

18  
24



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE PETROLEO CRUDO  
EN CAVIDADES SALINAS

**FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:  
**INGENIERO QUIMICO**

**P r e s e n t a n**

**Patricia Elizabeth Palmas Velasco**  
**Juan Manuel Jiménez López**

**Director de Tesis:**

**M. en C. Ricardo P. Hernández García**



V N A M

Cuautitlán Izcalli, Estado de México

1969



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

SECRETARIA ACADÉMICA  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES - CUAUTITLAN



Centro de  
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JOSE LUIS GALVAN MADRID  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: LIC. JOSE LUIS CHAVEZ GARAY  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE EXAMENES  
PROFESIONALES DE LA F.E.S.C.

Nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis titulada:  
"ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE PETROLEO CRUDO EN CAVIDADES SALINAS", que --  
presenta la pasante: PALMAS VELASCO PATRICIA ELIZABETH, con número de --  
cuenta 7331851-0, para obtener el título de INGENIERA QUIMICA, en colabora-  
ción con JIMENEZ LOPEZ JUAN MANUEL.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discu-  
tida en el Examen Profesional correspondiente, otorgamos NUESTRO VOTO APRO-  
BATORIO.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, México, a 27 de enero de 1989.

PRESIDENTE: ING. YOLANDA MARTINEZ AYALA

VOCAL: ING. FRANCISCO RARPEPA ZARATE

SECRETARIO: ING. RICARDO PARAMONT HERMANDEZ GARCIA

1er. SUPLENTE: ING. MOISES COBOS BUTRON

2o. SUPLENTE: ING. RAUL BOUGARD SIERRA

INDICE DE LA TESIS  
"ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE PETROLFO CRUDO  
EN CAVIDADES SALINAS"

	INTRODUCCION	1
CAPITULO I	OBJETIVOS	6
CAPITULO II	GENERALIDADES SOBRE LOS DISTINTOS TIPOS DE ALMA CENAMIENTO SUBTERRANEO.	7
CAPITULO III	CRITERIOS DE SELECCION DE UN ALMACENAMIENTO SUBTERRA NEO Y ELECCION DEL MAS ADECUADO A NUESTRO PAIS.	42
CAPITULO IV	A) FUNDAMENTOS TEORICOS QUE EXPLICAN EL PROCESO DE CONE STRUCCION DE CAVIDADES EN ESTRUCTURAS SALINAS. B) MODELO MATEMATICO QUE SIMULA LA CONSTRUCCION DE UNA CAVIDAD.	52
CAPITULO V	CONCLUSIONES.	114
BIBLIOGRAFIA.		117

## INTRODUCCION

La producción de petróleo tiene gran importancia en la economía mexicana, porque constituye una fuente de divisas y contribuye en gran medida al desarrollo de nuestro país.

La producción nacional de petróleo crudo durante el año de 1985, fue 418.24 Mm3/día (23), cifra que nos ubicó entre los diez países con mayor producción a nivel mundial y que cumplió con el Programa de Energía del Gobierno Federal, que indicaba que la producción anual de crudo debería ser tal, que permitiera cubrir la demanda interna (cualquiera que fuese) y generar un excedente exportable de 238.5 Mm3/día (23) de mezcla constituida por 42% de crudo istmo y 58% de crudo maya. Durante el año de 1985, esta cantidad reportó el 91% del valor total de las exportaciones de nuestro país.

Es conveniente mencionar también, que de la producción total de crudo, 64.7% proviene de la zona marina, 27.5% de la zona sureste y 7.8% de los campos de las zonas Norte-Centro-Sur.

En la tabla 1 se muestran las terminales de almacenamiento de crudo que posee Petroleos Mexicanos y en la Figura 1 puede consultarse su ubicación (13,23).

Debe notarse que Pemex ha cubierto sus necesidades de almacenamiento con tanques superficiales de acero.

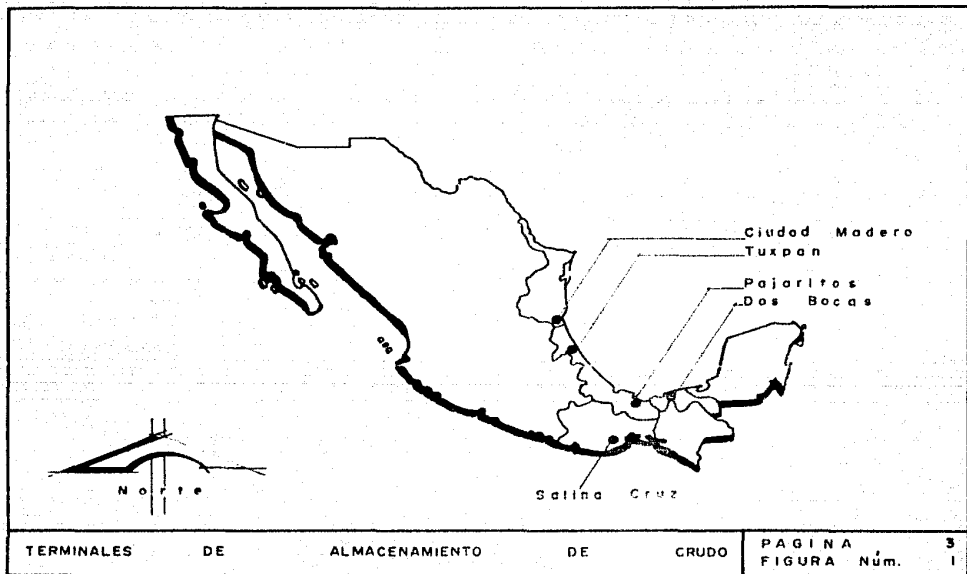
De estudios estadísticos (13) efectuados en el Golfo de México, de donde proviene el 64.7% de la producción, se sabe que

TABLA 1  
TERMINALES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO

NOMBRE	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO (Mm3)	PRODUCTOS QUE MANEJAN
PAJARITOS	938.1	CRUDO ISTMO, CRUDO MAYA, GASOLINA, COMBUSTOLEO, DIESEL, BENCENO, XILENO, PARAXILENO, ACETALDEHIDO, GAS LICUADO, AMONIACO, ETILENO, TOLUENO, AROMATICOS, HEXANO, HEPTANO, TURBOSINA, ORTOXILENO.
DOS BOCAS CAYO ARCAS SALINA CRUZ	636.0 626.8 Almacenamiento para la refineria	CRUDO ISTMO Y MAYA CRUDO MAYA CRUDO ISTMO, COMBUSTOLEO, GASOLINA, DIESEL, DIAFANO, AMONIACO E INTERMEDIO 15.
TUXPAN	445.2	CRUDO, GASOLINA, DIESEL Y COMBUSTOLEO
CD. MADERO	Almacenamiento para la refineria	CRUDO, COMBUSTOLEO, GASOLEO A ALTO VACIO, NOVA, DIESEL, INTERMEDIO 15, TURBOSINA, METANOL, ACEITE CLARIFICADO, BUTANO, BUTILENO, AMONIACO, PARAXILENO, TETRAMERO DE PROFILENO, BENCENO, ETILBENCENO, BUTADIENO, ESTIRENO, DODECILBENCENO, ASFALTO, ALFADLEFINA, GAS LICUADO, CLORURO DE VINILO, GASOLINA DESPENTANIZADA.

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO EN BUQUES TANQUE

VENTURE EUROPE	262.3 Mm3 de crudo
SEAWISE GIANT	667.8 Mm3 de crudo



en los meses de invierno se pueden presentar hasta siete días de mal tiempo, en los cuales puede ser necesario cerrar los pozos productores y detener las operaciones de exportación.

Tomando en cuenta dichos periodos de mal tiempo y los niveles de producción y exportación que se tienen en México, dichas terminales de almacenamiento son insuficientes, por lo que resulta de interés conocer otras opciones para el almacenamiento de hidrocarburos, aparte de las superficiales en tanques de acero, las cuales se mencionan en el Capítulo II.

Se da amplia importancia al almacenamiento en cavidades salinas debido a que es el que mejor cumple con los factores considerados en la selección del tipo de almacenamiento que más se adecua a las necesidades de México (Capítulo III).

Asimismo, dentro del Capítulo IV de este trabajo se hace en primer término una descripción teórico-práctica de como se construye un almacenamiento en cavidades salinas, ocupandonos posteriormente de un modelo matemático (24) el cual nos permite predecir la forma que va tomando la cavidad durante el proceso de construcción.

Solution Mining Research Institute, entidad a quien pertenecen los derechos del trabajo del Dr. Saberian, presenta el modelo matemático como un programa de computadora. A causa de esto, para entender los fenómenos involucrados hubo necesidad de desglosar el programa y estudiar en forma detallada cada una de sus partes a fin de obtener una forma de presentación más sencilla, accesible a cualquier persona, como puede observarse en



la segunda parte del capítulo IV.

El modelo contempla las dos opciones de disolución practicadas (Disolución Directa e Inversa), al final del capítulo IV se presentan una serie de gráficas que ilustran las cualidades de este modelo matemático.

## CAPITULO I

### OBJETIVOS

Se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

1.- Enumerar las ventajas de tener un almacenamiento en forma subterránea.

2.- Informar brevemente acerca de los tipos de almacenamiento subterráneo que existen y proporcionar alguna bibliografía sobre ellos.

3.- Presentar los criterios para seleccionar el almacenamiento más adecuado, en función de los requerimientos y recursos que posee nuestro país.

4.- Presentar los fundamentos teóricos que expliquen el proceso de construcción de una cavidad en domo salino, así como el modelo matemático que simula esta construcción.

CAPITULO II  
GENERALIDADES SOBRE LOS DISTINTOS TIPOS DE  
ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO

Se han mencionado antes algunas de las grandes ventajas de los almacenamientos subterráneos sobre los superficiales. No obstante, lo primero que debe existir en un proyecto de almacenamiento, una vez elegida la zona geológica adecuada al tipo de almacenamiento seleccionado, es un estudio de estabilidad a corto y largo plazo a fin de garantizar la seguridad de las personas, del lugar y del medio ambiente.

En la actualidad, los países industrializados tienen asegurado su abastecimiento de energéticos utilizando almacenamientos subterráneos. Por ejemplo:

Estados Unidos tiene almacenamientos subterráneos con capacidad total de 477 MMm<sup>3</sup> (29), de los cuales 159 MMm<sup>3</sup> corresponden a la reserva estratégica nacional (la más grande del mundo) y 318 MMm<sup>3</sup> a compañías particulares, estos últimos repartidos en más de 300 almacenamientos en todo el país.

Alemania tiene una reserva estratégica de aproximadamente 12 MMm<sup>3</sup> (9) de crudo y es la más grande de Europa y segunda en el mundo.

Francia tiene una capacidad total de almacenamiento de 19 MMm<sup>3</sup> (9), de los cuales 12 MMm<sup>3</sup> son de tipo subterráneo (incluyendo el manejo por el gobierno y la industria privada), el

resto es de tipo superficial.

Canada tiene el 97% (22) de su capacidad de almacenamiento en forma subterránea.

Finlandia posee 10 MMm<sup>3</sup> (9) en almacenamientos subterráneos.

Otros países (9) que desarrollan este tipo de almacenamiento son Sudáfrica (tanques de concreto subterráneos) y Arabia Saudita (almacenamiento en roca).

En general, los almacenamientos subterráneos se dividen en:

A)ALMACENAMIENTO EN CAVIDADES.

Son contruidos efectuando oquedades en el subsuelo, utilizando distintas técnicas, de acuerdo al tipo de formación geológica existente. Serán descritos cinco tipos:

- a)Cavidades minadas en domos salinos.
- b)Cavidades minadas en roca.
- c)Minas abandonadas.
- d)Explosiones nucleares.
- e)Tierra congelada.

B)ALMACENAMIENTO EN MEDIO POROSO.

Son adecuados para almacenamiento si existe una cobertura hermética en la formación geológica, que no permita escapes de producto. Debe existir también adecuada porosidad que permita un volumen aceptable por almacenar, y una permeabilidad tal, que facilite la inyección y la extracción del producto. A este tipo pertenecen:

f) Almacenamiento en acuíferos.

g) Yacimientos agotados de gas o petróleo.

Varias de estas posibilidades de almacenamiento se ilustran en la Figura 2. A continuación se describirán brevemente cada uno de los diferentes tipos de almacenamiento subterráneo.

a) ALMACENAMIENTO EN CAVIDADES SALINAS (19).

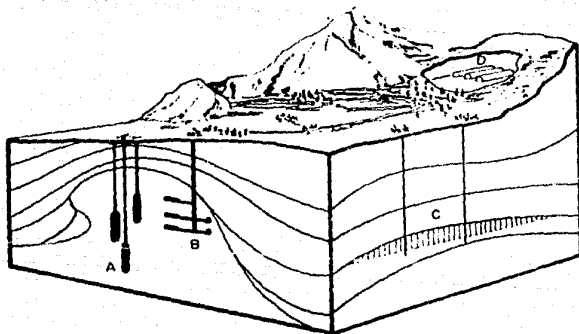
El prerrequisito para la construcción de un almacenamiento en sal es la existencia de formaciones salinas estratificadas. Estas fueron formadas debido a la separación parcial de los océanos y sucesiva evaporación solar que causó la concentración y finalmente precipitación de la sal.

En el curso de los periodos geológicos la sal fue cubierta por sedimentación normal que finalmente dió lugar a los grandes depósitos de la actualidad.

Las cavidades salinas son ampliamente utilizadas en nuestros tiempos, porque permiten almacenar diferentes tipos de productos dentro de un amplio rango de presiones y temperaturas, presentando gran impermeabilidad.

La localización de la estructura requiere de una exploración que se realiza por métodos geofísicos convencionales. Una vez que se ha identificado la formación, se continúa la investigación utilizando métodos usuales de perforación y determinando propiedades físicas y químicas de muestras de sal.

Una vez que la etapa anterior se ha cumplido y el domo apropiado seleccionado, se procede al desarrollo de la ingeniería para la construcción de la cavidad. La generación de ésta se



- A) Cavidades en sal
- B) Minas abandonadas
- C) Yacimientos de gas o aceite agotados y acuíferos
- D) Cavernas en roca

DIFERENTES TIPOS DE ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO

PAGINA 10  
 FIGURA Núm. 2

realiza mediante la inyección de agua para disolver la sal. operación que se conoce como lixiviación (Figura 3).

En este momento no se explicará acerca de los almacenamientos en sal, debido a que sus principios y técnicas de creación serán detallados en el Capítulo IV.

La Figura 1 muestra que las cavidades salinas pueden utilizarse también como depósito final de materiales peligrosos, radiactivos o de desecho. Otros usos incluyen el almacenamiento de aire comprimido (en combinación con estaciones de potencia) para satisfacer picos de energía.

La salmuera que se obtiene de la lixiviación puede desecharse o utilizarse en alguna industria (productora de sal o cloro).

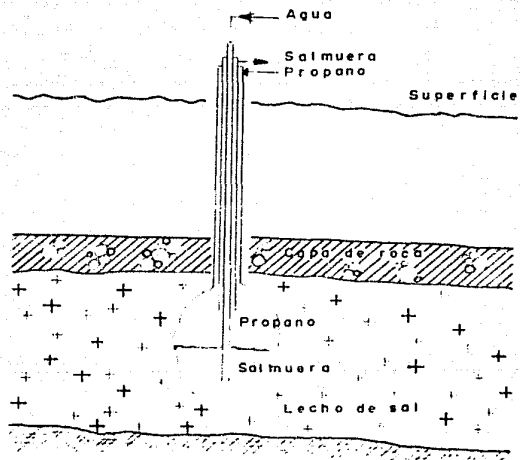
Por último, se incluirán aquí algunos datos históricos acerca del almacenamiento en sal:

La tecnología de cavernas en sal se remonta a China, en donde se producía sal usando tubos de bambú, bajados a una profundidad considerable.

La idea de almacenar hidrocarburos no es nueva. Fue concebida en Alemania durante la Primera Guerra Mundial como un medio para proteger el crudo (importante energético).

La patente de esta tecnología se dió a una compañía de exploración alemana en 1916.

Las primeras cavernas planeadas para almacenamiento de hidrocarburos en Estados Unidos fueron realizadas a principios de los años 50's (la bibliografía menciona un pozo de 7950 m3 -



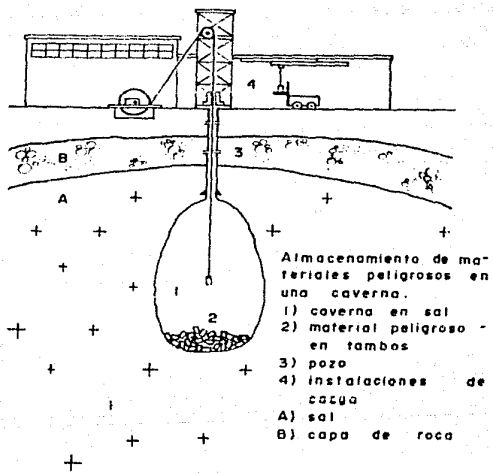
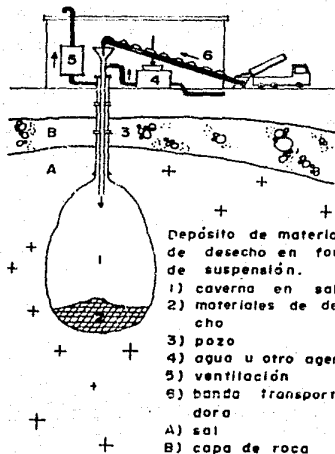
L I X I V I A C I O N

D E

S A L

PAGINA 12  
 FIGURA Núm. 3





construido en 1949 por la Texas Natural Gasoline Corporation). En Canada, la primera caverna en domos salinos usada para propósitos de almacenamiento de hidrocarburos fue desarrollada en 1958.

En 1961, en México (14) se perforó el pozo Tuzandépetl 7 (Veracruz) para almacenar 79500 m3 de propano líquido. El proyecto se suspendió porque las tuberías se taponaron con cristales de sal, al suspender temporalmente las operaciones, por falta de equipo.

En 1963, Petróleos Mexicanos perforó el pozo Tuzandépetl 202 y en 1967 el 201A con el propósito de investigar la calidad de la sal y terminarlos como productores de salmuera para abastecer el Complejo Industrial de Pajaritos. Estos pozos fueron transferidos a otra compañía, en virtud de que PEMEX no tenía calidad jurídica para explotar un mineral (la sal).

Debido a que en Estados Unidos se ejerció considerable presión política para el rápido desarrollo de la reserva estratégica de crudo, en la primera etapa se utilizaron cavernas construidas por la industria productora de salmuera, las cuales eran muy irregulares. Cabe mencionar que en esta primera etapa, hubo un accidente en 1979 en el que se perdieron aproximadamente 5565 m3 de petróleo (19).

#### b) ALMACENAMIENTO EN CAVERNAS EN ROCA. (13,16,18,21)

Las cavernas minadas en roca representan una gran alternativa para el almacenamiento subterráneo, debido a que como pueden utilizarse diversos tipos de roca, tienen grandes posibilidades de localización.

Las etapas para desarrollar el almacenamiento son :

- a) Obtener información geológica de la zona considerada, que permita conocer las posibles zonas de falla y las necesidades de refuerzos y soportes, así como las posibilidades de extensión.
- b) Llevar a cabo la operación de minería.
- c) Equipar la caverna para almacenamiento.

El costo final de la instalación completa depende de factores como : calidad de la roca , costo de la roca recuperada y volumen a almacenar, producto almacenado, profundidad de la caverna, etc.

Las características necesarias en la roca son :

- a) Debe ser mecánicamente competente y con la resistencia suficiente para permitir una excavación grande sin problemas por derrumbes.
- b) Debe ser homogénea en un espesor suficiente para asegurar que la excavación se encuentre dentro de una masa con propiedades y características de comportamiento similares en toda su extensión.
- c) Estará libre de fallas mayores, grietas y planos debilitados, todo lo cual requiere un trato especial.
- d) Con baja permeabilidad a fin de mantener bajos los costos de bombeo de agua durante la operación, pero permitiendo la suficiente columna de agua subterránea para proporcionar un sello adecuado al fluido almacenado.

e) La profundidad debe ser tal que la caverna se encuentre:

- Abajo del nivel freático.
- Tan cerca de la superficie como sea posible.
- Abajo de una capa de roca de suficiente grosor, que no cause problemas en el techo de la cavidad.

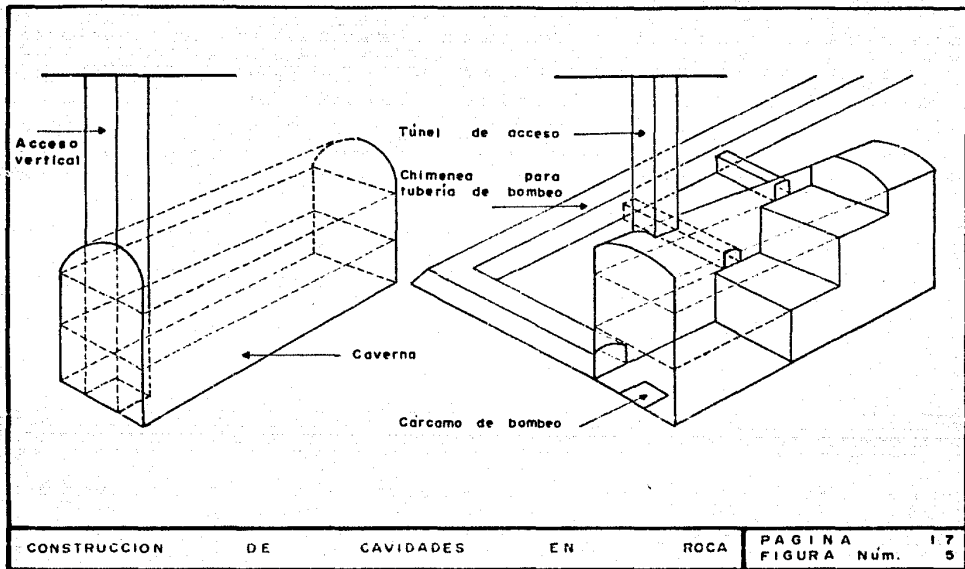
f) La roca no deberá reaccionar con el producto almacenado.

Existen varios tipos de roca que cumplen con estos requisitos:

- Rocas intrusivas: Granitos, dioritas.
- Rocas metamórficas: Esquistos, cuarcitas.
- Calcáreas: Calizas, dolomitas.
- Rocas volcánicas y areniscas: Riolitas, basaltos.

La construcción de una caverna se realiza utilizando técnicas de minería e Ingeniería Civil. La geometría de la caverna debe desarrollarse en la forma más simple posible, procurando obtener la mayor sección transversal, de acuerdo con las condiciones que presente la roca.

Las cavidades se excavan utilizando túneles de acceso inclinados, que permiten el libre acceso de los trabajadores y de la maquinaria al lugar de trabajo, así como el transporte de la piedra de la excavación. Los túneles también sirven como canales de ventilación que permiten la salida de los gases producidos por las detonaciones y por los vehículos funcionando en el subsuelo. La Figura 5 nos muestra los túneles de construcción y la cavidad



minada en roca.

Las cavernas se excavan generalmente en tres fases: la primera comprende la excavación de la parte superior, correspondiente al techo, mediante el método normal de excavación de túneles y la forma más factible es la arqueada; la segunda fase corresponde a la excavación de la parte media de la cavidad, utilizando el método de excavación escalonada vertical, método que también se usa en la tercera fase, la correspondiente al suelo de la cavidad.

La siguiente tabla (18) proporciona un ejemplo de los tiempos típicos requeridos en la construcción de una caverna en roca (capacidad= 31.8 Mm<sup>3</sup>) :

FASE	TIEMPO (MESES)	TIEMPO ACUMULADO (MESES)
1.-Estudios preliminares	1	1
2.-Selección del lugar	2	3
3.-Investigación del lugar, que incluye el muestreo del sub-suelo, establecimiento de las bases de diseño y costos aproximados.	3	6
4.-Detalles del diseño	1	7
5.-Construcción del pozo	4	11
6.-Minado	7	18
7.-Pruebas y puesta en operación	1	19

Dado que la mayoría de las veces el techo y las paredes de la cavidad presentan cierta porosidad, debe proveerse de un método para sellar todas las fisuras y obtener una cavidad completamente hermética.

Existen esencialmente dos tipos de cavidades: fisuradas y no fisuradas.

En el caso de cavidades no fisuradas el sello es logrado por medio del principio hidrodinámico, cuyo principio de operación es simple: el crudo almacenado está flotando sobre una cama de agua y, dado que la caverna se localiza bajo el nivel freático, el agua ejerce una presión hidrostática en todos los puntos de la caverna, mayor a la interna, evitando fugas.

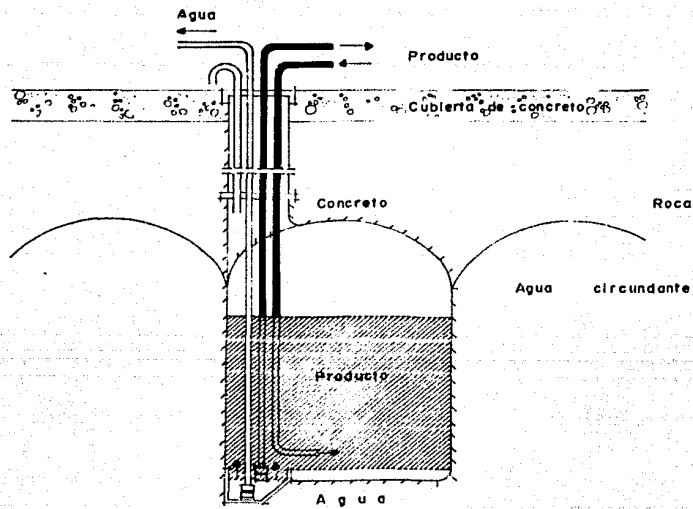
Este tipo de sello se usa en rocas de baja permeabilidad y porosidad y existen dos tipos principales:

a) Cavidades con lecho de agua fijo: El nivel de la cama se mantiene constante por medio de una bomba con control de nivel, ubicada en el fondo de la cavidad (Figura 6). Se requiere de un régimen constante durante todo el año.

Si lo anterior no puede ser cumplido, la operación de la cavidad puede ser llevada a cabo por medio de inyección adicional de agua, excavando una galería en la parte superior de la cavidad (Figura 7).

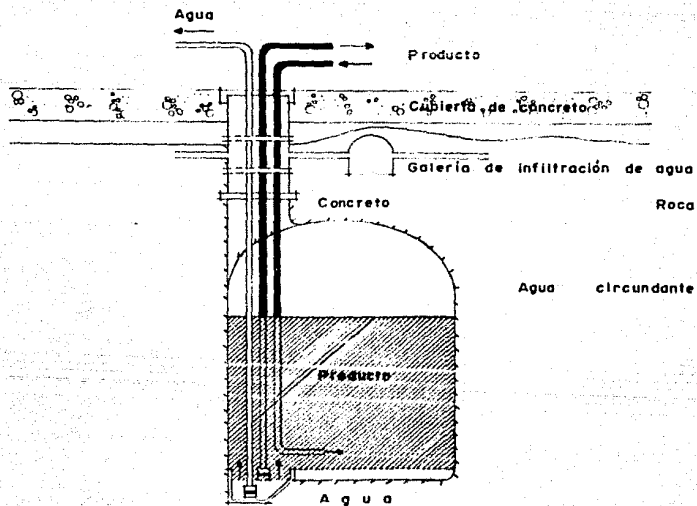
El grosor de la cama de agua es aproximadamente 0.5 a 1 metro. El nivel de la superficie del petróleo fluctúa, al igual que el espacio de gas encima del crudo, por lo que crea riesgos de explosión.

b) Cavidad con lecho de agua variable: Se usa cuando el producto a almacenar es volátil. El nivel del producto almacenado se mantiene constante, mediante la variación del grosor del lecho de agua. Cuando la caverna está "llena", el grosor del



CAVIDADES CON LECHO DE AGUA FIJO





CAVIDAD CON LECHO DE AGUA FIJO, OBTENIDO POR INYECCION DE AGUA

PAGINA 21  
 FIGURA Núm. 7

lecho de agua se mantiene al mínimo y cuando la caverna está "vacía", se llena de agua. El agua y el producto se manejan siempre simultáneamente y a velocidades similares (Figura 8).

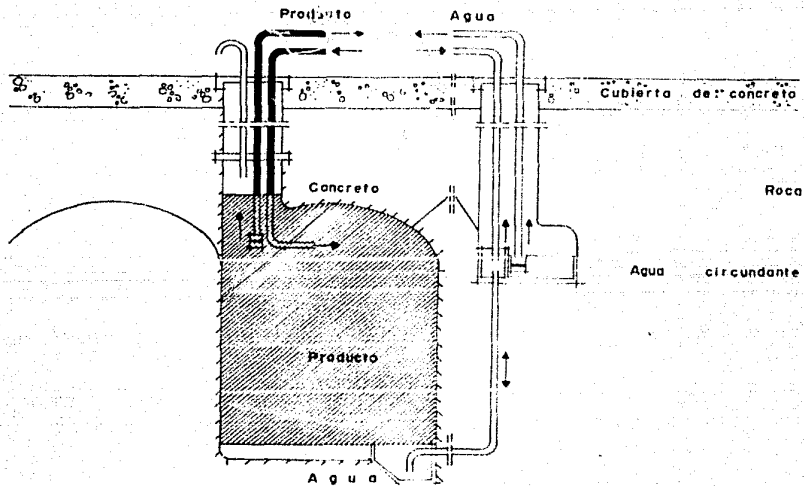
Debido al nivel constante de petróleo, el volumen de gas será también constante, por lo que se prevendrán los riesgos de explosión.

Las cavidades fisuradas requieren de un recubrimiento interno que puede ser una pintura multicapa espreada en todas las paredes de la caverna (Figura 9). Requieren de la eliminación del agua captada del subsuelo. Este método de construcción es más costoso que el de sello hidrodinámico, pero ofrece una serie de ventajas como:

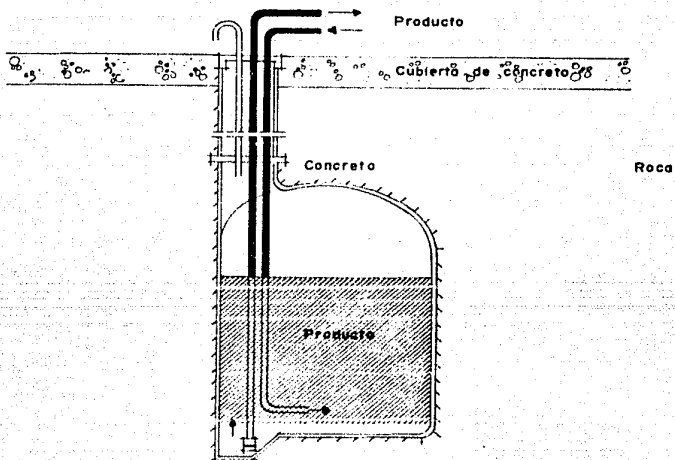
- Puede construirse en rocas de baja estabilidad.
- No necesita la existencia de agua circundante.
- El producto está protegido de contaminaciones externas y puede ser utilizado para productos cuya demanda está en función de su pureza y estabilidad.

Si se requiere de un producto que requiera medidas de seguridad estrictas, se puede usar una caverna de doble pared, donde el espacio entre paredes sirve como área de control de fugas.

Las cavernas se equipan con todos los instrumentos para control remoto de la presión, de los niveles, de las temperaturas y para verificar las operaciones del equipo.



CAVIDAD CON LECHO DE AGUA VARIABLE



CAVIDAD

CON

RECUBRIMIENTO

DE

PINTURA

PAGINA 24

FIGURA Núm. 9

c)ALMACENAMIENTO EN MINAS ABANDONADAS. (18.72)

Frecuentemente se utilizan minas abandonadas como almacenamientos subterráneos. Estas pudieron haber sido minas de sal, carbón, piedra caliza, lignito, etc.

Como consideraciones iniciales deben determinarse la ausencia o presencia de agua y el grado de comunicación entre la cavidad de la mina y la roca saturada de agua que la rodea.

Se aplican las pruebas y consideraciones hidráulicas comunes. Es necesario aplicar pruebas que aseguren que el techo no ha sufrido deterioros (como hundimientos) a causa de las operaciones de minería.

Una vez que se ha convertido la mina a almacenamiento, aplican las mismas condiciones que para cavernas minadas en roca.

d)ALMACENAMIENTO EN CAVIDADES CREADAS POR EXPLOSIONES NUCLEARES. (18)

La creación de cavidades mediante el uso de explosiones nucleares controladas es un método más para crear un almacenamiento subterráneo.

El problema principal consiste en escoger un sitio, a una profundidad adecuada, en donde pueda ser colocado el explosivo. A una cierta distancia arriba de este sitio, debe existir una capa de roca impermeable, que evitará que haya fugas hacia los estratos superiores.

Es importante además el muestreo de las aguas a fin de evitar su contaminación radiactiva.

La cavidad formada por una explosión nuclear controlada

es inicialmente una esfera que degenera en una cavidad cilíndrica, debido al colapso del techo, como se puede apreciar en la Figura 10.

La detonación causa que algo de roca vaporice y otra se funda, por lo que se formará un charco de roca fundida que formará el piso de la cavidad.

La altura de la chimenea, generalmente varía entre 3 y 5 veces el radio de la cavidad.

Debido al impacto de la explosión, son creadas unas fracturas que se propagan desde el punto de disparo (Ver Figura 11) y cuya extensión es de suma importancia.

La bibliografía señala que esta extensión es máxima en la dirección vertical arriba del punto de disparo y que será aproximadamente 6 a 8 veces el radio de la esfera inicial. En direcciones laterales, se mencionan fracturas con una extensión de más o menos 3 veces el radio y abajo del punto de disparo se encuentran las fracturas menos extendidas con longitudes de 1.5 veces el radio de la esfera inicial.

La bibliografía proporciona también una ecuación para calcular el volumen de la esfera inicial:

$$R = \frac{CW^{\frac{1}{3}}}{(\rho H)^{\frac{1}{4}}} \quad \dots \text{Ec. (1)}$$

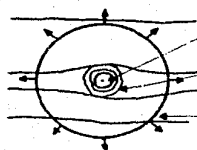
donde:

R=Radio de la cavidad, ft

C=Constante igual a 290

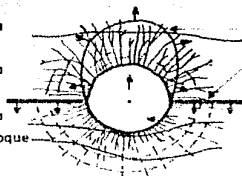
W=Magnitud de la explosión, kilotoneladas

$\rho$ =Densidad de la roca arriba del punto de explosión, g/cm<sup>3</sup>



3 MSEG

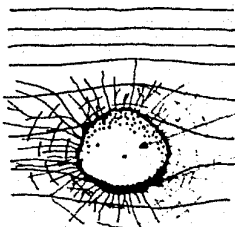
Roca vaporizada  
Roca fundida  
Compresión violenta de la onda de choque



300 MSEG

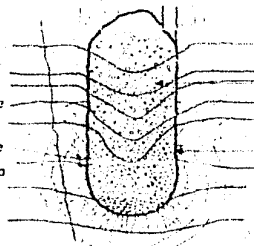
Fracturas abiertas  
Retorno de la onda de choque (reflejada en la superficie del suelo)  
Cavidad expandida

( MSEG = Microsegundo )

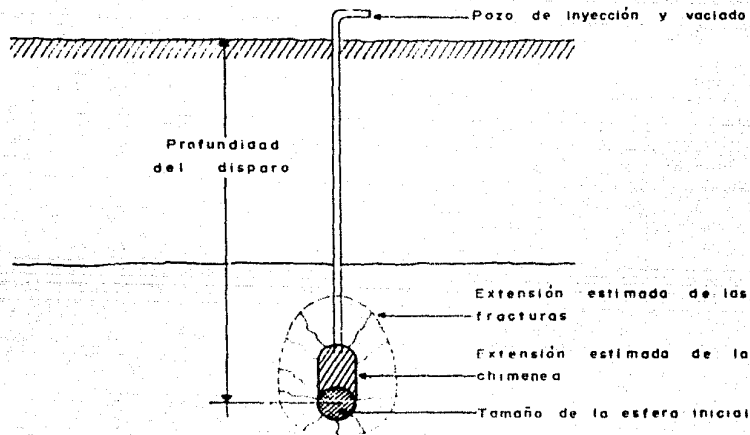


3 SEG

Cavidad inestable  
Acumulación de roca fundida



Fragmentos de la chimenea  
Solidificación de la roca fundida  
Configuración final



FRACTURAS

FORMADAS

DURANTE

UNA

EXPLOSION

NUCLEAR

PAGINA

28

FIGURA N.º

11



h=Profundidad del disparo. ft

De lo anterior puede verse que es posible desarrollar una cámara de almacenamiento del tamaño deseado, dentro de los límites impuestos por consideraciones geológicas.

Después de un período de enfriamiento, que es arriba de los diez meses, se perforan los pozos por donde se purgarán los gases radiactivos. Durante este tiempo, decae la radiactividad de los productos de fisión, como son Xenon 133, Yodo 131 y Kriptón 85.

Se puede tolerar una pequeña cantidad de radiactividad en los gases de salida que puede luego ser diluida con gases de combustión.

#### e) ALMACENAMIENTO EN TIERRA CONGELADA. (18,20)

Este tipo de almacenamiento se construye cerca de la superficie. Se basa en el hecho de que, al refrigerar la tierra, se congela el agua que contiene y se crea una barrera impermeable, que permitirá el almacenamiento de hidrocarburos.

Antes de empezar el diseño y la construcción, se requiere hacer una investigación detallada, para verificar que el suelo del sitio seleccionado contenga agua y que consista de capas alternadas de arena, grava y piedras del tamaño de un quijarro, además de algo de arcilla arenosa.

Deben tomarse y analizarse varias muestras del suelo, para determinar sus propiedades durante el congelamiento y estructurales. De esta información, se determinan las dimensiones óptimas del tanque y el tamaño máximo posible, así como los

requerimientos de refrigeración.

Estudios de costos reportados en la bibliografía, muestran que los almacenamientos de este tipo resultan muy económicos si se dispone del suelo adecuado.

La figura 12 muestra una representación esquemática. La construcción se inicia colocando tubos verticales desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 50 metros, formando un círculo de 35 metros de diámetro.

Cada tubo se inspecciona para checar que no exista desviación con la vertical. Se incluyen tubos con termopares en varios puntos dentro y fuera del anillo para verificar las temperaturas del suelo y el progreso del congelamiento.

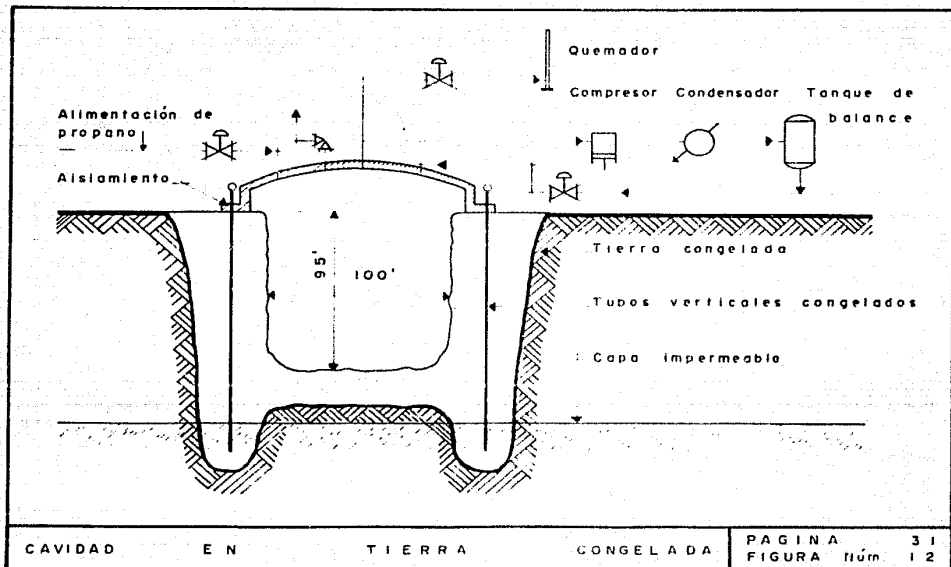
En seguida, se instala el equipo de refrigeración en la superficie y se conecta al anillo formado con los tubos verticales. Se introduce propano como refrigerante y se inicia entonces el congelamiento del suelo.

La excavación comienza cuando se logra un congelamiento completo del anillo y se obtiene el espesor adecuado.

Con maquinaria de construcción (tipo bulldozer) se forma un agujero de diámetro aproximado de 30 metros y profundidad 28 metros.

En forma simultánea a la excavación, se construye con acero la tapa que cubrirá el anillo congelado y se le colocará aislamiento por baja temperatura. Se revisará además, que la tapa sea hermética para que no permita escapes de producto.

También en forma simultánea, se construye un pozo que



alojara a la bomba de remoción de producto.

Cuando la excavación se completa, se coloca la tapa sobre esta y se fija sobre un anillo de sello. La carga inicial se vaporiza y se usa la capacidad de refrigeración completa para congelar el fondo de la olla. Paulatinamente, la temperatura del piso se iguala a la de las paredes.

Por último, se une el pozo de la bomba al fondo de la olla a través de una tubería colocada en un túnel minado a través de la pared congelada.

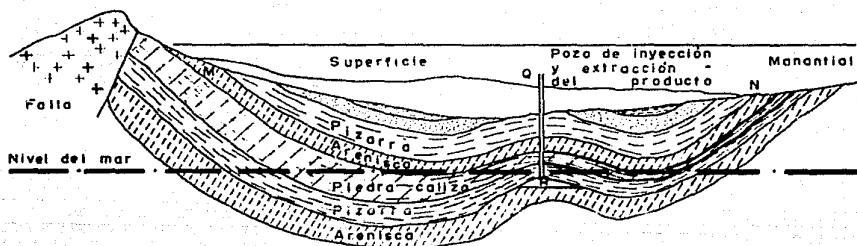
#### f) ALMACENAMIENTO EN ACUIFEROS. (3, 18, 19, 29)

El término acuífero se aplica a formaciones subterráneas porosas, que contienen agua que puede moverse libremente, ocupando los espacios libres entre los granos de arena.

En la figura 13 se muestra una sección de un acuífero típico. El agua puede entrar a la formación por un punto de gran elevación, como un costado de montaña (M) y fluir hacia otro punto de menor elevación (N).

Las capas de arena están cubiertas usualmente con capas impermeables u otras rocas. Cuando se encuentra una estructura cerrada con arena y cubierta con pizarra, como en R, es posible almacenar en la arena porosa. Este tipo de operación, se conoce como almacenamiento en acuífero y en ella, el hidrocarburo desplaza el agua, alejándola del pozo de inyección (Q).

La figura 13 ilustra también la naturaleza de las capas de roca, incluyendo las areniscas permeables a través de las cuales el agua se puede mover rápidamente. Algunas piedras cali-



zas pueden ser permeables debido a canales, pero esta condición no se extiende por grandes distancias a diferencia de los acuíferos, que suelen extenderse por varios kilómetros.

La figura 14 muestra los elementos que son prerrequisito para utilizar el acuífero como almacenamiento subterráneo de hidrocarburos:

a) Una estructura impermeable con una forma tal, que permita la acumulación de hidrocarburos, un tipo muy común es el llamado anticlinal.

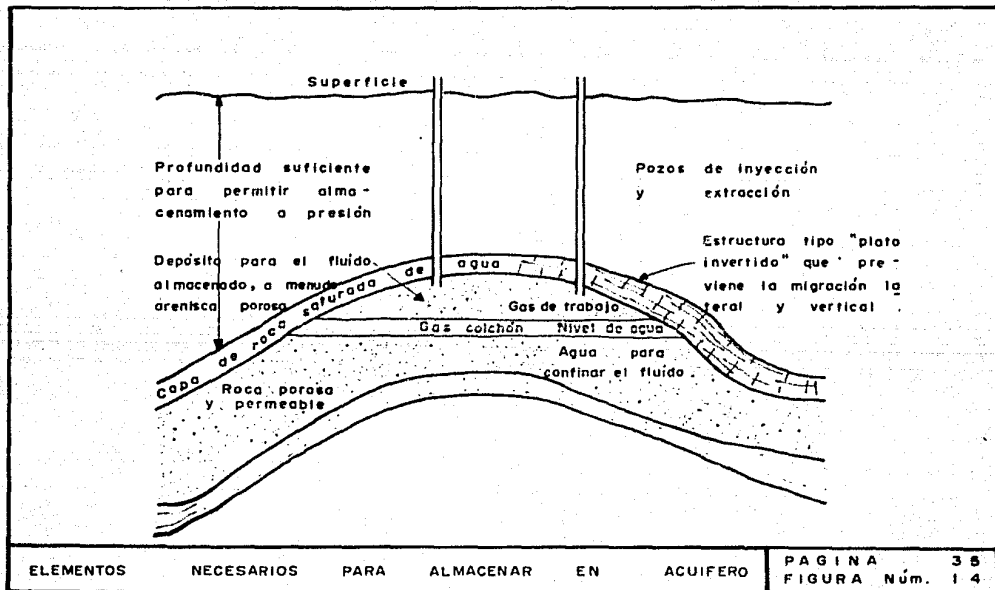
b) Una capa de roca saturada de agua, que imponga limitaciones hacia arriba y lateralmente, para asegurar que el producto almacenado no migre a causa de las fuerzas de flotación.

c) Un contenedor o lecho poroso de roca, en el cual se pueden inyectar o extraer hidrocarburos a través de pozos.

d) Es necesario que la formación se encuentre a una cierta profundidad, que permita el almacenamiento a una presión mucho mayor que la atmosférica, idealmente arriba o cercana a las presiones típicas en los ductos.

e) El agua debe estar presente dentro del depósito, para confinar el hidrocarburo en todas direcciones. Abajo del hidrocarburo almacenado, el agua se mueve bajo un gradiente de presión, para dejar espacio al producto almacenado. En la capa de roca, la función del agua es sellar la roca, para evitar penetración del producto.

Como fue mencionado, la forma más común de estructura subterránea adecuada para almacenamiento, es la de colina o



anticlinal (Figura 15).

Las características de interés son la altura entre la cima de la colina y el valle más cercano. Esta altura es conocida como el cierre y está relacionada con el máximo tamaño que tendrá el depósito antes de permitir movimiento horizontal de producto.

El cierre tiene dimensiones muy pequeñas que van de 30 a 90 metros, distancia que es relativamente baja, comparada con las distancias laterales que pueden ser del orden de varios kilómetros.

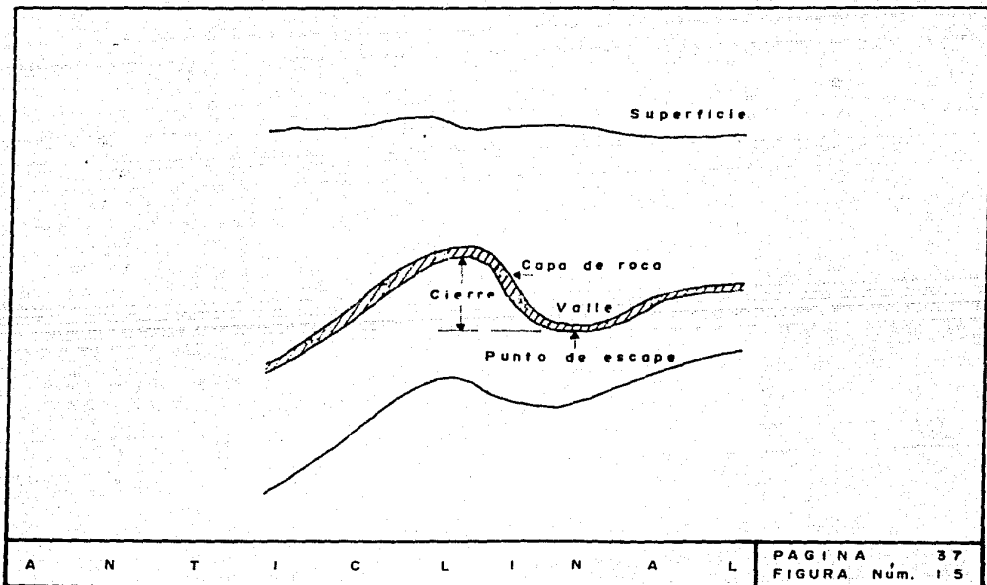
La figura 15 da una falsa impresión de las verdaderas proporciones de la estructura, debido a que en la escala vertical la distancia real por unidad es mayor que en la escala horizontal. Realmente, los lados de la colina tienen una inclinación de uno a dos grados respecto a la horizontal y usualmente, uno de los lados es más empinado que el otro.

La calidad de la roca almacén está caracterizada por dos magnitudes: porosidad y permeabilidad. La porosidad útil teórica es igual a la relación (expresada en porcentaje) del volumen de huecos ligados entre sí, al volumen total de la muestra de roca. Para un almacenamiento en acuífero, la porosidad deberá ser mayor de 15%.

La permeabilidad es una medida de la facilidad con la que circulan los fluidos dentro de la roca y tiene un efecto pronunciado en la eficiencia con la que el producto inyectado desplaza el agua.

La permeabilidad se calcula con la ley de Darcy. La





unidad práctica es el milidarcy. Para almacenamiento se consideran como permeabilidades deseables las mayores a 200 milidarcys, para evitar un número prohibitivo de pozos.

Cuando se verifica la factibilidad de un almacenamiento desde el punto de vista técnico y económico, los siguientes puntos son de mucha importancia:

- a) Volumen de almacenamiento y geometría.
- b) Capacidad del pozo de inyección.
- c) Tipo de accionamiento.
- d) Inversiones, incluyendo el "gas colchon" y los costos de operación.
- e) Localización geográfica.
- f) Factores ambientales (contaminación).

El tipo de accionamiento influye considerablemente sobre el comportamiento operacional del almacenamiento en formaciones porosas. En teoría, existen dos tipos: expansión de gas y accionado por agua, aunque en la práctica siempre existe una combinación de los dos tipos.

El tipo expansión de gas se comporta como un tanque presurizado, en el cual el contenido de gas y la presión son proporcionales. El comportamiento de la presión en el caso de accionamiento por agua es considerablemente más complicado; aunque existe cierto contenido de agua, la relación entre éste y la presión no es lineal.

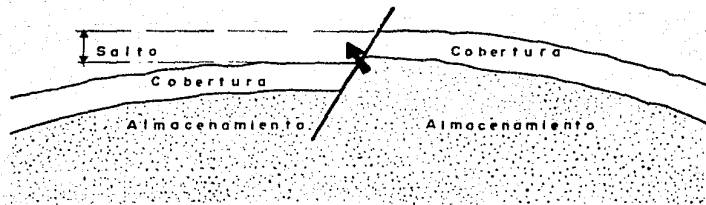
Aproximadamente la mitad del gas total en la formación está disponible como "gas de trabajo" (Figura 14) y el resto

constituye lo que se llama "gas colchón", que actúa como un amortiguador de presión para retener el agua del depósito. Las inversiones dependen mucho de la relación entre gas de trabajo y gas colchón; esta relación depende a su vez de dos parámetros: la permeabilidad de las dos fases (gas-agua) en el límite del almacenamiento y la mínima presión esperada en el almacenamiento.

El desarrollo de acuíferos incluye la localización de la estructura subterránea. Uno de los primeros factores que deben considerarse es la gran inversión inicial que debe realizarse al perforar, muestrear y probar pozos siguiendo los análisis geofísicos tradicionales. La búsqueda de un almacenamiento subterráneo en una zona dada, es una operación progresiva, que tiene un carácter aleatorio; cada fase de estudios y trabajos es consecuencia de lo anterior y puede conducir a interrumpir bruscamente la exploración. Aun si se encuentra el acuífero, puede ocurrir que no cierre lo suficiente para prevenir escapes, o que sea tan grande que sea difícil recuperar el gas inyectado.

La detección de fallas geológicas es también esencial. Es necesario conocer la amplitud de su salto (Figura 16), que puede poner en comunicación directa el almacenamiento con las formaciones naturales de la cobertura y causar puntos de escape de producto.

Una vez que la estructura ha sido localizada y todo señala una capa de roca impermeable, se hacen inyecciones de gas piloto que emplean presiones superiores a la presión inicial del acuífero para lograr que el agua se mueva. Debe cuidarse que la



sobrepresion no cause fracturas con las que se perderia la estanqueidad de la formacion.

La duracion total del reconocimiento de una estructura con fines de almacenamiento es aproximadamente tres años. Una vez que el acifero es desarrollado, funciona del mismo modo que los pozos de gas.

Por ultimo, es necesario mencionar que, debido a que se ponen en contacto el agua y el gas, se hacen necesarias instalaciones superficiales en donde se efectue la purificacion y deshidratacion del producto.

CAPITULO III  
CRITERIOS DE SELECCION DE UN ALMACENAMIENTO  
SUBTERRANEO Y ELECCION DEL MAS ADECUADO A  
NUESTRO PAIS

En el capitulo anterior se explicaron brevemente varios tipos de almacenamientos subterráneos, que fueron agrupados en dos clases: Almacenamiento en cavidades y almacenamiento en medio poroso. La selección de cualquiera de estos tipos depende de la consideración de factores como:

- 1.- Capacidad requerida de almacenamiento.
- 2.- Tipo de fluido a almacenar.
- 3.- Ubicación del almacenamiento.
- 4.- Existencia de las condiciones geológicas adecuadas en el lugar donde se desea ubicar el almacenamiento.
- 5.- Costos de construcción

Debe remarcarse que antes de hacer una selección definitiva del tipo de almacenamiento, debe realizarse un estudio de estabilidad a largo plazo, a fin de garantizar la seguridad de las personas y del medio ambiente.

Debemos hacer la aclaración que para este trabajo, el almacenamiento en cavidades formadas por explosiones nucleares no fue considerado, debido a que se encuentra en fase experimental y a que la experiencia a nivel mundial es muy limitada.

- 1.- Capacidad requerida de almacenamiento

Estudios de costos reportados en la bibliografía, señalan que el almacenamiento en tierra congelada es favorable si existe un tipo de suelo adecuado, resultando factible y económico para capacidades de 15900 a 159000 m3.

Debido a que este trabajo intenta dar soluciones al déficit de almacenamiento que tiene nuestro país, el cual es de varios miles de metros cúbicos, el almacenamiento en tierra congelada no representa una alternativa viable, por lo cual también se desecha esta opción.

## 2.- Tipo de fluido a almacenar.

La Figura 17 muestra el tipo de almacenamiento adecuado en función de la sustancia a almacenar, de acuerdo con la experiencia de varios fabricantes (19).

Puede notarse, en general, que los almacenamientos en medio poroso no son adecuados para productos en estado líquido, que es el caso que nos ocupa en este trabajo. Además de esta, los almacenamientos en medio poroso tienen las siguientes desventajas (29):

- Es difícil determinar los límites de la estructura-almacén.

- Son una trampa ideal para el producto y normalmente hay un gran porcentaje de producto que no se recupera.

- Los hidrocarburos están saturados con agua y en clima frío pueden formar hidratos y taponar la tubería si no se agrega metanol.

## 3.- Ubicación del almacenamiento.

Tipo de almacenamiento	Producto	Crudo e hidrocarburos líquidos					Lpg				Gases			Aire	Lng	Desechos	
		Crudo	Acete combustible	Gasoleo	Gasolina	Keroseno	Propano	Butano	Buteno	Gas "Town"	Gas natural	Etileno	Aire comprimido	Lng	Sólidos	Líquidos	
Cavernas	en sal	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◊	●	●
Cavernas	en roca	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◻	●	◻	●	●	
Minas	abandonadas	●	●	—	—	—	—	—	—	●	●	—	—	—	●	◊	
Acuíferos		—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	—	—	—	—	—	
Depósitos agotados de gas o petróleo		—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	—	—	—	—	—	
Tanques	de acero	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◊	●	

- Condiciones favorables para el almacenamiento
- ◊ Almacenamiento posible
- No es posible almacenar
- ◻ A la fecha no es posible. Investigación y desarrollo en proceso

TIPO DE ALMACENAMIENTO  
EN FUNCION DE LA SUBSTANCIA

RECOMENDADO  
A ALMACENAR

PAGINA 44  
FIGURA Núm. 17



Como se menciono, la mayor parte de la produccion nacional de crudo tiene lugar en el sureste de nuestro pais. La Figura 18 muestra que en esta misma zona se encuentran los centros de embarque de crudo a exportacion y por lo tanto, la terminal de almacenamiento planeada debiera situarse en esta parte de Mexico, que carece de minas abandonadas de tamaño adecuado, razon por la cual se elimina esta opcion, quedando solo dos alternativas factibles (19):

Cavernas minadas en roca

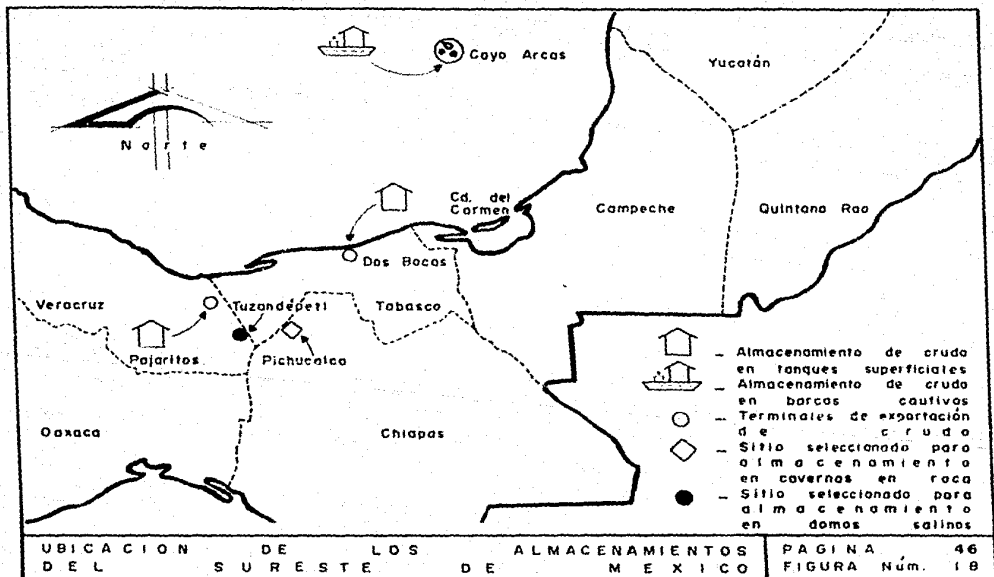
Cavernas minadas en domos salinos

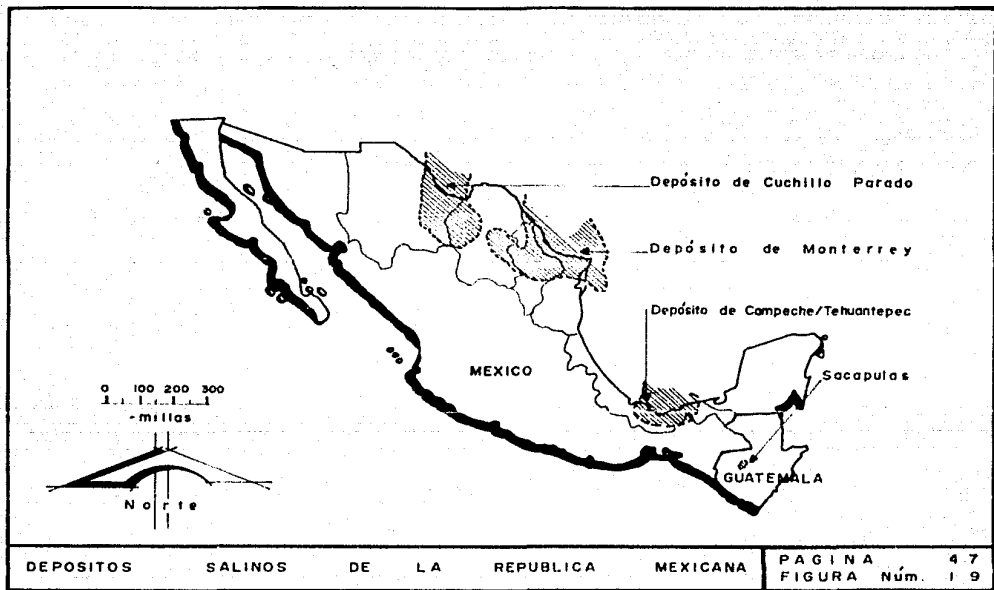
4.- Existencia de las condiciones geológicas adecuadas en el lugar donde se desea ubicar el almacenamiento.

Como dijimos anteriormente, dos de los factores que más influyen en la seleccion del tipo de almacenamiento, son la ubicacion, que debe ser cercana a los sistemas de transmision y a los centros de consumo y, por supuesto, la existencia de las condiciones geológicas adecuadas. Por tal motivo, fue necesario estudiar varias regiones para encontrar la más favorable, llegando a la conclusion que en Pichucalco, Chiapas (Figura 18) se encontraban las mejores condiciones para el desarrollo de almacenamiento en cavidades minadas en roca.

En cuanto a las condiciones geológicas requeridas para el almacenamiento en domo salino se sabe que:

Existen en Mexico (Figura 19) dos cuencas principales en las que hay depósitos salinos: la cuenca del norte, que se encuentra compuesta principalmente de yeso y piedra caliza con alto





contenido de magnesio y la cuenca del suroeste, compuesta principalmente por cloruro de sodio con pequeñas cantidades de sulfato de calcio.

Como puede observarse en la figura, la cuenca del norte esta dividida en dos partes:

- Deposito de Cuchillo Parado, en los estados de Chihuahua y Coahuila.

- Deposito de Monterrey, en los estados de Coahuila, Nuevo Leon y Tamaulipas.

Debido a la naturaleza de este trabajo, es obvio que la cuenca de interes es la del suroeste de la Republica, en donde existen mas de 85 domos y la cual cubre una superficie aproximada de 300 kilometros de longitud y 70 kilometros de ancho, en los estados de Veracruz, Chiapas y Tabasco.

Los estudios mencionados revelaron que los siguientes eran los domos mas adecuados (13,14 y 15):

NOMBRE	ESTADO	CIMA DEL DOMO (m)	EJE MAYOR (km)	EJE MENOR (km)
Tuzandépetl	Veracruz	500	10	5
Moloacan	Veracruz	500	7	4
Ixhuatlán	Veracruz	500	1	0.5
Nvo. Teapa	Veracruz	500	2.5	1
Pajaritos	Veracruz	800	3.5	2
Rabón Grande	Veracruz	1000	4	3
La Venta	Tabasco	800	7	4
El Plan	Veracruz	1000	6	4

Y la conclusión fue que de estos, el domo mas adecuado

es el de Tuzandepetl, por las siguientes razones:

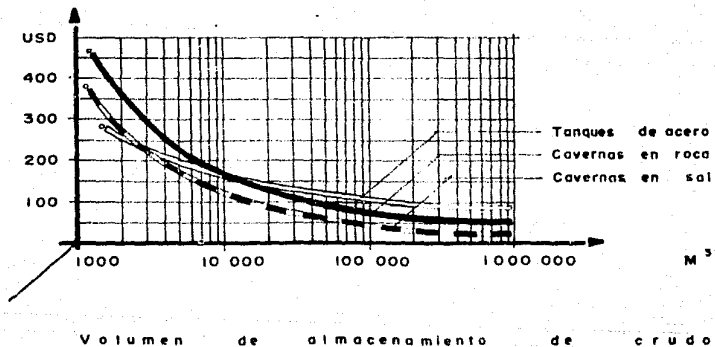
- La cima de la estructura esta a poca profundidad.
- El espesor de la sal es adecuado.
- Se analizaron 193 muestras obtenidas del pozo exploratorio concluyéndose que la composición tenía 96% de pureza de cloruro de sodio.
- Se encontro anhidrita en forma de laminas y potasio en forma de bandas. en un porcentaje insignificante. que no afecta la buena calidad de la sal.
- En el pozo exploratorio se perforó hasta 2800 metros sin lograr atravesar la masa salina.
- Cercanos a Tuzandepetl existen ríos y pozos que podrían abastecer el agua para formar las cavidades.
- Su localización es cercana al Golfo de México, donde podría desecharse la salmuera formada.
- Existe área superficial adecuada para localizar las presas de salmuera.

#### 5.- Costos de construcción

Estudios detallados (13,14 y 15) realizados por dependencias gubernamentales (Petroleos Mexicanos e Instituto Mexicano del Petróleo) revelaron que:

El costo relativo de una caverna minada en roca era mayor al de una cavidad minada en domo salino, para las capacidades manejadas en este trabajo, según se muestra en una grafica típica (figura 20). obtenida de la experiencia de varios fabricantes de almacenamientos (19).

C O S T O S    p o r    M <sup>3</sup>  
 (Los costos pueden variar en  
 forma significativa dependiendo de  
 las condiciones específicas del lugar)



De lo anterior se concluye que el tipo de almacenamiento más adecuado a las necesidades de nuestro país es el almacenamiento en domo salino.

CAPITULO IV  
A) FUNDAMENTOS TEORICOS QUE EXPLICAN EL  
PROCESO DE CONSTRUCCION DE CAVIDADES EN  
ESTRUCTURAS SALINAS

En un proyecto de almacenamiento de hidrocarburos en domos salinos, se llevan a cabo tres etapas principales:

1) Estudios previos para determinar la factibilidad del almacenamiento.

2) Creación de la cavidad.

3) Utilización como almacenamiento.

1) Durante la primera etapa, se perfora un pozo exploratorio, cuya finalidad es definir la calidad de la sal y sus propiedades (para almacenamiento y comercialización), la calidad de la cubierta de roca y definir la posición de la caverna.

Durante la perforación del pozo se recaban datos, se toman muestras y se hacen registros de lodos, desde la superficie hasta tocar el "caprock", cada cinco metros.

Al llegar a la cima de la sal, se perfora un intervalo considerable (100 metros aproximadamente) sin tomar muestras, ya que este intervalo constituirá el techo de la cavidad.

Una vez que se ha perforado esta parte, se reanudará el muestreo hasta alcanzar el intervalo calculado para construir la cavidad. Si este intervalo muestra condiciones favorables para el



desarrollo de la cavidad, se suspende la perforación. En caso de que la sal no reúna las características deseables, se continuará con la perforación y el muestreo hasta encontrar un espesor adecuado, que reúna las características deseadas.

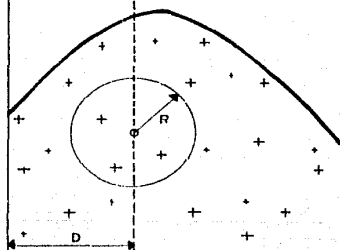
La profundidad mínima para el desarrollo de la caverna se determina en base a la presión del producto por almacenar, la cual no debe ser mayor al gradiente de tractura de la formación salina. En cuanto al límite máximo, debe tomarse en cuenta que la sal se comporta como un fluido plástico a medida que la profundidad crece; normalmente las cavernas no son diseñadas para profundidades mayores de 1800 metros (13), a fin de evitar que las cavidades se cierren y/o las tuberías sean atrapadas.

Se recomienda localizar la cavidad de tal modo que la influencia de ésta sobre el borde del domo salino sea insignificante. La Figura 21 muestra la distancia mínima que la bibliografía (10) recomienda entre el borde del domo y el centro de la cavidad, siendo esta una función del radio R.

Se recomienda hacer las siguientes mediciones a las muestras de sal: densidad, composición química (pH, resistividad, contenido de insolubles) y composición mineralógica (impurezas como arcillas o lilitas). En el intervalo elegido, la sal debe tener un contenido máximo de insolubles de 5%, (14) así como un contenido máximo de sales más solubles que el cloruro de sodio de 15% (15), las cuales deben estar presentes en forma diseminada, evitando en lo posible las capas, que podrían relocalizarse y ocasionar rupturas en los tubos.

Borde del domo

Eje de la cavidad



$$D = (4 \text{ a } 5) \times R$$

LOCALIZACION

DE

UNA

CAVIDAD

PAGINA 54  
FIGURA Núm. 21

La forma preferida por estabilidad es la de un cilindro. Debe considerarse que, durante su vida útil, la cavidad crecerá de manera no uniforme. Si dividimos la altura total en diez partes, se tendrán los siguientes porcentajes de aumento de volumen (15):

PARTE	% DE AUMENTO DE VOLUMEN
1	0.25
2	0.35
3	0.40
4	2.00
5	3.00
6	4.00
7	6.00
8	15.00
9	29.00
10	40.00

De donde puede notarse que el aumento de volumen es mucho más importante en la parte baja de la cavidad y que para lograr una forma similar a un cilindro al cabo de la vida de la caverna, debe elegirse una forma inicial como la que se muestra en la Figura 22 : como truncado invertido.

El valor del diámetro máximo de la cavidad debe calcularse de modo que ésta tenga suficiente estabilidad mecánica para que pueda ser utilizada al menos 20 años. La estabilidad depende esencialmente de dos factores:

- La diferencia de presión entre el terreno y la caverna.
- El espesor del pilar entre cavernas.

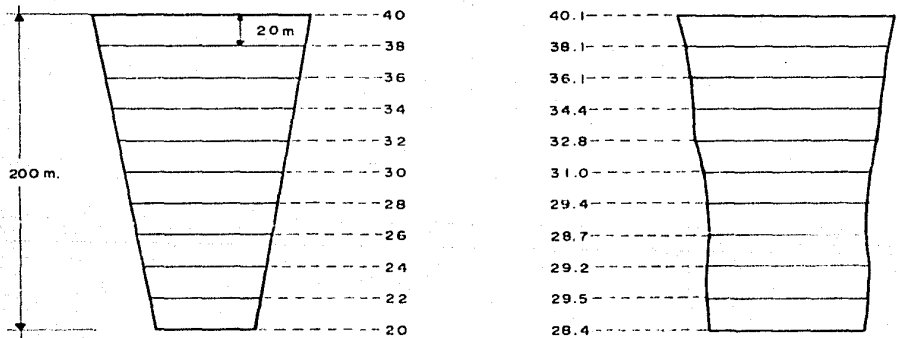
Si la presión interior es demasiado grande, se fractura

Forma Inicial

Diámetros iniciales  
(metros)

Diámetros finales  
(metros)

Forma de la cavidad  
al final  
su vida útil



la formación salina. Si es demasiado pequeña, puede ocasionarse fluencia, caída de bloques y en general, una pérdida de volumen.

La bibliografía (10) señala que en una zona de almacenamiento, en donde existan varias cavidades, debe respetarse una distancia mínima entre cavernas, porque las tensiones en el pilar deben ser limitadas:

$$\text{Ancho mínimo del pilar} = 1.4D_1 + 1.4D_2 + 20 \dots \text{Ec. (2)}$$

Donde  $D_1$  y  $D_2$  son los diámetros de dos cavidades vecinas (metros).

La constante 20 metros es un margen de seguridad para tener en cuenta la incertidumbre sobre la posición exacta del eje de la cavidad con relación a la vertical de la cabeza del pozo. En efecto, se puede calcular que una desviación media de 1.5 conduce a un desplazamiento del orden de 25 metros a 1000 metros de profundidad.

2) Durante la etapa de creación de la cavidad, se inyecta agua, lo que ocasionará que la sal del domo se disuelva y se genere un agujero que, durante esta etapa, se encontrará siempre lleno de salmuera.

El principio fundamental de la disolución reside en el hecho de que el agua es capaz de disolver sal, mientras no este saturada. El esquema es el siguiente:

AGUA DULCE + SAL = SALMUERA

SALMUERA + SAL = SALMUERA MAS CONCENTRADA

A esta etapa se le llamará en lo sucesivo "LIXIVIACION",

nombre de la operación unitaria en la cual se disuelve preferencialmente un componente de una mezcla.

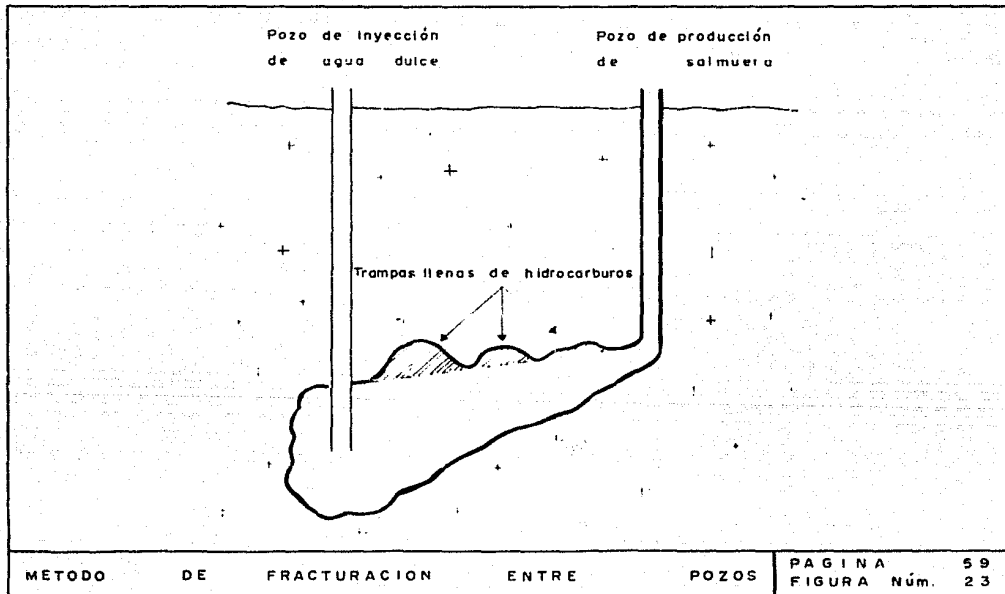
3) La tercera etapa sera la utilización de la cavidad como almacenamiento, conocida comunmente como "EXPLOTACION". Durante ella, se usará el espacio generado en la etapa anterior, para almacenar hidrocarburos líquidos. Es necesario inyectar el producto a una presión suficiente para desplazar la salmuera que se encuentra dentro de la cavidad. Cuando se requiera recuperar el producto, se llevará a cabo una operación inversa, inyectando salmuera para obtener producto en la superficie.

Se explicaran en seguida los dos metodos mas utilizados para la formación de cavidades (10):

- a) Fracturación entre pozos.
- b) Caverna aislada.

El metodo de fracturación entre pozos se muestra en la Figura 23 ; consiste en perforar primero dos pozos en la sal, a una distancia que puede variar de 50 a 150 metros y con una técnica apropiada, crear una fractura en la sal que une los dos pozos.

La lixiviación se lleva a cabo utilizando uno de los pozos como pozo de inyección de agua y el otro como de producción de salmuera. Este procedimiento ocasiona que se disponga rápidamente de una gran superficie de contacto sal-salmuera, por lo que se obtienen muy rápidamente salmueras casi saturadas, por lo cual es el método preferido de los productores de sal, pero tiene las siguientes desventajas:



- Ocasiona derrumbes de terreno, por lo cual algunos países prohíben incluso esta técnica.

- No es posible controlar la forma de la cavidad, formándose ésta en la proximidad del pozo de inyección de agua dulce. Es necesario intercambiar el pozo de agua dulce con el de salmuera después de un tiempo.

- La fractura presenta partes altas que permiten el estancamiento de producto, cuyo costo debe sumarse a la inversión.

- El hecho de no poder controlar la forma de la cavidad puede ocasionar reducción en el volumen útil de la cavidad, porque no siempre es posible posicionar los tubos a la máxima profundidad.

A causa de estas desventajas, este método casi no se usa en la actualidad.

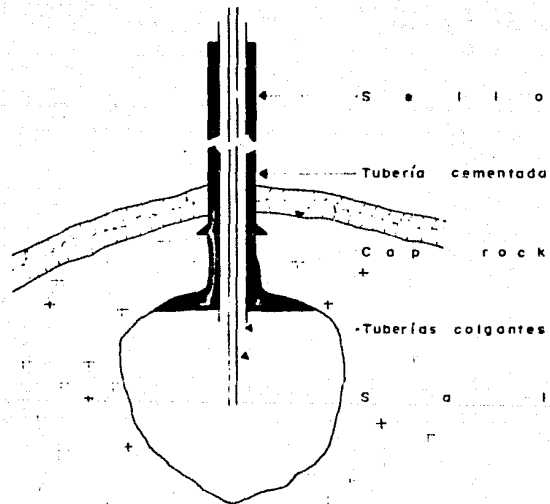
El procedimiento por caverna aislada es el más ampliamente utilizado (Figura 24). La lixiviación y la explotación se llevan a cabo por un sistema de tubos concéntricos. Si se usa un solo pozo, existe la limitación de que, debido a las caídas de presión, a veces no es posible manejar los flujos deseados, por lo cual a veces se perforan varios pozos por caverna.

La lixiviación con varios pozos es más rápida, pero:

- No es fácil controlar irregularidades durante el desarrollo de la cavidad.

- Se crean enormes estalactitas cuyo derrumbe ocurre normalmente mal.





METODO

DE

CAVERNA

AISLADA

PAGINA 61  
FIGURA Núm. 24

- Es necesario equipar los pozos adicionales.
- Es difícil conservar un desarrollo simétrico durante la explotación.

Por estas razones, puede observarse que el procedimiento con caverna aislada con un solo pozo resulta más ventajoso.

Como puede apreciarse en la Figura 24 , es necesaria la presencia de un tercer tubo, a través del cual se inyectará un sello que puede ser líquido o gaseoso, pero, en cualquier caso, insoluble en la sal y cuyas funciones son:

- Proteger la última tubería cementada de la acción corrosiva del agua salada.
- Evitar el crecimiento del techo de la cavidad.

La Figura 25 muestra que hay dos modos principales de llevar a cabo la lixiviación por caverna aislada con un solo pozo: directa e inversa.

Durante la lixiviación directa:

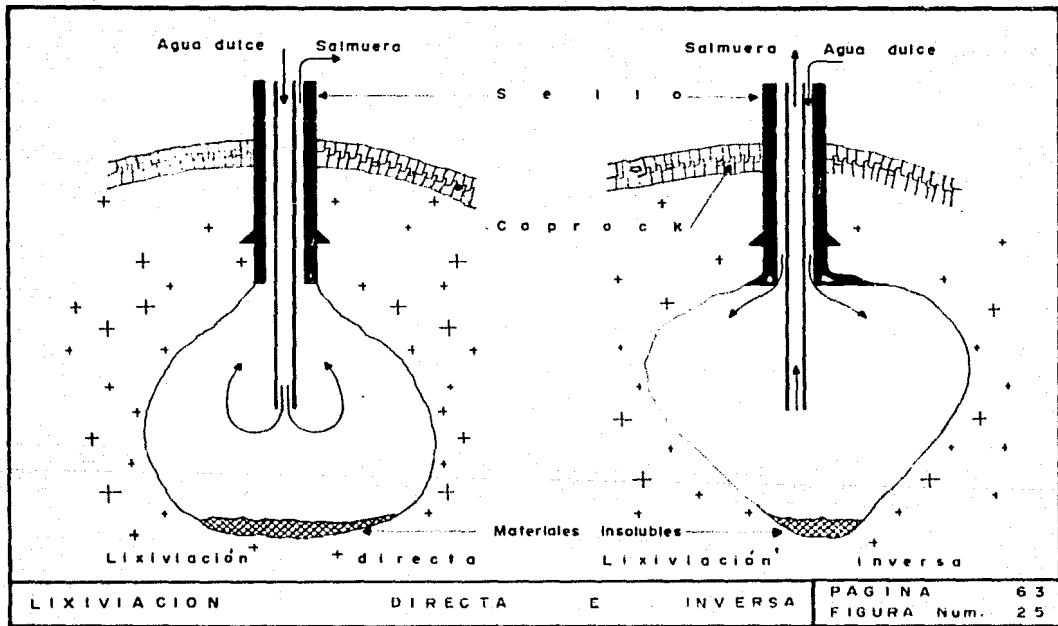
-El agua entra por el tubo central y la salida de salmuera se efectúa por el anular.

-Hay crecimiento más rápido en la parte inferior de la cavidad.

-La salmuera a la salida de la caverna tiene una concentración de 85 a 90 % (con respecto a la saturación).

-La salmuera menos concentrada está en el fondo de la cavidad.

Y durante la lixiviación inversa:



-El agua entra por el anular y la salida de salmuera es por el tubo central.

-Hay crecimiento mas rapido en la parte superior de la cavidad. por lo que existe la posibilidad de obtener techos inestables.

-La salmuera a la salida de la caverna está prácticamente saturada.

-La salmuera menos concentrada está en la parte superior.

Aunque teóricamente el agua es capaz de disolver sal hasta alcanzar la saturación, en forma práctica no es recomendable alcanzarla, debido al tiempo requerido para ello. Los fabricantes de cavernas recomiendan inyectar de 7 a 10 m<sup>3</sup> de agua dulce por cada m<sup>3</sup> de sal a disolver (19). Es necesario colocar en la cabeza de los pozos, medidores de flujo y valvulas de bloqueo para llevar a cabo el control del flujo inyectado e indirectamente, el control del desarrollo de la formación.

Esta recomendación también implica que, durante la construcción de la cavidad, se generará una corriente de salmuera muy concentrada que será necesario desechar de la forma más económica y que minimice los daños ecológicos al lugar, pudiéndose inyectar a formaciones porosas de alta permeabilidad, arrojarse al mar o entregarse a alguna planta donde se recupere la sal para su uso industrial.

Debido al gran volumen de agua salada a desechar, una de las mejores opciones es la de tirarla al mar. Para elegir el

sitio adecuado (5.6). es necesario conocer la distribución de organismos y recabar datos de olas, mareas, corrientes y vientos. Es necesario además, diseñar un difusor que evite que la salmuera se concentre en un solo sitio ocasionando daños o migración de los organismos marinos y por último, es necesario obtener el permiso de las entidades gubernamentales (SEDUE) para realizar el desecho de la corriente de salmuera.

Cuando se desea obtener una caverna, debe considerarse que no todo el volumen excavado puede ser utilizado para almacenamiento (Figura 26) (10):

$V_t$  = Volumen total de la excavación=volumen en el interior de las paredes.

$V_f$  = Volumen ocupado por los materiales insolubles.

$V_c$  = Volumen de sal disuelta.

$V_u$  = Volumen útil.

$V_l$  = Volumen libre.

Considerando que:

$V_c$  = Volumen de sal disuelta=volumen de salmuera contenida en la cavidad

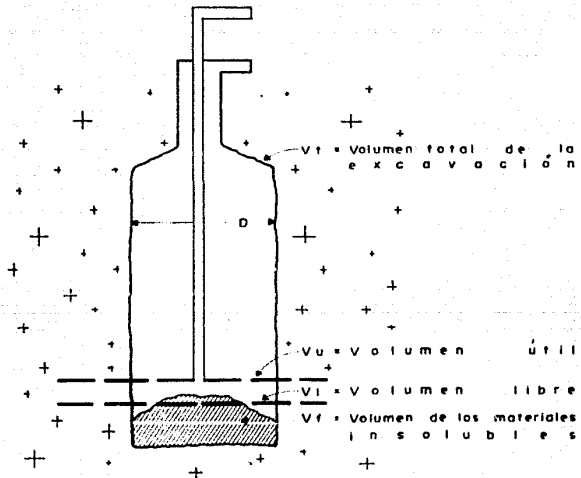
$x$  = Porcentaje de insolubles

$$V_t = V_c + xV_t \quad \dots\dots Ec. (3)$$

Debe notarse que la salmuera llena los vacíos del montón de insolubles que se encuentran en el fondo.

El volumen libre es el volumen "visto" por un sonar

$$V_l = V_t - V_f \quad \dots\dots Ec. (4)$$



VOLUMEN UTIL EN UNA CAVIDAD

PAGINA 66  
FIGURA Núm. 26

Los materiales insolubles aumentan de volumen aparente al amontonarse; puede haber hasta bloques de sal no disueltos. Se define  $f$  como el coeficiente de aumento de volumen y su valor se elige igual a 1.8, de acuerdo a la experiencia de varios fabricantes.

$$V_f = xV_t \quad \dots\dots Ec.(5)$$

$$V_l = V_t - xV_t f = V_t(1 - fx) \quad \dots\dots Ec.(6)$$

Pero una parte del volumen libre no está disponible para el almacenamiento, debido a que:

-Es necesario colocar el tubing (tubo interno) dos metros arriba del punto más alto de los materiales insolubles porque se conocen numerosos casos donde bloques de sal de tamaño variable fueron arrastrados al interior del tubo, acabando por obstruirlo hasta el punto de impedir toda circulación.

-Al hecho de que el montón de insolubles es más bien cónico y se admitirá que eso equivale a duplicar la altura de dos metros y el volumen perdido es:

$$V_p = \pi D^2 h / 4 = \pi D^2 (4) / 4 = \pi D^2 \quad \dots\dots Ec.(7)$$

Y el volumen útil es:

$$V_u = V_l - V_p = V_t(1 - fx) - \pi D^2 \quad \dots\dots Ec.(8)$$

Y como en una lixiviación, normalmente se conocen  $V_c, f, x$

y  $D$ :

$$V_u = V_c \left\{ \frac{1 - fx}{1 - x} \right\} - \pi D^2 \quad \dots\dots Ec.(9)$$

A modo de ejemplo tomamos los siguientes datos:

$$V_c = 300 \text{ Mm}^3$$

$$x = 5\% \text{ (máximo permitido)}$$

$$f = 1,8$$

$$D = 50 \text{ metros}$$

De donde puede calcularse que:

$$Vu = 279500 \text{ m}^3$$

$$Vt = 315800 \text{ m}^3$$

$$\text{Y la relación } Vu/Vt = 88 \%$$

Debe observarse que, independientemente de las malformaciones en la cavidad, la pérdida de volumen por insolubles es una importante razón para no permitir un porcentaje mayor de 5%.

Para lograr el volumen deseado, es común que la cavidad se forme a través de cuatro etapas (13,14,15,19):

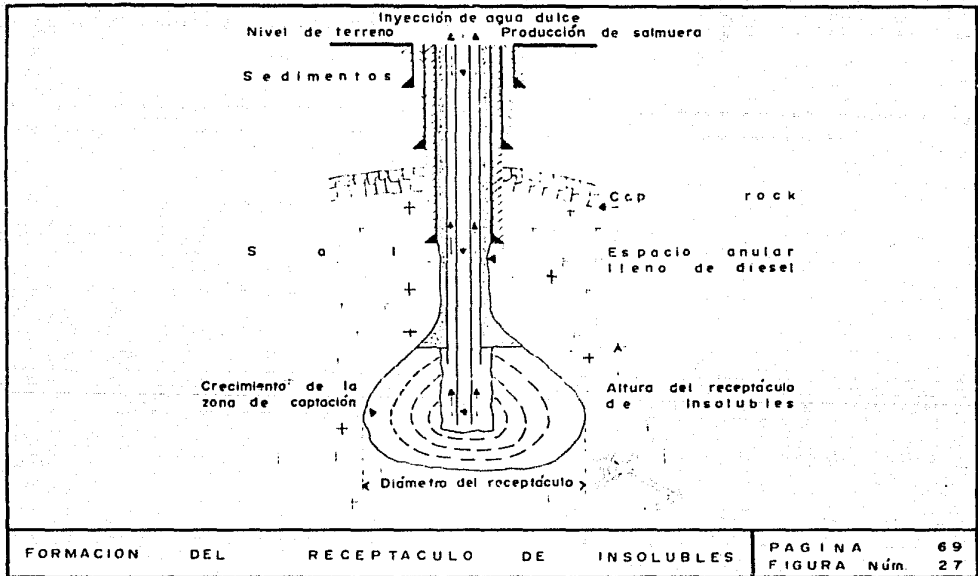
a) Generación del receptáculo de insolubles.

Como su nombre lo indica, en esta etapa se forma un receptáculo en el fondo de la caverna, con el objeto de recibir el material insoluble del estrato y cuyo tamaño depende del porcentaje de aquéllos.

La construcción de este receptáculo puede omitirse en algunos casos, de acuerdo con el porcentaje de material insoluble que tenga la masa salina. Un límite convencional es 3% (14); en caso de tener un porcentaje menor, es posible omitirlo. En caso contrario, se recomienda su desarrollo.

Para formar esta zona de captación, se localiza el extremo inferior de la tubería colgante de menor diámetro hasta el fondo y el extremo inferior de la otra tubería colgante, a una distancia del fondo igual a la altura programada para ese receptáculo, como se muestra en la Figura 27. Es práctica general





utilizar circulación directa durante esta etapa.

b) Formación de la chimenea.

Antes de desarrollar el volumen total de la caverna, el diámetro del agujero es ampliado hasta aproximadamente 1.5 metros (14). El espacio resultante recibe el nombre de chimenea y se desarrolla con objeto de evitar un posible estancamiento de las tuberías. Además, se ha experimentado que se promueve una configuración más uniforme de la caverna.

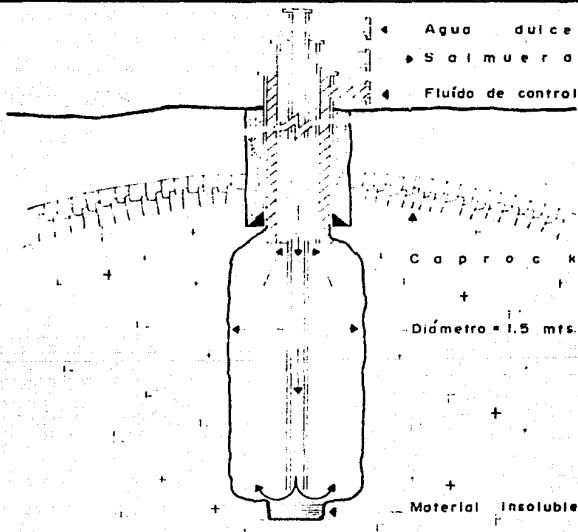
En esta etapa, la tubería colgante interior se coloca hasta el fondo y la exterior cerca del techo de la caverna. En estas condiciones se utiliza normalmente circulación directa para disolver la sal, en la forma que se observa en la Figura 28.

c) Generación de la cavidad principal.

Durante esta etapa, se disuelve la mayor parte del volumen de la caverna, combinando la circulación directa y la inversa. Esto puede lograrse por dos métodos:

Método I.- Terminadas la zona de captación de insolubles y la chimenea, la disolución de la masa salina se lleva a cabo desde la parte inferior hasta la superior del intervalo escogido, colocando las tuberías colgantes a diferentes profundidades. En cada profundidad, se disuelve la sal hasta el diámetro programado, manteniendo todo el tiempo el fluido de control al nivel del extremo inferior de la tubería colgante exterior. Los extremos inferiores de las tuberías se separan una distancia igual a la longitud del intervalo que se pretenda disolver (Figura 29).

Método II.- Es necesario también haber terminado el



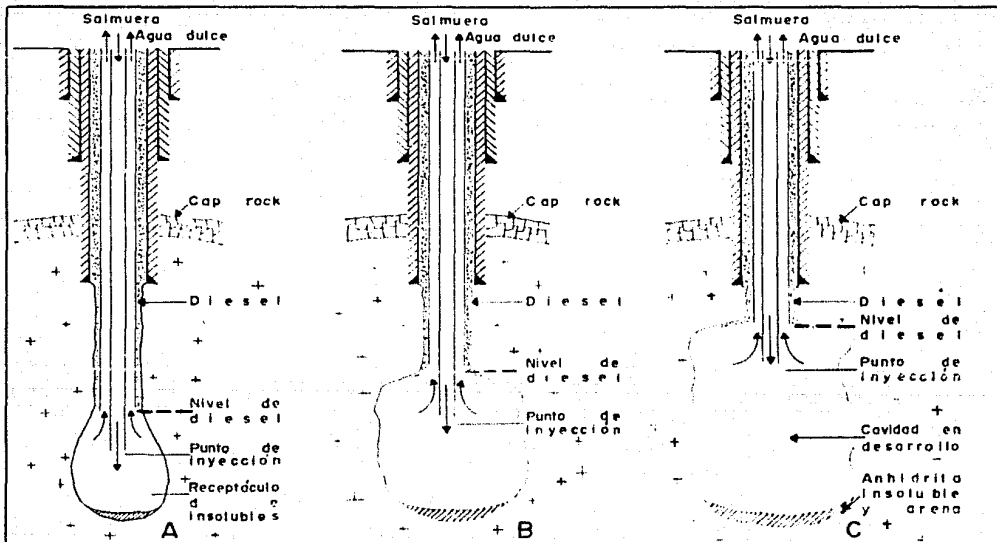
FORMACION

DE

LA

CHIMENEA

PAGINA 71  
 FIGURA Núm. 28



GENERACION DE LA CAVIDAD PRINCIPAL ( METODO I )

receptáculo de insolubles y la chimenea. En este caso, la tubería interior se mantiene fija en el fondo de la caverna, moviéndose hacia arriba únicamente la tubería exterior colgante a diferentes profundidades. El agua dulce se inyecta a través del espacio anular entre las tuberías colgantes.

Además de mover el punto de inyección, se manipula el fluido de sello. En cada profundidad, dicho fluido se extrae para exponer un intervalo de sal, circulando agua dulce hasta alcanzar el diámetro predeterminado (Figura 30).

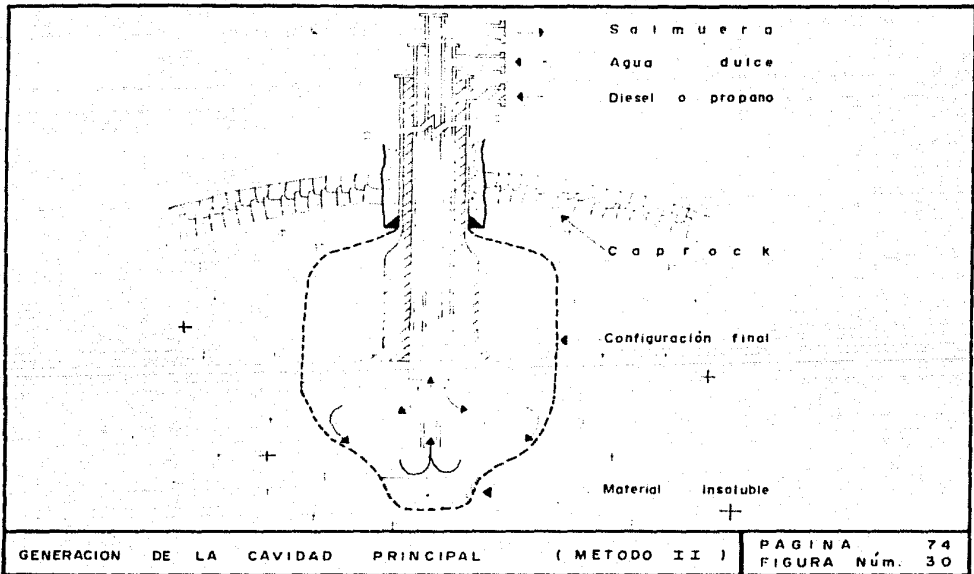
En ambos métodos, la disolución se realiza en diferentes pasos, hasta la profundidad donde se inicia el techo de la cavidad.

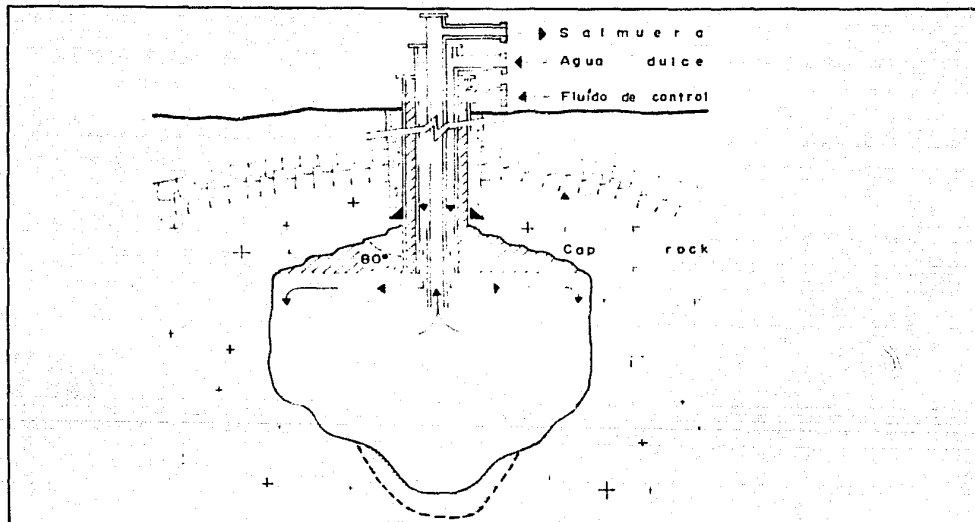
#### d) Desarrollo del techo.

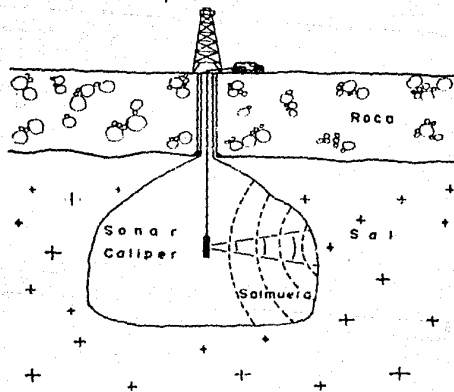
Para una mayor estabilidad del techo de la caverna, es preciso darle una forma cónica con un ángulo de más o menos 80 (Figura 31), respecto al eje del pozo; con tal fin, las dos tuberías colgantes se mueven por pasos a partir de la profundidad de la zapata de la última tubería cementada, con una separación de 3 a 5 metros entre sí (14). La forma es controlada mediante la inyección del fluido inerte e inyectando agua dulce por circulación inversa.

Cada etapa se dará por terminada cuando se haya disuelto el volumen programado, lo cual se comprueba por medio del registro Sonar Caliper (18).

La Figura 32 ilustra el uso de este dispositivo, el cual emite pulsaciones sónicas y recibe el retorno de éstas.







REGISTRO

SONAR

CALIPER

PAGINA 76  
FIGURA Num. 32



La información obtenida puede ser utilizada para :

a) Determinar la estructura del techo. Si el soporte del techo fuese inadecuado, la resistencia de la formación podría excederse y resultar en hundimientos que requerirían costosas operaciones para remediarlo. A veces las tuberías se dañan y es necesario reemplazarlas a un costo muy alto.

- b) Determinar el tamaño de la caverna.
- c) Determinar la forma de la cavidad.
- d) Revisión del programa de lixiviación.
- e) Propósitos exploratorios.
- f) Checar que se toma una acción correctiva adecuada.
- g) Como una guía para la terminación.

El equipo utilizado consiste esencialmente de tres partes: el silbato o bocina, la fuente de poder y el registrador.

El aparato se introduce en el pozo con un solo cable. El silbato produce una pulsación sónica intermitente, la cual es enfocada hacia un lugar en particular. La onda sonora viaja a través del fluido en la cavidad chocando con las paredes y reflejándose hacia el receptor.

B) MODELO MATEMATICO QUE SIMULA LA CONSTRUCCION DE UNA CAVIDAD.

(4.24)

Antes de 1970, se habían hecho intentos para formular relaciones capaces de predecir la forma de la cavidad y la concentración de la salmuera producida por el proceso de lixiviación; sin embargo, debido a la complejidad del problema, no existían métodos analíticos o empíricos que predijeran los parámetros deseados con algún grado de confianza.

En la mayor parte de los estudios realizados por los investigadores para predecir las operaciones necesarias para obtener una forma de cavidad deseada, se habían hecho muchas simplificaciones que ocasionaban grandes discrepancias con la realidad. Entre estos se encontraban:

- a) Remson, Dommers y Kazemi desarrollaron un procedimiento para desarrollar cavernas esféricas, cambiando el nivel de sello.
- b) Sears desarrolló una ecuación y un modelo que predecía las operaciones a realizar para obtener una cavidad esférica (el modelo nunca fue probado).
- c) Jensen utilizó un modelo numérico para simular una lixiviación de 9 días que tuvo muy buena concordancia con la realidad.

En 1974, Ahmad Saberian, de la Universidad de Texas, desarrolló como tesis doctoral un programa al que llamó MIXING3,

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

capaz de simular la formación de cavidades en sal homogénea utilizando lixiviación por caverna aislada con un solo pozo, con circulación directa o inversa, a temperatura constante.

Los derechos sobre este programa de cómputo pertenecen a SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE, por lo que solo será posible incluir aquí, parte del fundamento teórico en que se basa MIXING3.

El método de cálculo desarrollado por Saberian ha sido utilizado en la simulación de cientos de cavidades, concordando satisfactoriamente con los datos obtenidos en campo. La solución del problema requirió del entendimiento de la mecánica de flujo de fluidos y de los fenómenos de transporte de materia en la cavidad.

Si la cavidad es desarrollada con circulación directa, al inicio el flujo puede ser descrito como anular; conforme el diámetro de la cavidad se incrementa, el flujo ya no puede ser descrito como anular porque el fluido exhibe remolinos. Cuando la cavidad ha crecido mucho, sus límites tienen muy poco efecto sobre el ascenso del agua fresca y las fuerzas de flotación controlan al fluido dentro de la cavidad.

Coexisten dos sistemas de transferencia de masa dentro de la cavidad:

- a) La disolución de la sal de las paredes y transferencia convectiva de la misma a la salmuera de la cavidad.
- b) El arrastre de la salmuera de la cavidad por el agua fresca ascendente (penacho).

Si la cavidad es desarrollada con circulación inverta, el flujo de fluidos es:

- Arriba del nivel de inyección, es similar al descrito para circulación directa.

- Abajo del nivel de inyección, puede ser clasificado como flujo piston.

Enseguida se explicarán brevemente los dos sistemas de transferencia de masa mencionados:

a) DISOLUCION DE LA SAL.

La literatura menciona que la turbulencia empieza cuando el producto de los números Grashof y Schmidt excede de  $10^9$ .

$$Gr_x Sc_x = \left\{ \frac{g B C_S x^3}{\nu^2} \right\} (x/D) > 10^9 \quad \dots \text{Ec. (10)}$$

Donde:

$Gr_x$  = Número de Grashof

$Sc_x$  = Número de Schmidt

$g$  = Constante gravitacional,  $L/T^2$

$B$  = Factor que convierte la diferencia de salinidad a diferencia en gravedad específica,  $L^3/M$

$C_S$  = Diferencia de salinidad entre la salmuera saturada de la interfase sólido-fluido y la salmuera en el seno del líquido,  $M/L^3$ .

$x$  = Distancia desde el origen del flujo,  $L$

$\nu$  = Viscosidad cinemática,  $L^2/T$

$D$  = Coeficiente de difusividad,  $L^2/T$

Para soluciones salinas, el número de Schmidt es prácticamente constante e igual a 1000. Esto implica que la turbulencia empieza cuando:

$$Gr_x > 10^6 \quad \dots\dots Ec.(11)$$

Diversos estudios demostraron que para salmueras con más del 90% de saturación, la distancia al origen  $x$ , es menor de 3 cm, por lo que para todos los propósitos prácticos, la disolución en las paredes de la cavidad puede ser descrita como transferencia turbulenta.

La literatura también menciona que la velocidad de disolución de sal  $\dot{m}$ , es igual a:

$$\dot{m} = \left( \frac{dm}{dt} \right)_x = \frac{C_{12} \mu (Bg)^{1/4} C_s^{3/4} D^{3/4}}{x^{1/4} \rho \omega} \quad \text{Para transferencia laminar} \quad \dots\dots Ec.(12)$$

$$\dot{m} = \left( \frac{dm}{dt} \right)_x = \frac{C_{12} \mu (Bg)^{1/2} C_s^{1/2} D^{1/2}}{x^{1/2} \rho \omega} \quad \text{Para transferencia turbulenta} \quad \dots\dots Ec.(13)$$

La nomenclatura es similar a la ecuación (10) y :

$$m = \left( \frac{dm}{dt} \right) = \text{Velocidad de disolución de la sal, } M/L^2 \cdot T$$

La ecuación (13) muestra que la velocidad local de transferencia de materia para el caso donde existe un régimen turbulento es independiente de la posición  $x$ .

En 1962, Durie aplicó la teoría de transferencia de materia en la capa laminar a la disolución de superficies de sal suaves y verticales y después introdujo un factor de corrección para superficies rugosas.

Con la colaboración de Zubi, introdujo modificaciones para obtener la velocidad de transferencia de materia con flujo turbulento, en superficies verticales de sal.

La ecuación que obtuvieron fue:

$$\dot{R}_0 = C_1/\rho + C_2 + C_3\rho + C_4\rho^2 + C_5\rho^3 + C_6\rho^4 = 1/\rho_{\text{sal}}(dm/dt) \dots \text{Ec}(14)$$

En donde:

$\dot{R}_0$  = Velocidad de disolución para superficie de sal vertical,  $L^3/L^2 T$

$\rho$  = Densidad local de la salmuera de la cavidad,  $M/L^3$

$\rho_{\text{sal}}$  = Densidad de la sal,  $M/L^3$

Las constantes de esta ecuación polinomial también fueron evaluadas:

$$C_1 = 0.76092$$

$$C_2 = -3.87155$$

$$C_3 = 7.82541$$

$$C_4 = -7.48396$$

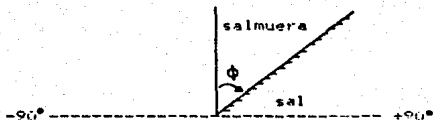
$$C_5 = 3.87895$$

$$C_6 = 0.75338$$

Durie continuó sus investigaciones y en 1963, evaluó el efecto de la inclinación de la sal para dos casos, a los que llamó condición estable e inestable.

CONDICION ESTABLE:

$$\dot{R}_\phi = \dot{R}_0 (\cos \phi)^{1/2} \dots \text{Ec.}(15)$$

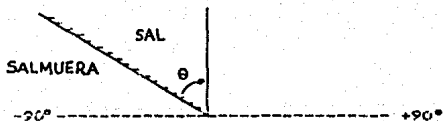


Segun la ecuación ( 15). para  $\phi = 90^\circ$ , la velocidad de disolución es cero: solamente existe disolución por difusión y debido a que su magnitud es despreciable comparada con aquella debida a la convección, para todos los propósitos prácticos se justifica que

$$\dot{R}_{\phi=90^\circ} = \text{CERO}$$

CONDICION INESTABLE:

$$\dot{R}_\theta = \dot{R}_0 \left\{ 1 + 0.22 \left[ 1 - \sqrt{\frac{\theta}{45} + 45} \right] \right\} \quad \dots\dots \text{Ec. (16)}$$



Para  $\theta = -90^\circ$ , la salmuera cercana a la sal gana en densidad y desciende. A este fenómeno se le llama flujo celular y es en el cual se forman pequeños cráteres en la superficie de la

sal. Para este tipo de conveccion natural, la velocidad de disolucion es independiente de la posicion.

Las relaciones desarrolladas por Durie y Zubi resultaron excelentes para la evaluacion de la disolucion de paredes salinas homogeneas.

#### b) FLUJO CON FORMACION DE PENACHO.

Después de algdn tiempo de transcurrido el proceso de lixiviación, cuando el radio de la cavidad es lo suficientemente grande como para permitir el libre ascenso del fluido menos denso, tenemos la existencia del flujo con formación del "penacho".

El flujo convectivo en un medio, causado por las fuerzas de flotación, es comúnmente conocido como penacho simple; tiene como característica principal, que su velocidad vertical en el origen del flujo es igual a cero. Como ejemplos de este fenómeno convectivo tenemos: la elevación de un fluido por encima de una fuente caliente, el humo generado por un incendio forestal, etc.

Quando existe un flujo cuya velocidad vertical en el origen es diferente de cero, nos estamos refiriendo a un fenómeno de convección forzado, por lo que el penacho de este tipo se lo denomina penacho forzado. Ejemplos de este son: el humo saliendo de la chimenea de una caldera a cierta velocidad y la salida térmica de una planta de fuerza nuclear, en donde el agua caliente es bombeada al océano.

En estos ejemplos el ascenso se debe a un efecto combinado de momentum inicial y fuerzas de flotación.



Cuando el ascenso del penacho se restringe por una barrera de diferente densidad o por una superficie solida, el movimiento vertical es convertido a lateral y se dice que el penacho es confinado verticalmente.

Saberian realizó experimentos utilizando técnicas (como fotografías de la sombra proyectada por el penacho) y dedujo que para penachos forzados confinados verticalmente existen cuatro zonas, como puede apreciarse en la Figura 33.

1) Zona laminar.- Como su nombre lo indica, se tiene un regimen de flujo laminar y hay una pequeña o nula mezcla a lo largo de ella.

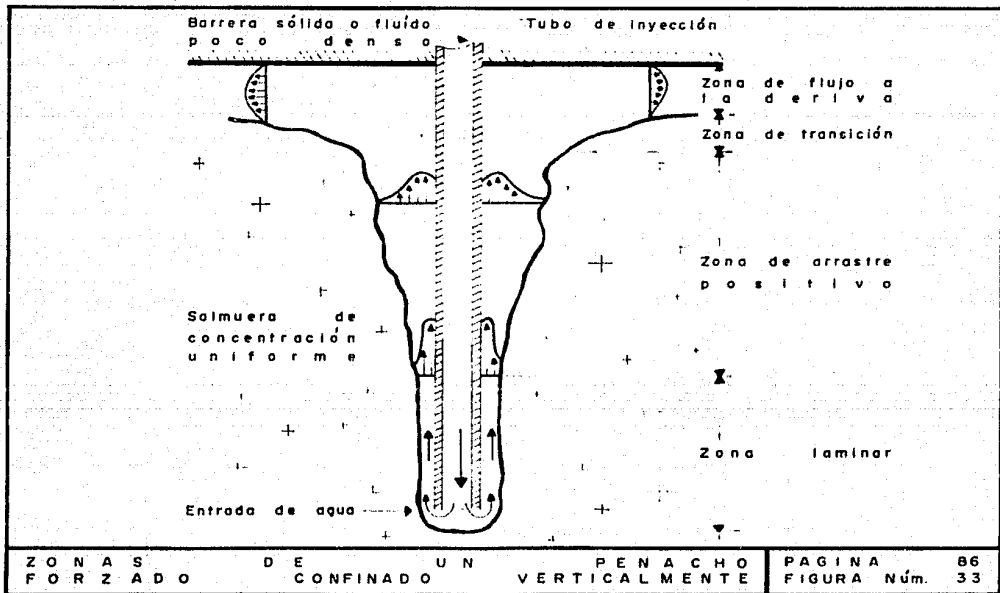
2) Zona de arrastre positivo.- Se presenta un mezclado con regimen turbulento.

3) Zona de transición o de arrastre negativo.- En esta zona, el movimiento del fluido cambia de vertical a horizontal. Su extensión es muy limitada si la salmuera es uniforme, pero en salmueras estratificadas uniformemente puede ser muy extensa.

4) Zona de flujo a la deriva.- El movimiento es completamente horizontal.

Se demostró que la densidad del penacho aumenta a lo largo del ascenso, por lo que su velocidad disminuye cuando el fluido sube, alejándose del punto de inyección.

En la zona de arrastre negativo existe un momento en que la transferencia de materia es del penacho a la salmuera de la cavidad, debido a que la densidad de aquél es mayor que la de ésta última. Este fenómeno se denomina inversión de la gravedad.



ZONAS DE UN PENACHO FORZADO DE CONFINADO VERTICALMENTE

PAGINA 86 FIGURA Núm. 33

Se considera que el valor de la relación  $L_p/D_e$  controla la presencia o ausencia de inversión de la gravedad ( a mayor  $L_p/D_e$ . mayor inversión). en donde:

$L_p$  = Distancia vertical del punto de inyección al techo de la cavidad.

$D_e$  = Diametro promedio a lo largo de la distancia  $L_p$ .

Saberian preparo un modelo experimental al que llamo "modelo cilindrico" y una serie de experimentos que no serán detallados aqui; sin embargo, se enunciarán algunas de las conclusiones mas importantes:

- El numero de Froude densimétrico,  $F_d$ , resultó ser el mejor parámetro para describir el comportamiento del penacho:

$$F_d = \frac{\text{Numero de Froude}}{\text{Diferencia de densidades adimensional}} = \frac{v \sqrt{gD}}{\left\{ \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1} \right\}} \quad \dots \text{Ec. (17)}$$

En donde:

$v$  = Velocidad, L/T

$g$  = Constante gravitacional, L/T<sup>2</sup>

$D$  = Diámetro equivalente del ánulo, L

$\rho_1$  = Densidad de la salmuera en el punto 1, M/L<sup>3</sup>

$\rho$  = Densidad de la salmuera en el punto 2, M/L<sup>3</sup>

- Para  $F_d < 1$ :

- La flotación es el fenomeno que domina, sin que el momentum del fluido en la entrada tenga gran

efecto en la velocidad de ascenso.

- El penacho se acelera en la región laminar y se desacelera en la región turbulenta.
  - La velocidad del penacho cambia constantemente durante el curso del ascenso (no hay un perfil de velocidades que pueda ser asignado).
  - En la zona laminar, la velocidad aumenta durante el ascenso, lo que es característico de un penacho simple.
- Para  $F_d \geq 1$ :
- La región laminar del penacho desaparece.
  - Hay un descenso gradual en la velocidad promedio del penacho durante el ascenso.
  - Ya que el fluido se desacelera, la máxima velocidad existe en la entrada, en donde también empieza la turbulencia.
  - El penacho tiene todas las características de un penacho "a chorro", en el cual el momentum inicial domina el ascenso.

Hasta este momento se han descrito los dos sistemas de transferencia de materia dentro de la cavidad: disolución de sal (y transferencia convectiva a la salmuera) y el arrastre de la salmuera de la cavidad por el agua fresca ascendente (penacho).

Saberian consideró que:

- La variación vertical en la concentración de la

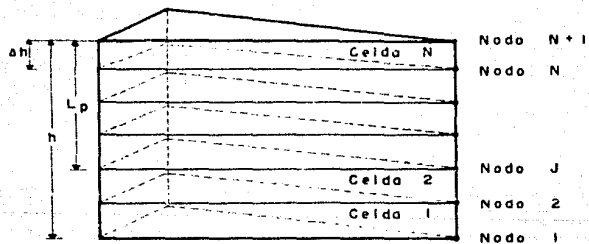
salmuera es el resultado de la segregación de la gravedad.

- La concentración de la salmuera es constante a lo largo de cualquier plano horizontal.

Y dividió la altura total del modelo en  $N$  segmentos iguales, con altura  $\Delta h$  y volumen  $V_i$ , como se muestra en la Figura 34. Consideró que dentro de cada uno de ellos, las propiedades del fluido eran uniformes. Los nodos entre segmentos (o celdas) fueron también numerados desde 1 hasta  $N + 1$ .

Para lixiviación inversa, la entrada se fijó en el nodo  $J$  y la salida en el nodo 1.

Enseguida se incluirán los balances de materia, dividiendo la cavidad en distintas regiones.



### LISTA DE VARIABLES

Mc	Relacion de mezclado critica
q	Flujo de produccion de salmuera, L <sup>3</sup> /T
Q	Flujo ascendente que entra a la celda, L <sup>3</sup> /T
Q(U)	Flujo inyectado a la cavidad, L <sup>3</sup> /T
R	Radio de la celda, L
$\dot{R}_s$	Velocidad de disolucion, L <sup>3</sup> /L <sup>2</sup> T
v	Velocidad, L/T
V	Volumen de la celda, L <sup>3</sup>
Vb	Volumen de salmuera transferido al segmento, L <sup>3</sup>
Vm	Volumen de mezcla, L <sup>3</sup>
Vp	Volumen de salmuera arrastrada por el penacho, L <sup>3</sup>
Vr	Volumen de sal retenido por el segmento, L <sup>3</sup>
Vs	Volumen de sal disuelto en la celda, L <sup>3</sup>
Vt	Volumen de fluido transferido fuera de la celda, L <sup>3</sup>
W	Fracción sal en la celda
Wa	Fracción de sal que entra a la celda
Wm	Fracción de sal en la mezcla
Ws	Peso de sal transferido por disolucion a la celda, M
W <sub>out</sub>	Fracción de sal en la salmuera de salida
Yt	Distancia vertical de la entrada de la pluma, L
$\Delta h$	Altura de la celda, L
$\Delta t$	Incremento de tiempo, T
$\rho$	Densidad del fluido dentro de la celda, M/L <sup>3</sup>
$\rho_a$	Densidad promedio del penscho que entra a la celda, M/L <sup>3</sup>
$\rho_m$	Densidad de mezcla, M/L <sup>3</sup>

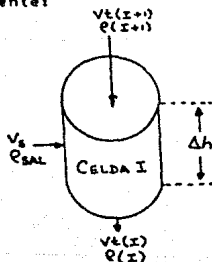
$\rho_{sal}$  Densidad de la roca salina, M/L<sup>3</sup>

Las expresiones entre paréntesis se referirán al número de la celda y se usaran apóstrofes (') para distinguir las condiciones del segmento o celda después del incremento de tiempo  $\Delta T$ .

a) CELDAS ABAJO DEL NIVEL DE INYECCION Y ARRIBA DEL PUNTO DE PRODUCCION DE SALMUERA.

En esta región, el balance de materia para la celda es calculado por medio de dos balances de materia (para salmuera y para sal en salmuera), ya que no hay presencia del penacho.

Se presenta un régimen de flujo tipo pistón, inducido solamente por la salida de salmuera por la celda del fondo. El esquema es el siguiente:



Utilizando la nomenclatura dada anteriormente:

$$V = A \Delta h \quad \dots\dots Ec. (18)$$

$$V_t = A v \Delta T \quad \dots\dots Ec. (19)$$

El balance de materia para salmuera puede escribirse



como:

$$Q(I) V(I) = Q(I) V(I) + Q(I+1) V(I+1) - Q(I) \rho \Delta T + W_s \quad \dots \text{Ec. (20)}$$

Ya que no hay presencia de penacho, el único fenómeno de transferencia de materia, es el que se presenta por disolución de sal y:

$$R'(I) = R(I) + \dot{R}_0 \Delta T \quad \dots \text{Ec. (21)}$$

En donde  $\dot{R}_0$  es la velocidad de disolución, en función de la densidad de la salmuera dentro del segmento, desarrollada por Durie y Zubi (Ecuación 14).

Y como el segmento es un cilindro:

$$V(I) = \pi \Delta h [R'(I)]^2 \quad \dots \text{Ec. (22)}$$

Siendo  $W_s$  el peso de sal transferido por disolución a la celda:

$$W_s = V_s \rho_{sal} \quad \dots \text{Ec. (23)}$$

En donde:

$$V_s = \pi \Delta h \left\{ [R'(I)]^2 - [R(I)]^2 \right\} \quad \dots \text{Ec. (24)}$$

El volumen de salmuera transferido por el segmento superior  $V(I+1)$ , debe ser de tal magnitud que pueda compensar la salmuera transferida por el segmento,  $V(I)$ , así como el incremento de volumen debido a la disolución de la roca salina:

$$V(I+1) = V(I) + [V'(I) - V_m(I)] \quad \dots \text{Ec. (25)}$$

El tercer término de la Ecuación 25 considera que cuando la sal se disuelve y se mezcla con la salmuera de la cavidad, se crea un nuevo volumen, llamado volumen de mezcla,  $V_m$ , de densidad  $\rho_m$ :

$$V_m(I) = \frac{(V_s \rho_{sal}) + [V(I) \rho(I)]}{\rho_m(I)} \quad \dots\dots Ec.(26)$$

La densidad de mezcla es función de la fracción de sal resultante al mezclarse la sal y la salmuera,  $W_m(I)$ :

$$\rho_m(I) = f(W_m(I)) \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = 1.0 + 0.726W \\ \text{Para } 0 \leq W \leq 0.1 \end{array} \right. \quad \dots\dots Ec.(27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = B_1 + B_2W + B_3W^2 \\ \text{Para } 0.1 < W \leq 0.2614 \end{array} \right. \quad \dots\dots Ec.(28)$$

En donde:

$$B_1 = 1.00198$$

$$B_2 = 0.674599$$

$$B_3 = 0.323505$$

Un balance de sal permitirá obtener  $W_m(I)$ :

$$W_m(I) = \frac{W_s + V(I) \rho(I) W(I)}{W_s + V(I) \rho(I)} \quad \dots\dots Ec.(29)$$

La fracción de sal en salmuera del segmento después del incremento de tiempo  $\Delta T$  está dada por la siguiente ecuación, que también corresponde a un balance de materias:

$$W'(I) = \frac{[\rho(I) W(I) V_r(I)] + [V_t(I+1) \rho(I+1) W(I+1)] + W_s}{[\rho(I) V_r(I)] + [V_t(I+1) \rho(I+1)] + W_s} \quad \dots\dots Ec.(30)$$

Todas las variables fueron definidas antes, excepto  $V_r(I)$ , que es el volumen de salmuera retenido por el segmento:

$$V_r(I) = V(I) - V_t(I) \quad \dots\dots Ec.(31)$$

La densidad del segmento al final del tiempo  $\Delta T$ ,  $\rho'(I)$ , es calculada reemplazando el valor de  $W'(I)$  en cualquiera de las Ecuaciones 27 o 28.

#### B) CELDAS ARRIBA DE LA ALIMENTACION DE AGUA FRESCA.

Las celdas arriba de la alimentación se dividen en

cuatro tipos, en relación a las diferentes regiones del penacho:

B.1) Celdas donde el ascenso del penacho se efectúa con flujo laminar.

B.2) Celdas con arrastre positivo del penacho.

B.3) Celdas con arrastre negativo ( en caso de salmuera estratificada uniformemente).

B.4) Celda superior.

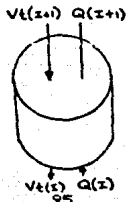
B.1) ZONA CON FLUJO LAMINAR DEL PENACHO.

Puesto que el mezclado a lo largo de esta zona es demasiado pequeño, para fines prácticos se considera despreciable y la velocidad de flujo volumétrico y la densidad promedio permanecen sin cambio.

B.2) ZONA CON ARRASTRE POSITIVO.

Debe ser considerado el comportamiento del penacho para resolver el balance de materia de la celda.

Como se mencionó anteriormente, en esta región existe un flujo turbulento, que ocasiona un fuerte mezclado. El siguiente esquema representa las diferentes corrientes, que al mezclarse entre sí, durante un incremento de tiempo  $\Delta T$ , proporcionan nuevas características al segmento I:



El flujo ascendente a la salida del segmento I es:

$$Q(I+1) = Q(I) [1 + M(I)] \quad \dots\dots\text{Ec. (32)}$$

En esta ecuación, M(I) corresponde a la relación de mezclado local, cuyo desarrollo matemático fue el fruto de muchos estudios experimentales, llevados a cabo por Ahmad Saberiani:

$$M(I) = \frac{4.1 \left[ \frac{Q(J) - Q_a(J)}{Q_s(J)^{0.65}} \right] + \left[ \frac{Q(I) - Q_a(I)}{Q_s(J)^{0.27}} \right] (\Delta h)}{Q_s(J)^{0.65}} \quad \dots\dots\text{Ec. (33)}$$

En donde J corresponde al segmento donde se localiza el punto de inyección y:

$$Q_s(J) = \frac{4.0 Q(I)}{R(60)(5Dg)^{0.5}} \quad \dots\dots\text{Ec. (34)}$$

Con Q(J) siendo igual al flujo de agua inyectado a la cavidad. L3/T.

Un balance de materia alrededor del penacho es:

$$W_a(I+1) = \frac{M(I) Q(I) W(I) + W_a(I) Q_a(I) Q(I)}{M(I) Q(I) + Q_a(I) Q(I)} \quad \dots\dots\text{Ec. (35)}$$

Se obtiene  $Q_a(I+1)$  con ayuda de las Ecuaciones 27 o 28.

El mismo procedimiento se usa para evaluar el flujo volumétrico del penacho, densidad promedio y fracción en masa en los otros nodos de la región de arrastre positivo.

El balance de salmuera para la celda es:

$$V(I) \rho(I) = \{ Q(I) V(I) \} + \Delta T \{ [Q(I+1) \rho_a(I+1)] - [Q(I) \rho_a(I)] \} - \{ [V(I+1) \rho(I+1)] - [V(I) \rho(I)] \} \quad \dots\dots\text{Ec. (36)}$$

Y el balance de sal:

$$V(I) \rho(I) W(I) = \{ Q(I) V(I) W(I) \} + \Delta T \{ [Q(I+1) \rho_a(I+1) W(I+1)] - [Q(I) \rho_a(I) W(I)] \} - \{ [V(I+1) \rho(I+1) W(I+1)] - [V(I) \rho(I) W(I)] \} \quad \dots\dots\text{Ec. (37)}$$

Las Ecuaciones 36 y 37, en conjunto con la ecuación que describe el comportamiento del penacho, se resuelven para obtener las propiedades del fluido en la celda I después del incremento de tiempo  $\Delta T$ :

$$W'(I) = \frac{V_r(I) \rho(I) W(I) + V_t(I+1) \rho(I+1) W(I+1) + W_s}{V_r(I) \rho(I) + V_t(I+1) \rho(I+1) + W_s} \dots\dots Ec.(38)$$

Todas las variables aquí presentadas fueron ya definidas, excepto el volumen retenido por el segmento,  $V_r(I)$  y el volumen de salmuera transferido por el segmento superior,  $V_t(I+1)$ .

$$V_r(I) = V(I) - [V_t(I) + V_p(I)] \dots\dots Ec.(39)$$

Siendo  $V_p(I)$  el volumen de salmuera arrastrado por el penacho:

$$V_p(I) = M(I) Q(I) \Delta T \dots\dots Ec.(40)$$

El volumen transferido por el segmento superior es definido por la siguiente ecuación:

$$V_t(I+1) = V_t(I) + V_p(I) + [V'(I) - V_m(I)] \dots\dots Ec.(41)$$

El volumen transferido por el segmento superior deberá compensar la pérdida de volumen  $V_t(I)$ , el volumen arrastrado  $V_p(I)$ , así como el incremento de volumen por disolución  $[V'(I) - V_m(I)]$ , analizado cuando se habló de flujo piston.

La densidad de la salmuera en el segmento, después del incremento de tiempo  $\Delta T$  es definida utilizando el valor de  $W'(I)$  en cualquiera de las Ecuaciones 27 o 28.

### B.3) ZONA DE TRANSICION O ARRASTRE NEGATIVO.

Quando un penacho asciende a través de salmuera

estratificada estable, gana materia e incrementa su concentración, hasta que llega a una altura a la cual, porciones de fluido del penacho empiezan a descender para alcanzar niveles de igual densidad. En esa región, la transferencia de materia es del penacho a la salmuera.

El problema de evaluar el perfil horizontal de densidades en un penacho y su variación con el tiempo, es complicado.

Usualmente, como simplificación, se supone un perfil de densidades y se asume que no varía durante el curso del ascenso.

Saberian presenta en su modelo matemático, ecuaciones que permiten evaluar el momento al cual desaparece el arrastre positivo y empieza la zona de transición.

Se hace uso de la siguiente ecuación empírica:

$$M_c(I) = 40 M(J) \left\{ \frac{\rho(I) - \rho(I+1)}{\rho_a(I)} \right\} \left\{ 1 - \rho \left[ \frac{\rho(I) - \rho(N)}{\rho_a(J)} \right] \right\} \dots \text{Ec. (42)}$$

En donde N representa la celda superior y:

$M_c(I)$  = Relación de mezclado crítica para la celda i.

$M(J)$  = Arrastre para la celda de alimentación.

Debe notarse que, según la Ecuación 42, mientras mayor sea el valor de  $M(J)$ , mayor será la probabilidad de que se presente arrastre negativo.

Por otro lado, la dependencia de  $M_c(I)$  con la diferencia de densidades entre dos celdas adyacentes indica que a mayor diferencia, mayor arrastre negativo. Si las densidades entre dos celdas son iguales, no ocurre arrastre negativo en la celda i. El

arrastre es siempre positivo en salmuera uniforme.

El resultado de la Ecuación 42 es comparado con la relación de mezclado local,  $M(I)$  y si

$$M(I) - M(I) \geq 0 \quad \dots \text{Ec. (43)}$$

puede decirse que estamos en la zona de transición del penacho.

La densidad del penacho que deja la celda  $I$  se determina por medio de la siguiente ecuación empírica:

$$\rho_{a(I+1)} = \rho_{a(I)} - \frac{S [\rho(I) - \rho(I+1)] \rho_{a(I)}}{\rho(I)} \quad \dots \text{Ec. (44)}$$

En donde:

$$S = 1.05 [(Yt/Lp) + 0.1] \quad \dots \text{Ec. (45)}$$

Y la fracción sal del fluido que entra al segmento  $I+1$ :

$$W_{a(I+1)} = f [\rho_{a(I+1)}] \quad \dots \text{Ec. (46)}$$

En donde:

$$W = \frac{\rho - 1.0}{0.726} \quad \dots \text{Ec. (47)}$$

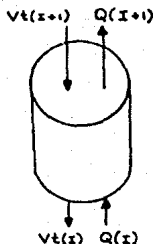
Para  $1 \leq \rho \leq 1.0726$  y:

$$W = \frac{-B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4(B_3)(\rho - B_1)}}{2(B_3)} \quad \dots \text{Ec. (48)}$$

Para  $1.0726 < \rho \leq 1.02019$

Las constantes  $B_1, B_2$  y  $B_3$  son las mismas que las de la Ecuación 28.

Considerando el siguiente esquema:



Y el flujo del penacho:

$$Q(I+1) = Q(I) - Vb(I) \quad \dots\dots Ec.(49)$$

$$Vb(I) = \frac{Q(I) [\rho_a(I) - \rho_a(I+1)]}{\rho(I) - \rho_a(I+1)} \quad \dots\dots Ec.(50)$$

El volumen transferido por el segmento superior,  $Vt(I+1)$  requiere de un análisis diferente al de la zona de arrastre positivo. Aquí  $Vr(I)$  y  $Vt(I+1)$  tienen las siguientes expresiones matemáticas:

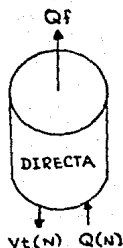
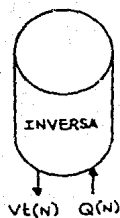
$$Vr(I) = V(I) + Vb(I) \Delta T - Vt(I) \quad \dots\dots Ec.(51)$$

$$Vt(I+1) = Vt(I) + [Vr(I) - Vm(I)] - Vb(I) \quad \dots\dots Ec.(52)$$

#### B.4) ZONA DE FLUJO A LA DERIVA ( O SEGMENTO N )

En esta zona, la acción que ejerce la fuerza de flotación sobre el penacho tiende a desaparecer. La elevación del penacho es frenada por la barrera rígida, transformando su movimiento ascendente vertical, en lateral. Se tiene el siguiente esquema de flujo:





La fracción sal final del segmento es:

$$W'(N) = \frac{P_1(N) W_1(N) V_r(N) + P_2(N) W_2(N) Q_1(N) \Delta T + W_s - F_s}{P_1(N) V_r(N) + P_2(N) Q_1(N) \Delta T + W_s - F_s} \dots \text{Ec. (53)}$$

Con:

$$V_r(N) = V_1(N) - V_t(N) \dots \text{Ec. (54)}$$

Siendo  $F_s$  la cantidad de sal a la salida.

$$F_s = 0, \text{ para circulación inversa.} \dots \text{Ec. (55)}$$

$$F_s = Q_f (\Delta T) W_{out}, \text{ para circulación directa} \dots \text{Ec. (56)}$$

$W_{out}$  =  $f(P_{out})$  y es calculada por medio de las ecuaciones 27 o 28.

Como fue mencionado con anterioridad, los derechos sobre el programa MIXING3 impiden incluirlo dentro de este trabajo de tesis; sin embargo, se anexarán algunas graficas generadas con este programa, enumerando algunas de las observaciones más importantes:

Las figuras 35 y 36 presentan la forma de una cavidad obtenida por lixiviación inversa y directa, respectivamente; en las dos se incluye las formas obtenidas en tres instantes diferentes:  $t=0$ ,  $t=196$  días y  $t=390$  días de lixiviación.

Debe recordarse que utilizando lixiviación inversa, el agua fresca penetra por el anular situado en la parte superior de la cavidad y que es en esta zona donde existe mayor diferencia de concentraciones y, por lo tanto, mayor disolución de sal, como puede apreciarse en la figura 35. Este tipo de lixiviación puede dar lugar a techos inestables y mal soportados, que pueden incluso ocasionar derrumbes de terreno.

La figura 36 muestra la forma obtenida si la cavidad se forma por lixiviación directa. En este caso, la inyección de agua se realiza por el tubo central del aparejo de tuberías (en la parte inferior de la cavidad) y, por lo tanto, se obtiene una cavidad con la parte más ancha en la zona más profunda, similar a una gota.

En la figura 37 se muestran las formas obtenidas en 390 días de lixiviación por disolución directa e inversa. Debe observarse la simetría que existe entre las formas obtenidas.

Durante la formación real puede variarse el método d)

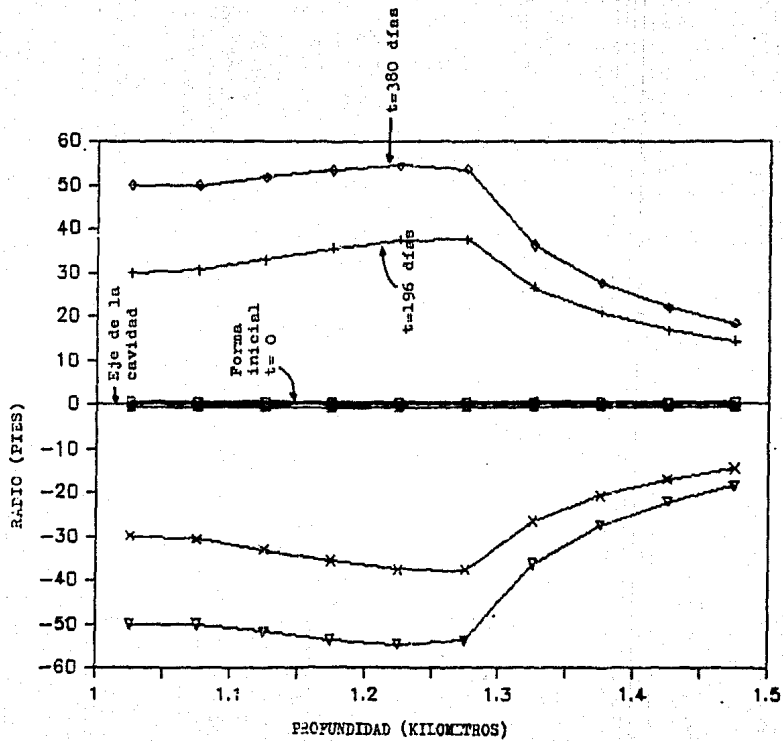


FIGURA 35: RADIO DE LA CAVIDAD VS PROFUNDIDAD (LIEUVIACION INVERSA)

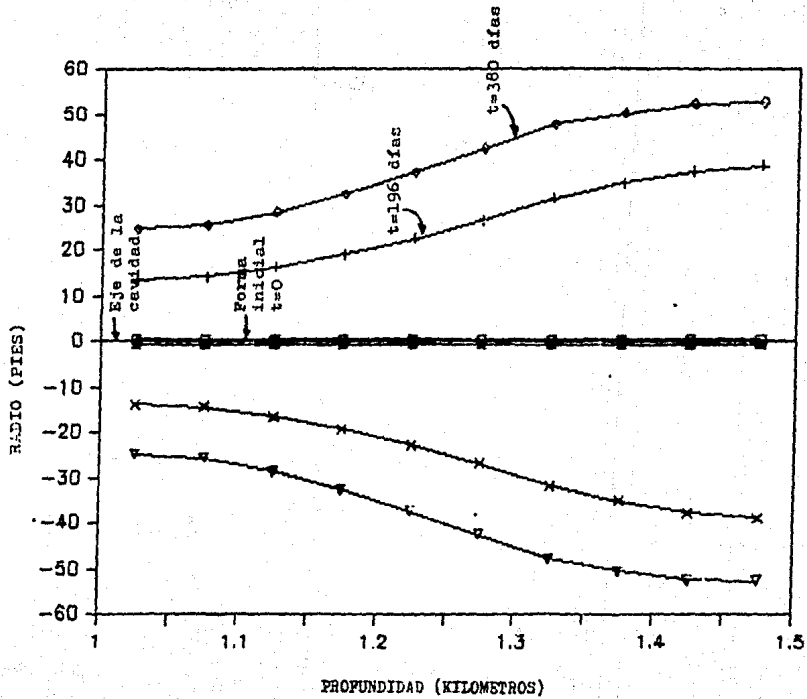


FIGURA 36: RADIO DE LA CAVIDAD VS PROFUNDIDAD (LIXIVIACION DIRECTA)

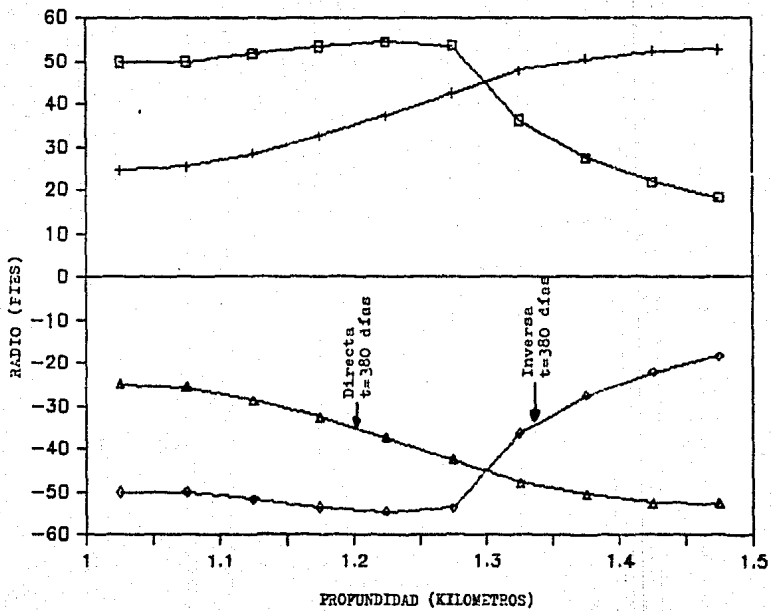


FIGURA 37: RADIO DE LA CAVIDAD VS PROFUNDIDAD (L.R. DIRECTA E INVERSA)

lixiviación y así obtener una cavidad con la forma deseada.

La figura 38 muestra la forma de dos cavidades creadas por lixiviación inversa y 360 días de lixiviación. Se utiliza diferente flujo de agua de inyección; puede notarse que una cavidad de tamaño definido puede formarse:

a) Proporcionando mayor tiempo de lixiviación, lo que implicaría mayor duración del proyecto.

b) Manejando mayor flujo de agua, lo que implicaría la utilización de equipos más grandes.

En una operación real, debe lograrse una optimización entre tiempo de lixiviación y flujo de agua de inyección a fin de obtener el menor costo para el proyecto.

Debido a que una cavidad conserva la misma forma general cuando el flujo varía, no se incluyó la gráfica correspondiente a la lixiviación directa.

Para lograr cavidades con la forma deseada, puede variarse también la posición de las tuberías. La figura 39 muestra el efecto que tiene el cambio del nodo de producción de salmuera; a modo de ejemplo, se usó lixiviación directa.

Puede observarse en la figura, que la parte inferior de la cavidad no sufrió cambio alguno debido a que en los dos casos, se colocó la inyección de agua fresca a la misma profundidad.

Cuando el nodo de producción sube, manteniendo el nodo de inyección a la misma profundidad, el efecto neto es exponer una capa más grande de sal a la disolución, por lo que se obtendrá una cavidad más grande. Puede notarse también el mayor

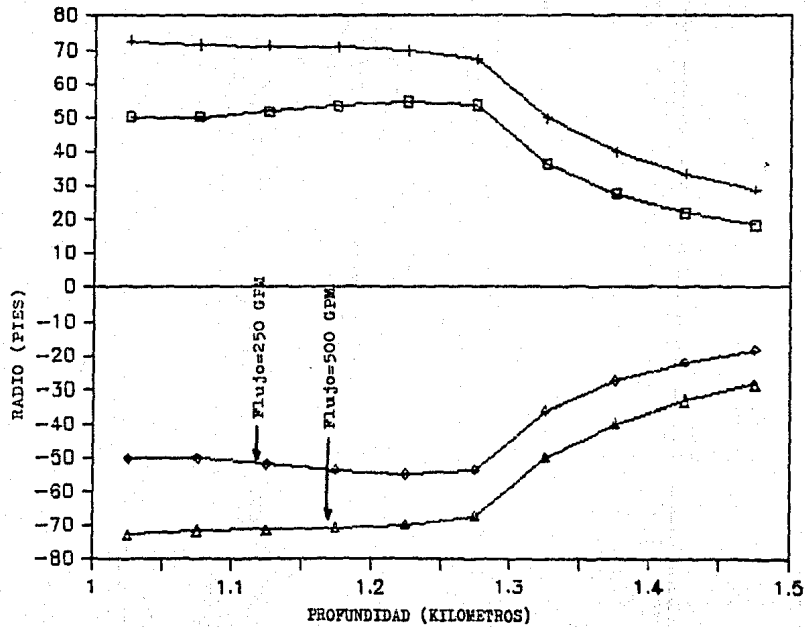


FIGURA 38: RADIO DE LA CAVIDAD VS PROFUNDIDAD (INYECCION INVERSA, VARIANDO EL FLUJO DE INYECCION 107)

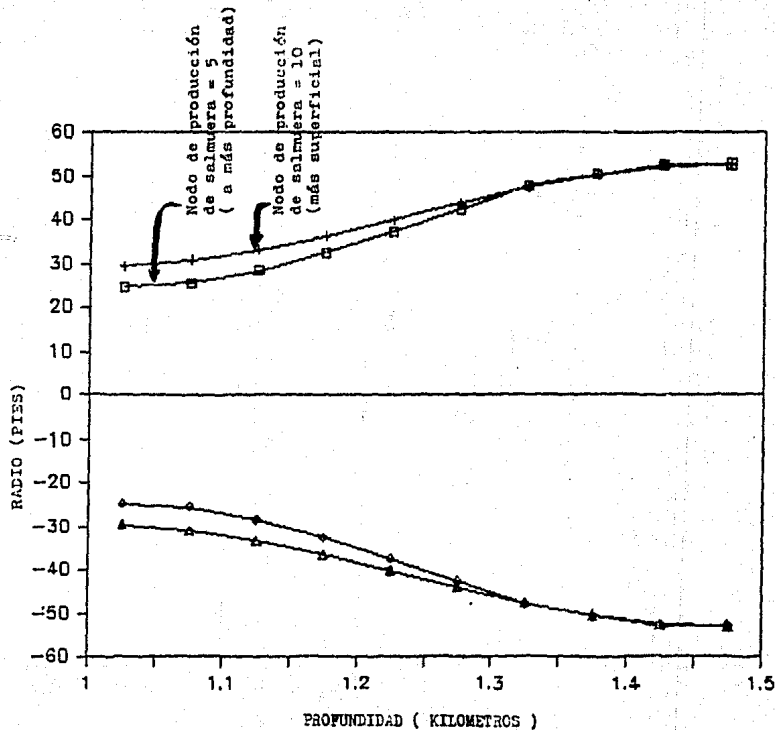


FIGURA 39: RADIO DE LA CAVIDAD VS PROFUNDIDAD (LIXIVIACION DIRECTA VARIANDO LA POSICION DEL NODO DE PRODUCCION)



desarrollo del cuello de la cavidad.

La figura 40 muestra la variación del porcentaje de saturación (que expresa el contenido de sal en la salmuera producida) con el tiempo de lixiviación. Puede observarse que al inicio de la operación de lixiviación, el porcentaje de saturación aumenta muy rápidamente, hecho que se debe a que durante este período crece de la misma forma el área de contacto sal-salmuera.

Se explicó en un punto anterior que existe un momento en que la disolución de las paredes de sal no es tan importante y por eso, las curvas de la figura 40 tienden a ser una constante; en ese momento, la mezcla convectiva del penacho es el factor dominante.

Esta figura muestra también que para el mismo tiempo de lixiviación y arreglo del aparejo de tuberías se logra mayor concentración en la salmuera producida, si se utiliza el método de circulación inversa. Por este motivo es el método preferido de los fabricantes de sal.

La figura 41 muestra el volumen de la cavidad en función del tiempo de lixiviación para flujo constante de agua de inyección. Como podía esperarse a partir de lo mostrado en la figura 40, se obtienen cavidades más grandes con circulación inversa, para el mismo tiempo de lixiviación.

La figura 42 muestra el porcentaje de saturación de la salmuera obtenida, en función del tiempo de lixiviación, para la misma posición del tubo de inyección de agua fresca en

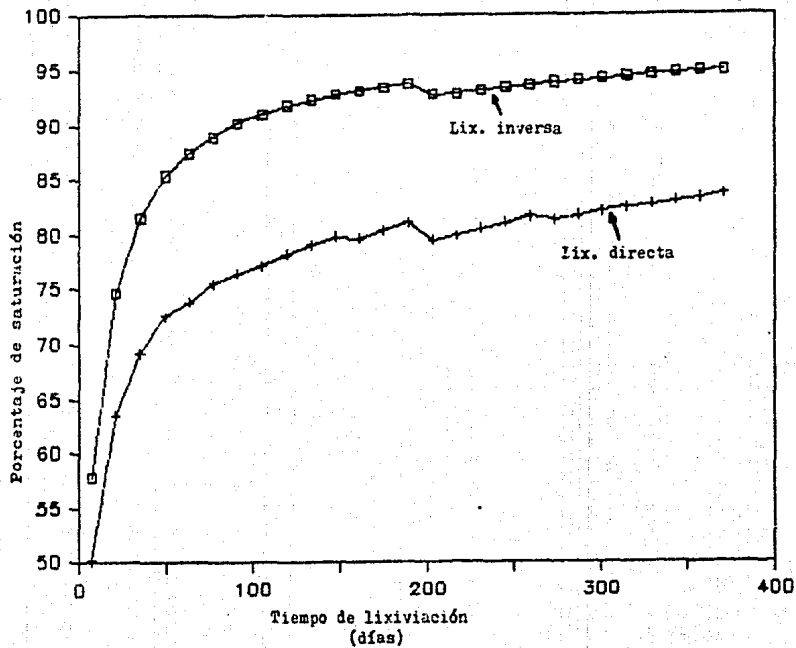


FIGURA 40: PORCENTAJE DE SATURACION VS TIEMPO DE LIXIVIACION  
(LIXIVIACION DIRECTA E INVERSA)

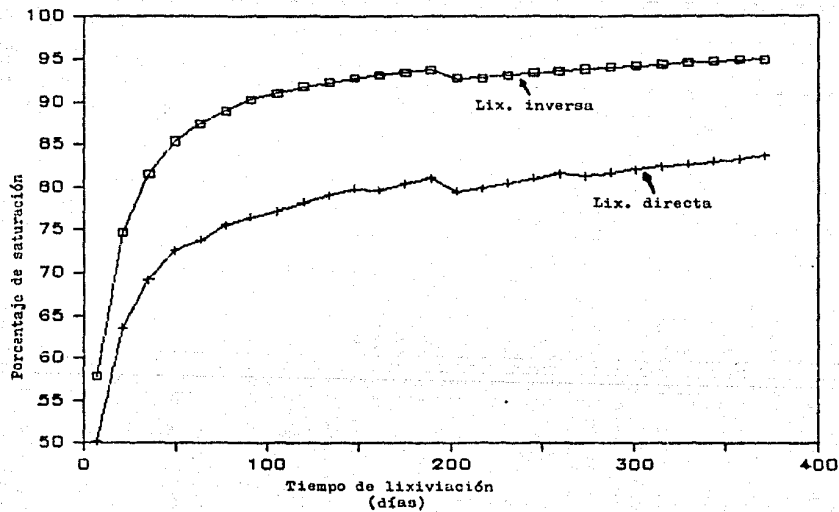


FIGURA 40: PORCENTAJE DE SATURACION VS TIEMPO DE LIXIVIACION  
(LIXIVIACION DIRECTA E INVERSA)

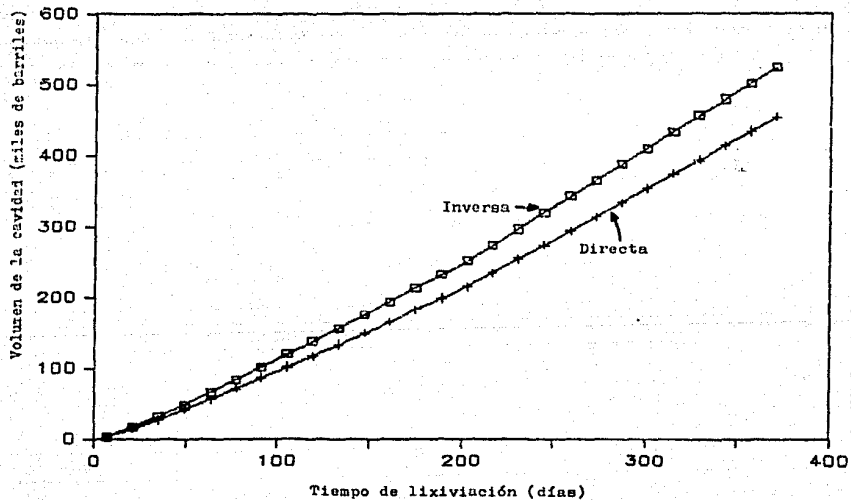


FIGURA 41: VOLUMEN DE LA CAVIDAD VS TIEMPO DE LIXIVIACION (LIXIVIACION DIRECTA E INVERSA)

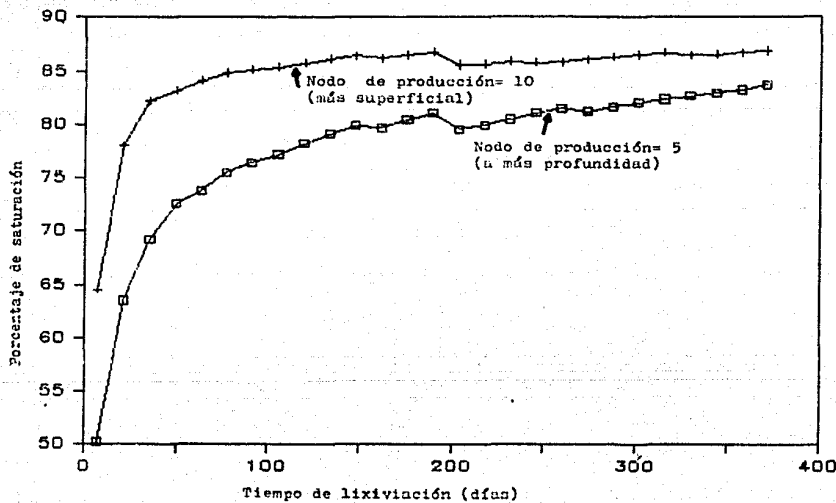


FIGURA 42: PORCENTAJE DE SATURACION VS TIEMPO DE LIXIVIACION  
(LIX. DIRECTA, VARIANDO EL NODO DE PRODUCCION)

lixiviación directa. variando la posición del nodo de producción de salmuera; las curvas mostradas apoyan lo que se explicó en la figura 39; Cuando el nodo de producción se sube, se expone una capa mas grande de sal a la disolución, por lo que se obtiene salmuera más concentrada.

CAPITULO V  
CONCLUSIONES

1.- Mexico requiere de terminales de almacenamiento de crudo para evitar interrupciones en el abastecimiento interno y/o en las cuotas para exportación.

2.- Poseer una mayor capacidad para almacenar petroleo crudo proporcionará ventajas como las siguientes:

a) Lograr un mejor balance entre oferta y demanda.

b) Contar con reservas, para asegurar que las refinarias dispongan del crudo necesario para continuar en operacion, durante suspensiones en la operacion de las instalaciones de produccion o lineas de conduccion.

c) Asegurar que las refinarias cuenten con suficiente capacidad para almacenar productos refinados durante periodos de dificultad con el transporte o consumo excepcionalmente bajo.

d) Almacenar productos durante temporadas de sobreproduccion industrial, para comercializarlos durante periodos en los cuales se incremente la demanda.

e) Como reserva estrategica, para almacenar productos para situaciones nacionales de crisis.

f) Almacenar energeticos primarios, tales como propano, butano, gas natural y aire comprimido, para cubrir los requerimientos de energia.

g) Amortiguar las variaciones de la demanda que se pre-

sentan a lo largo del día, debidas principalmente a patrones de comportamiento de la población (horas-pico) y hacer un mejor uso de las instalaciones de producción y transmisión.

3.- Los almacenamientos subterráneos tienen las siguientes ventajas sobre los superficiales:

VENTAJAS TÉCNICAS:

a) Mínimas pérdidas por evaporación, ya que el producto se encuentra perfectamente confinado.

b) Es posible usarlos como depósito final para materiales peligrosos, tóxicos o radioactivos.

c) Protección al medio ambiente, ya que como están situados en el subsuelo no deterioran al suelo ni a su ecología.

d) Seguridad, ya que la probabilidad de explosión o incendio es mínima, por lo que es posible situarlos en las proximidades inmediatas de los centros de consumo importantes.

e) Capacidad limitada únicamente por la extensión de la formación subterránea, por lo que permite el almacenamiento de volúmenes muy importantes.

f) Es posible almacenar productos a baja temperatura (gas natural licuado, gas licuado a presión). En el caso de almacenamiento superficial de estos productos, son necesarias consideraciones especiales para material, forma, aislamiento y diseño de las cimentaciones de los tanques.

g) Tiempos de implementación más bajos.

h) No se requiere de acero, que es escaso en el mercado porque se necesita en otras industrias.



#### VENTAJAS ESTRATEGICAS:

El almacenamiento se encuentra bien protegido contra influencias externas como los atentados.

#### VENTAJAS ECONOMICAS:

a) Los requerimientos de terreno son mínimos.

b) Cuando las condiciones geológicas son favorables, las inversiones en la creación de un almacenamiento subterráneo son menores al de uno superficial de volumen equivalente.

4.- Considerando los recursos naturales que posee nuestro país y la cercanía de estos a los centros productores de crudo, se concluye que la mejor opción para resolver las necesidades nacionales de almacenamiento son las cavidades en domo salino.

5.- Cuando se lleva a cabo un proyecto de almacenamiento en domo salino, es conveniente contar con un modelo matemático para simular la forma que va tomando la cavidad, para evitar que esta adquiera formas inestables durante su desarrollo.

Ahmad Saberian, de la Universidad de Texas desarrolló y perfeccionó un modelo matemático durante diez años, que sirvió de base para el programa MIXING3, capaz de simular la formación de cavidades en sal homogénea, a temperatura constante y con circulación directa o inversa.

6.- El programa tiene limitaciones, ya que no considera heterogeneidades en lecho salino, por lo que la forma real de la cavidad puede diferir de la predicha, siendo entonces necesario las dimensiones reales con el registro sonar caliper.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- BILLVE, G.H.  
"Underground storage of hydrocarbons today"  
Petroleum Refiner,32,4,136
- 2.- CLARKE,CRIBB and WALTERS.  
"The philosophy of gas storage"  
I.G.E. Journal  
November,1971,Page 748
- 3.- COATS,K.H.  
"Some technical and economic aspects of underground  
gas storage".  
Journal of Petroleum Technology.  
December,1966,Page 1561
- 4.- DAMES and MOORE.  
"Final report,Comparative evaluation of computer models  
used in the prediction of salt dissolution in the  
solution mining research".  
Golden, Colorado.  
September,14,1983.
- 5.- DENTON,C.A.  
"Brine disposal at the Bryan Mound Diffuser Site"  
Sea Technology.  
October,1981,Page 31.
- 6.- DIESEL,T.E.  
"Strategic oil storage".  
Interpipe'79  
Houston,Texas.
- 7.- DUBOIS,D.  
"Underground storage of hydrocarbons at Manosque,  
France".  
Fourth International Symposium on Salt.  
Northern Ohio Geological Society.

- 8.- EDMINSON, D.F.  
 "Why gas storage is going underground"  
 Petroleum Review,  
 September, 1982, Page 20.
- 9.- FURIGA, R.D. and SMITH, R.E.  
 "The United States Strategic Petroleum Reserve".  
 Annales des Mines.  
 Mayo-Junio, 1983.
- 10.- GEOSTOCK.  
 "Seminario sobre almacenamiento subterráneo"  
 México, D.F., 1981
- 11.- GOIN, K.L.  
 "Maximum allowable pressures for SPR caverns in salt  
 domes".  
 Sandia Laboratories, Energy Report.  
 Albuquerque, N.M.
- 12.- HALBOUTY, M.T.  
 "Salt domes, Gulf Region: United States and Mexico".  
 Gulf Publishing Company, Book Division.  
 Houston, Texas.
- 13.- INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.  
 Subdirección de Ingeniería de Proyectos de  
 Explotación.  
 "Estudio de factibilidad de almacenamiento de hidro-  
 carburos en cavidades subterráneas".  
 1981.
- 14.- INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.  
 Subdirección de Tecnología de Explotación.  
 "Desarrollo de cavernas en el domo salino de  
 Tuzandepetl para el almacenamiento de gas  
 licuado".  
 Mayo, 1982.

- 15.- INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.  
Subdireccion de Tecnologia de Explotacion.  
"Planificacion de la disolucion en la construccion  
de cavidades en formaciones salinas".  
Octubre, 1985.
- 16.- JANSSON, G.  
"Rock cavern type storage can be cheaper option".  
Oil and Gas Journal.  
October 28, 1974 . Page 74.
- 17.- KATZ, D.L. and VAPY, A.H.  
"Design of gas storage fields".  
Petroleum Transactions, AIME.  
Vol. 216, 1981. Page 44.
- 18.- KATZ, D.L. and COATS, K.H.  
"Underground storage of fluids".  
Ulrich's Books, Inc.  
Ann Arbor, Michigan.
- 19.- KRB, INC.  
"Underground storage in Mexico".  
1984.
- 20.- MASSEY, P.S.  
"Frozen earth propane storage".  
I.G.E. Journal.  
November, 1971. Page 743.
- 21.- NESTE OY.  
"Almacenamiento de petroleo en cavernas no lineadas  
en roca".  
Octubre 16, 1978.
- 22.- PASIECHNYK, L.T.  
"Solution Mined salt cavern storage of fluid  
hydrocarbons".  
CIM Bulletin.  
September, 1978. Page 91.

- 23.- PEMEX.  
"Memorias de Labores".  
1985.
- 24.- SABERIAN, A.  
"Numerical simulation of development of solution mined  
storage cavities".  
University of Texas at Austin.  
August, 1974.
- 25.- SCHNEIDER, H. J.  
"Design criteria and construction concepts of  
underground storage installations in rock caverns".  
6th National Symposium on Rock Mechanics.  
Aachen, 1984.
- 26.- SCOTT, E.  
"Underground LPG storage".  
Oil Weel.  
June 16, 1969. Page 25.
- 27.- TEMPLE, R. W.  
"Underground vs surface storage".  
Hydrocarbon Processing.  
August, 1973. Page 85.
- 28.- VAN POSSAN, N. E.  
"Underground storage assumes stature".  
Petroleum Refiner.  
May, 1955. Page 193.
- 29.- VELASCO, S. P. J.  
"Almacenamientos subterráneos de gas en estructuras  
acuíferas".  
Ingeniería Química.  
Marzo, 1978. Página 33.