12. Cortinas de Nava, C.; *Residuos Peligrosos en el Mundo y México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.
13. Crank, J.; *The Mathematics of Diffusion*; Clarendon Press, Oxford; 1979.
14. Culliname, M. J. and Jones, L. W.; *Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes*; Hazardous Material Control, Vol. 2, No. 1, pág. 9-17, 58-63; No. 2, pág. 24-33, 50-58; 1989.
15. Davies, P. B. et al; *Assessing the Impact of Waste Generated Gas from the Degradation of Trans-Uranic Waste at the WIPP*, Sandia Nat. Lab., SAND90-0707C; Albuquerque, N. M.; 1991.
16. de Marsily, G.; *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press; New York.; 1986.

17. Diario Oficial de la Federación; Octubre 22 de 1993.
18. Domenico, P. A. and Lerman, A.; *Waste Containment in Dornal Salt*; Paper prepared for the Texas Water Commission; 1991.
19. Domenico, P. A. and Schwarz F. W.; *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and Sons; New York; 1990.
20. El Universal; 11 de Julio de 1998.
21. Enciso de la Vega, S. et al; *Estudio Mineralógico y Petrográfico de Algunos Dornos Salinos del Istmo de Tehuantepec*, Boletín No. 65, Instituto de Geología, UNAM; México; 1963.
22. EPA; *Guías para Evaluar Riesgos para la Salud por Mezclas Químicas*; FRL-2984-2; Metepec, México; 1988.
23. EPA; *No-Migration Variation in Dome Salt. Underground Disposal of Dangerous Waste*; FER-3092-6; U. S.; January 14, 1992.
24. Foust, A. S. et al; *Principles of Unit Operation*; John Wiley and Sons; New York; 1964.
25. Holcomb, D. J. and Shield, M.; *Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt with Added Water*, Sandia Nat. Lab., SAND87-1990; Albuquerque, N. M.; 1987.
26. IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração); *Mineração e Meio Ambiente: Impactos Previsíveis e Formas de Controle*; Revista Escola de Minas; Vol. 3, No. 43, pág. 48-66; 1990.
27. Ignatius, Y.; *Underground Storage of Oil and Gas Products*; Int. Rockstore '80 Symp. (Stockholm, June 23-27, 1980), Pergamon Press Inc., Vol. 22, No. 45, pág. 53-57; Elmsford, N. Y.; November 11, 1982.
28. IMP; *Almacenamiento de Crudo en Dornos Salinos, Tuzandépetl, Veracruz*; Manual de Operación, Fase Lixiviación; México; 1987.
29. LaGrega, M. D. et al; *Gestión de Residuos Tóxicos*; The Environmental Resources Management Group, MacGraw Hill; México; Febrero de 1997.
30. Lerman, A.; *Geochemical Processes, Water and Sediment Environments*; John Wiley and Sons; New York; 1979.
31. Lerman, A.; *Time to Chemical Steady States in Lakes and Oceans*; Advances in Chemistry Series 106, Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry, Amer. Chem. Soc.; Washington; 1971.

32. Li, Y. H. and Gregory, S.; *Diffusion of Ions in Sea Water and in Deep Sea Sediments*; *Geochem. Cosmochim. Acta.*; Vol. 38, pág. 703-714; 1974.
33. Lohs, K. and Jagsch R.; *Chemical-Toxicological and Technical Aspects of Waste Disposal With Respect to the Possibilities and Prospects of Depositing Industrial Waste Products Underground*; *Untergundspeicher Mittenwalde Veb.*, Akad Wiss D. D. R. Leipz, Chem Tech (Leipz); Vol. 28, No. 4, pág. 209-214; April 1976.
34. Maddox, Robert N. y Hines, Anthony L.; *Transferencia de Masa*; Prentice Hall; México; 1987.
35. Maffey García, L. et al; *Regulación y Gestión de Productos Químicos en México, Enmarcados en el Contexto Internacional*; INE, SEDESOL; México; 1992.
36. Márquez Pineda, A. et al; *Depósitos de Sal y Azufre en la Cuenca Salina del Istmo, Ver.*; Boletín No. 64, Consejo de Recursos Naturales no Renovables; México; 1964.
37. McClain, W. C.; *Status of AEC Project to Establish a Salt Mine Radioactive Waste Repository*; 4th Northern Ohio Geol. Soc. Inc., Salt Symp. Proc.; 1974.
38. Núñez Farfán, J.; *Análisis Estructural de Cavidades Excavadas en Dornos Salinos para Almacenar Hidrocarburos*; IPN; México; 1994.
39. Organization for Economic Cooperation; *Europe Gets a Grip on Wastes*; Shell Chemicals LTD, Chemical Week; Vol. 125, No. 6; pág. 44-45; United Kingdom; August 8, 1979.
40. Ortiz Monasterio, F. y Cortinas de Nava, C.; *Manejo de los Desechos Industriales en México*; Fundación Universo XXI; México; 1987.
41. PB-KBB; *Underground Storage and Subsurface Systems*; Engineering, Construction Services, Operations.
42. Perry, Robert H. et al; *Perry, Manual del Ingeniero Químico*; McGraw Hill; México; Septiembre de 1992.
43. Rivero Serrano, O. et al; *Los Residuos Peligrosos en México*; INE, SEMARNAP; México; 1996.
44. Rodríguez Correa, M. A.; *El Confinamiento en Dornos para Desechos Sólidos Peligrosos como una Solución a la Problemática Actual de los Grandes Corredores Industriales de Monterrey y Veracruz*; Ponencia presentada en el X Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; Toluca, Estado de México; Febrero de 1996.

-
45. Sandia; *Preliminary Plan for Disposal System Characterization and Log Term Performance Evaluation of the Waste Isolation Pilot Plant*; Sandia Rep. SAN89-0178.UC-70; Albuquerque, N. M.; 1989.
 46. Schneider, H. J. and Bishop, W.; *Safe, Zero Migration Ultimate Disposal of Solid Hazardous Waste in Salt Cavems*; Presented at the Second International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management; 1987.
 47. Simposium Internacional de Geología Ambiental, Confinamiento de Residuos y Contaminación de Suelo y Subsuelo; SEMARNAP, INE, Colegio de Ingenieros Geólogos de México, IMP; México D. F.; 23 y 24 de Octubre de 1996.
 48. Slutz, James A.; *Natural Gas Storage in Salt Cavems (A guide for state regulations)*; Prepared by the Energy Resources Committe of the Interstate Oil and Gas Compact Commission; October 1995.
 49. Strategic Petroleum Reserve; *Presion Criteria, Level III*; Department of Energy, Project Management Office; New Orleans, U. S.; March 1987.
 50. Strategic Petroleum Reserve; *Environmental Survey Preliminary Report*; Department of Energy, Project Management Office; New Orleans, U. S.; January 1989.
 51. Tchobanoglous, G. *et al*; *Gestión Integral de Residuos Sólidos*; McGraw Hill; México; Febrero de 1998.
 52. Thoms, R. L.; *Consideraciones de Diseño para Cavemas de Residuos Solidificados en Dornos Salinos*; AGM, Inc.; College Station; Texas; Octubre 17, 1991.
 53. Tofflemire, T. J. and Vanalstyne, F. E.; *Wastewater Treatment: Deep-Well Injection*; Journal Water Pollut. Contr. Fed., Vol. 45, No. 6, pág. 1103-1108, June 1973.
 54. Trejo Vázquez, R.; *La Disposición de Desechos Sólidos Urbanos*; Ciencia y Desarrollo; No. 74, Año XII, pág. 79-89; Mayo-Junio 1987.
 55. Welty, James R. *et al*; *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*; Noriega-Limusa; México; 1991.
 56. Wilson, W. F.; *Norm Disposal Options*; Strata. Environ. Serv. Inc., 5th Annu. Pennwell Confederation & Exhibition Co. Petro-Safe 94 Conf.; Houston, Texas; January 25-27, 1994.
 57. Wolery, T. J.; Status and Future Development, Proceedings of the Workshop on Geochemical Modeling; EQ316, pág. 10-19; 1986.
 58. Zill, Dennis G.; *Cálculo, con Geometría Analítica*; Grupo Editorial Iberoamérica; México; 1987.

-
59. Zill, Dennis G.; *Ecuaciones Diferenciales, con Aplicaciones*; Grupo Editorial Iberoamérica; México; 1988.

Comentarios

*"Siempre que enseñes, enseña a la vez a
dudar de lo que enseñas."*

José Ortega y Gasset

(1883-1955), filósofo y ensayista español.