



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“Conceptos Básicos en el Diseño  
y Construcción de Pozos  
Profundos de Inyección”**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO  
P R E S E N T A  
MANUEL ISMAEL DEL CAMPO DE LA HOYA  
MEXICO, D. F., 1979



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

TESIS 1979  
M. T. 50  
ECHA \_\_\_\_\_  
PROC \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



JURADO

PRESIDENTE:	JOSE E. GALINDO FUENTES
VOCAL:	CLAUDIO A. AGUILAR MARTINEZ
SECRETARIO:	ALBERTO DE LA FUENTE ZUNO
PRIMER SUPLENTE:	GUILLERMO JOSE VALENZUELA
SEGUNDO SUPLENTE:	ARTURO MOPALES COLLANTES
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:	DOMICILIO PARTICULAR Y UNAM, FACULTAD DE QUIMICA
SUSTENTANTE:	MANUEL ISMAEL DEL CAMPO DE LA HOYA
ASESOR DEL TEMA:	I. Q. ALBERTO DE LA FUENTE ZUNO

A LA MEMORIA DE MI MADRE  
QUIEN CON SU EDUCACION Y  
PRINCIPIOS ME IMPULSO.

A MI PADRE CON CARINO Y  
AGRADECIMIENTO, POR SU  
APOYO A LO LARGO DE MI  
FORMACION.

A MIS HERMANOS: JOSE ELOY, MARTIN,  
SOCORRO, MAYOLO, JOSE ANTONIO,  
JESUS Y HORTENCIA.  
A MI HERMANITA: MARIA ELENA

A MARIA ENRIQUETA POR SU  
CARINO, ALIENTO Y PACIENCIA



# INDICE

## I. INTRODUCCION

## II. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivos de Difusión

Objetivos Técnicos

## III. TECNOLOGIA DEL PROYECTO

### A. Aspectos Geológicos del Intervalo de Inyección.

1. Antecedentes Geológicos e Hidrológicos
2. Inyección e Intervalos Geológicos
  - a) Acuíferos
  - b) Acuicierre
  - c) Acuitard
  - d) Acuifuga
3. Tipos de Estratos (Rocas)
4. Estratigrafía Geológica
5. Geología Estructural

### B. Propiedades Físicas de los Estratos

1. Porosidad
2. Permeabilidad
3. Compresibilidad

4. Temperatura
  5. Estado de Esfuerzo
  6. Propiedades de los fluidos del subsuelo
    - a) Química
    - b) Viscosidad
    - c) Densidad
    - d) Presión
    - e) Compresibilidad
  7. Sistemas de flujo en el subsuelo.
- C. Pretratamientos requeridos en aguas residuales que se eliminarán a través de pozos de inyección.
- a. Sistemas de Homogenización
  - b. Eliminación de grasas y aceites
    - I. Introducción
    - II. Principios básicos de diseño
  - c. Sedimentación
    1. Introducción
    2. Tipos de sedimentación
    3. Remoción completa de fosas ideales de sedimentación
    4. Remoción fraccionada en fosas de sedimentación
    5. Efecto de la profundidad en fosas de sedimentación
    6. Principios básicos de diseño para fosas de sedimentación

d. Filtración

I. Filtración en membranas granulares

II. Filtración a vacío

III. Filtración a presión

IV. Filtración con procesos de microfloculación.

D. Características de pozos de inyección

IV. DISEÑO PROPUESTO

1. Diagrama de bloques y balance de materiales

2. Diagrama de flujo

3. Diseño del pozo profundo de inyección

V. DESCRIPCION DEL PROCESO

VI. ESTIMACION DE COSTOS

1. Inversión

2. Estimación de costos de operación

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VIII. BIBLIOGRAFIA

## I. INTRODUCCION

La corteza terrestre se encuentra formada enteramente por rocas (el subsuelo se transforma en roca si es puesto a la intemperie). Algunas rocas son porosas otras no, pero todas las rocas contienen algún tipo de líquido, gas ó combinaciones de ellos sometidos bajo presión. Esta presión interna y la temperatura generalmente se incrementan con la profundidad, pero diferentes factores químicos y físicos causan variaciones extremas de una formación geológica a otra. Los residuos líquidos pueden ser inyectados con seguridad solo en zonas porosas con presiones relativamente bajas ó moderadas las cuales se encuentran selladas hacia arriba y hacia abajo por un estrato envolvente, impermeable e irrompible, esta zona permeable receptora podrá ser de suficiente espesor y extensión lateral para contener el volumen de inyección sin que se incremente lo suficiente la presión hidráulica interna como para fracturar los estratos sellantes superiores e inferiores de la zona receptora ó de inyección. Los pozos de inyección podrán ser diseñados e instalados para su objetivo particular, y debiera ser continuamente monitoreado durante su operación para evitar presiones excesivas y para detectar posibles fugas de desechos líquidos dentro ó alrededor del pozo lo cual podrá contaminar los acuíferos de aguas dulces explotables.

La inyección en el subsuelo consiste en depositar debajo del subsuelo de la tierra un fluido por inyección a través de un pozo, esta es una técnica muy usual en nuestros tiempos (U. S. A., FRANCIA, SUIZA, ALEMANIA, etc.). De ahí que esta técnica haya sido una solución práctica para algunos de los problemas de disposición final y almacenamiento muy difíciles. Debido a su complejidad, esta tecnología es muy costosa.

La inyección sistemática dentro del subsuelo, se empezó a utilizar hace aproximadamente cincuenta años, como método para extraer petróleo (sistema secundario de extracción) en campos que no es posible extraer más petróleo por las bajas presiones del subsuelo ó sistemas de bombeo. En la década de los treinta la inyección en el subsuelo empezó a ser ampliamente utilizado como método para eliminar las aguas salobres que generalmente acompañan a la producción de petróleo y gas. Gradualmente la inyección en el subsuelo empezó a ser utilizado como método de disposición final, debido a las promulgaciones de leyes ambientales diseñadas para proteger las aguas superficiales (acuíferos dulces) de la contaminación, las cuales prohíben la descarga de residuos líquidos tóxicos en aguas superficiales de cualquier tipo, si estos efluentes no son tratados para remover los agentes contaminantes que puedan originar un desajuste en la ecología de una región, país, continente, etc. Por esta razón y dado que en ciertos casos es más seguro y económico el

inyectar estos efluentes que tratarlos, los pozos de inyección han empezado a ser ampliamente utilizados como métodos de disposición final para algunos residuos líquidos industriales.

En los pozos profundos de inyección, los fluidos son localizados lo suficientemente lejos y abajo de los acuíferos en formaciones geológicas del subsuelo, las cuáles se encuentran separadas de los recursos naturales no renovables (acuíferos de aguas dulces, petróleo, gas natural, azufre, sal, etc.) por estratos rocosos impermeables. En pozos de inyección poco profundos, los fluidos son inyectados en formaciones del subsuelo abajo de los acuíferos de aguas frescas y algunas veces en ellos mismos como en el caso de pozos para recargar acuíferos.

En la actualidad existen otros tipos de pozos de inyección los cuáles son utilizados para: producción secundaria de pozos petroleros, eliminación de salmuera, almacenamiento de: gas y petróleo, vapor (para plantas generadoras de energía eléctrica por transformación de la energía solar), para prevenir la intrusión de fluidos indeseables en acuíferos de aguas dulces, minería y para almacenar ó disponer de residuos nucleares.

Si la inyección en el subsuelo no se lleva a cabo en la forma correcta, puede originar la contaminación de los acuíferos de aguas dulces del subsuelo. Las formas por las cuáles este ti

po de contaminación puede ocurrir son numerosas, por ejemplo, si un pozo profundo de inyección no es diseñado y construido en la forma correcta y utilizando los materiales adecuados, la corrosión ó fuga puede ocurrir, permitiendo la migración del fluido inyectado hacia fuera del pozo en los acuíferos adyacentes, si existen pozos abandonados cercanos al pozo de inyección los cuáles no fueron apropiadamente taponados el fluido inyectado ó el fluido de la formación podran migrar a través de estos pozos, si el fluido inyectado no es compatible con la formación del fluido nativo ó formación geológica dentro de la cuál es inyectado, las reacciones químicas podran reducir la capacidad del estrato para aceptar con seguridad el fluido. Si la presión del depósito no es mantenida en un nivel de seguridad, puede romper los estratos sellantes, causando con ello la migración de los fluidos (nativo e inyectado) hacia áreas con presiones más bajas y por ende contaminando los recursos naturales y en ocasiones puede llegar a producir movimientos tectónicos locales ó regionales como el ocurrido en Denver, Co. (U.S.A.) en la década de 1960.

Para determinar la localización exacta de un pozo de inyección es necesario contar y generar cierta información geológica y geofísica. Todos los pozos abandonados que penetran en la zona afec

tada por el estrato de inyección, deben de ser localizados y convenientemente taponados. Muestras representativas de rocas y fluido de las formaciones potencialmente receptoras deberan ser extraídas y determinarseles su compatibilidad química con el fluido a inyectar. El pozo de inyección proyectado, debiera ser cuidadosamente perforado, estudiado mediante registros, ademado, comentado y probado, debiendose tomar precauciones para evitar la corrosión de los ademes, tubería de inyección y equipos localizados en el orificio (medidores de pH, presión, etc.) después de que el pozo es puesto en operación, la presión de inyección debiera ser continuamente monitoreada para determinar cualquier incremento en la presión del estrato receptor, así mismo debiera ser monitoreado para detectar fugas.

Adicionalmente cabe mencionar que un pozo profundo de inyección implementado como método de disposición final para aguas residuales no es un basurero en el cual se pueda almacenar todo tipo de desechos, para lograr mantener una operación adecuada de los pozos de inyección es necesario contar con un pretratamiento generalmente primario previo a la inyección, en virtud de que se requiere eliminar el contenido de grasas y aceites, sólidos suspendidos ( $D_p < 0.5 \mu$ ) y ajuste de pH para evitar taponamientos en la zona de inyección e incompatibilidad entre los fluidos ó fluido y es-



trato, motivo por el cuál es común contar con sistemas de separación de grasas y aceites (separadores API, CPI, Skimmers, etc.) Sistemas de filtración (filtros de tierras diatomáceas, arena, cartucho, etc.) Sistemas de clarificación, sistemas de ajuste de pH y sobre todo sistemas de homogenización para no tener cambios en las características del efluente a ser inyectado ni en el flujo y presión de inyección.

## II. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos a lograr con la elaboración y edición del presente trabajo las podemos dividir de acuerdo a su fin:

- Objetivos de Difusión
- Objetivos Técnicos

Como objetivos de Difusión tenemos los siguientes:

1. Dar a conocer la existencia de una tecnología segura y eficaz que reduce al mínimo los problemas de contaminación ambiental y los costos de operación para la disposición final de efluentes líquidos altamente contaminados los cuáles generalmente se encuentran asociados con procesos productivos de origen petroquímico como efluentes residuales y cuyo tratamiento en sistemas convencionales o eliminación es prácticamente imposible o antieconómico.
2. Ilustrar las generalidades y fundamentos de esta tecnología la cuál si es debidamente aplicada permite cumplir con las siguientes premisas:
  - a) Es una solución final, total y permanente que permite la disposición final y segura de los desechos líquidos altamente contaminantes.

- b) Reduce al mínimo los costos fijos de operación para la disposición final de estos desechos.
- c) Potencialmente reduce al máximo los problemas de contaminación ambiental.
- d) Cumple con la Legislación Nacional vigente en materia de contaminación ambiental (Reglamento para prevenir y controlar la contaminación de aguas).
- e) Permite flexibilidad a las industrias que generan efluentes líquidos contaminados para que lleven a cabo sus políticas de expansión.

Como objetivos técnicos a lograr se pretenden los siguientes:

1. Dar a conocer un criterio preliminar general de los parámetros fundamentales básicos que es necesario considerar en el diseño de pozos profundos de inyección que se pretendan implementar como método de disposición final para residuos líquidos.
2. Poder establecer los requerimientos de tratamiento (Facilidades de Superficie) previos a la inyección

3. Ilustrar y describir un caso particular general que permita conocer tanto sus ventajas como sus desventajas. Las cuáles son:

#### VENTAJAS

- a) Capacidad ilimitada para almacenamiento.
- b) Requerimientos de superficie pequeños si se compara contra otros métodos.
- c) Riesgos de falla mínimos si el sistema es debidamente diseñado, construido, operado y monitoreado.
- d) Sistema ampliamente probado en otros países como U.S.A., U.R.S.S., R.F.A., Inglaterra, Francia, etc.
- e) Costos de operación bajos.

#### DESVENTAJAS

- a) Costo inicial de inversión elevado.
- b) Requerimientos de información, estudios e investigaciones prolongados.
- c) Exploraciones y perforaciones de prueba costosas.

### III. TECNOLOGIA DEL PROYECTO

En la mayoría de los campos de la ingeniería, han tenido que desarrollarse sistemas especializados como solución a problemas específicos, tal es el caso de la tecnología para diseñar, construir y operar pozos profundos de inyección. Como métodos para almacenar ó eliminar efluentes líquidos. El presente trabajo pretende dar a conocer los parámetros que intervienen en forma principal en el diseño de pozos de inyección y los cuales podemos dividir en cuatro partes las cuales son:

- a) Aspectos intrínsecamente relacionados con la caracterización del pozo de inyección ó caracterización geológica del intervalo de inyección.
  - b) Propiedades físicas (ingenieriles) del subsuelo del horizonte de inyección.
  - c) Requerimientos de pretratamiento del fluido a inyectar, determinados por la compatibilidad ó incompatibilidad química entre fluido nativo y formación geológica con el fluido a inyectar.
  - d) Características de pozos de inyección
- A) ASPECTOS GEOLOGICOS DEL INTERVALO DE INYECCION

#### 1. Antecedentes geológicos e hidrológicos

El conocimiento exacto de las características geológicas e hidrológicas del subsuelo y alrededores de un pozo profundo de inyección son

herramientas indispensables para una apropiada evaluación del diseño, construcción, operación y monitoreo para la inyección de desechos líquidos. En virtud de lo cual es necesario conocer el ambiente geológico de los estratos (superficiales y subterráneos) describiéndolos en términos de su litología, espesor, distribución, configuración estructural, propiedades químicas y físicas (tanto de estratos así como de los fluidos contenidos en estos), así como la naturaleza de los estratos y fluidos y de los sistemas de flujo locales y regionales comprendidos por la hidrología.

## 2. Inyección e intervalos confinantes.

Las secuencias verticales de estratos (rocas) que se presentan en el subsuelo, son convencionalmente subdivididas para su estudio en: Eras, estas a su vez en períodos, los períodos en épocas, las épocas en grupos, los grupos en formaciones y por último las formaciones en miembros basándose para establecer este orden listado en el contenido de minerales, fósiles y otras características apropiadas. Sin embargo dichas subdivisiones no son adecuadas cuando se discuten sistemas de flujo dentro del subsuelo en virtud de que otras características denominadas propiedades físicas (como la porosidad y permeabilidad) del subsuelo no pueden ser relacionadas con fronteras ó barreras geológicas. Este problema fue analizado durante largo tiempo por geólogos e hidrologos, quienes desarrollaron la terminología adecuada para describir las subdivisiones de los estratos en términos de su capacidad para almacenar y transmitir agua. En base a esto podemos definir los si-

güentes términos:

- a) Acüfferos, el cual se define como una formación, grupo de formaciones ó parte de una formación que contiene suficiente material premeable y saturado para producir cantidades significativas de agua en pozos ó manantiales.
- b) Acücierre, el cual inversamente al anterior almacena agua pero no transmite cantidades significativas.
- c) Acüitard, el cual relaciona los conceptos antes mencionados, ya que transmite cantidades suficientes de agua para ser regionalmente significativas pero insuficientes para suministrar a un pozo ó manantial.
- d) Acüifuga es aquel estrato que ni almacena ni transmite agua.

Estos términos podran ser aplicados para definir algunas veces los sistemas de inyección. Los acüfferos receptores actuales ó potenciales suelen ser llamados intervalos de inyección, zonas, unidades ó depósitos y el estrato que interviene es conocido como intervalo de confinamiento (acücierre) ó intervalo semiconfinante (acüitard), por el basamento secuencial de rocas igneas ó metamórficas que cubre por arriba y por debajo el estrato sedimentario y que generalmente es no poroso e impermeable se le conoce como acüifuga, en el resto del presente trabajo el término intervalo de inyección sera utilizado para

describir el intervalo vertical total dentro del cual sera inyectado el efluente liquido y el término zona de inyección significa una subdivisión del intervalo de inyección.

### 3. Tipos de estratos (rocas)

Los estratos pueden ser descritos en términos de su origen y su litología, posteriormente sus características seran definidas por su composición y textura. De acuerdo a su origen los estratos se pueden clasificar en tres tipos, que son: igneos, metamorficos ó sedimentarios. Todos estos tipos de estratos parecen ser capaces de actuar como intervalos de inyección, sin embargo las rocas ó estratos sedimentarios y en particular aquellas que se depositaron en un ambiente marino son las que poseen características geológicas y propiedades físicas más adecuadas para ser utilizadas como intervalos de inyección. Estas características o propiedades son: porosidad, permeabilidad, espesor y extensión lateral suficiente para permitir que el estrato actue como depósito para almacenar residuos líquidos a bajas presiones de inyección y con seguridad.

Las arenas, calizas y dolomitas son tipos de estratos sedimentarios comunmente porosos, permeables y resistentes al fracturamiento, propiedades que las hacen ser excelentes intervalos de inyección. Desde luego que estos mismos tipos de estratos localizados en estratos fracturados pueden tambien ser utilizados en forma satisfactoria como intervalos de inyección.



Limos, arcillas, arenas, anhidrita, yeso y sal deben de estar presentes para proveer excelentes sellos impermeables (acuffugas) que evitan el flujo de los residuos líquidos hacia arriba ó hacia abajo del intervalo de inyección.

#### 4. Estratigrafía Geológica

El estudio de composición, secuencia, espesor, edad y correlación de las rocas localizadas en una región es comprendido en la estratigrafía geológica, los datos de arranque para la obtención de esta información es la llamada sección columnar, la cual es la representación gráfica de los estratos rocosos presentes en una localidad ó región. La figura No. 1 es la sección columnar generalizada para la región conocida como Istmo de Tehuantepec, fué seleccionado este ejemplo en particular, porque en el se muestran los diferentes tipos de estratos, unidos a que en dicha región se encuentra localizada la planta que genera los efluentes líquidos que es necesario inyectar al subsuelo a través del modelo del pozo de inyección ilustrado en el presente trabajo.

#### 5. Geología estructural

La geología estructural es la ciencia que estudia la envoltura, fracturamiento y distribución de los estratos. La caracterización

SECCION COLUMNAR ESTRATIGRAFICA DE LA CUENCA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC

ERA	PERIODO	EPOCA	DESCRIPCION GEOLOGICA	
TERTIARIO	PLEISTOCENO		Consiste en cristales finos clásticos, clasificados como gravas. En algunas áreas existen arenas con cristales gruesos cristalinos mezclados con arcillas y gravas.	
	PLIOCENO		En el norte del istmo se representa por areniscas, arenas y arcillas grises y azul verdosas con restos de plantas lignificas y por un conglomerado constituido de rocas igneas intrusivas.	
	MIOCENO	SUPERIOR	Formación Cadral — Consiste en arenas, arcillas y conglomerados. En algunas áreas esta se subdivide en dos partes, una parte superior formada por arcillas con arenas grises y una parte inferior formada por arenas y gravas pobremente estratificado.	
			Formación Aquequeite — parte superior arcillas lignificas arenosas azules.	
			Parte media: arenas rocosas, compactas finas en el medio granuladas arenosas cafes y azules ocasionalmente interestratificadas con arcillas y arenas.	
			Parte inferior: arenas fósiles, inconsolidadas, coloreadas de café — muy arcillosas, bien laminadas y arenas amarillas con bandas de arcillas arenosas. El espesor total fluctua entre 400 y 500 m. es muy común en la parte norte de la Cuenca	
	MIOCENO	MEDIO	Formación Paraje Solo — Parte superior arenas de granulada fina y gruesa color gris y café interestratificadas con arcillas grises y azules	
			Parte inferior — arenas rocosas, compactas, granuladas, areniscas grises y cafes, interestratificadas con arcillas y material lignítico, afloramientos en paraje solo, acatapan, molacan, tonala, ihuatlan y otras localidades. espesor 600 m	
	MIOCENO	INFERIOR	Formación Filsoia — Parte Superior: Formado por arcillas arenosas rojas y rojo con café cuando son humedecidas. Espesor 400 m.	
			Parte media: arenas de cuarzo angulares, grano de tamaño fino a medio color blanco a ligeramente gris. ocasionalmente muestra un color café debido a las impurezas del óxido de hierro.	
CUATERNARIO	MIOCENO		Parte inferior: Lutitas de color gris a café y arenas rocosas pobremente cementadas. espesor promedio 400 m	
			Formación Concepción. — Parte superior: Lutitas arenosas de color gris a azul pobremente estratificadas y bien consolidadas. Localidades, Soconusco, Achotal, Romero Rubio y Acahuacan. espesor 100 a 200	
	MIOCENO		Parte inferior: Lutitas bien consolidadas pobremente estratificadas color gris, gris claro y azul oscuro. espesor 300 m	
			Formación encante — esta formado por series alternadas de arenas rocosas y Lutitas arenosas, de grano fino color azul grisáceo o amarillo grisáceo. espesor 500 a 800 m.	
	OLIGOCENO		Formación deposito — Lutitas arenosas, color gris a verde grisáceo ocasionalmente azul intercalado con capas de cenizas volcánicas. espesor de 0.3 a 5 m	
			Conglomerado Nanchital — distribución Local	
	OLIGOCENO		Formación La Laja: Lutitas grises ligeramente arenosas bien estratificadas y con algunas intercalaciones de arenas rocosas y cenizas volcánicas.	
			Lutitas Nanchital: Lutitas, duras, bien estratificadas color gris, azul oscuro. En algunos lugares alterna con calcitas y lechos de arenas rocosas. En algunas áreas Cuzeponaga y chichijapa descansan sobre el conglomerado usuponaga el cual este formado por pedras redondeadas de rocas igneas y arenas rocosas.	
	MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Formación Mendez — formada por arcillas calcareas de color gris y café grisáceo, intercaladas con arcillas y arenas rocosas de granulometría fina color gris y café grisáceo. Espesor de 600 a 900 m con afloramientos en el sur y sur este de la cuenca.
			MEDIO	Caliza Sierra Madre: formada por calizas grises y blancas alternadas en lechos gruesos y delgados, no se han encontrado dentro de los límites de la cuenca.
INFERIOR			Discordancia Local	
JURASICO		Portlandien	Caliza de Chinameca	
		Kimmeridgian	Lechos Rojos	
TRIASICO		Formación Salina		

FIG. 1

de una región a través de su geología estructural es importante por la importancia del flujo de fluidos dentro de los estratos del subsuelo, las propiedades físicas de los estratos, la localización de depósitos minerales y fallas geológicas ó fracturas de origen tectónico. Las rocas de origen sedimentario generalmente pueden estar envueltas por sinclinales; los cuales son estratos envolventes con trayectorias hacia abajo y/o anticlinales ó estratos envolventes con trayectorias hacia arriba. La cuenca sinclinal de una región generalmente con extensiones de cientos de kilómetros son excelentes intervalos de inyección. Las cuencas anticlinales a la inversa de las sinclinales no pueden ser utilizadas como intervalos de inyección ya que la mayoría de estas áreas son excelentes productoras de gas ó petróleo.

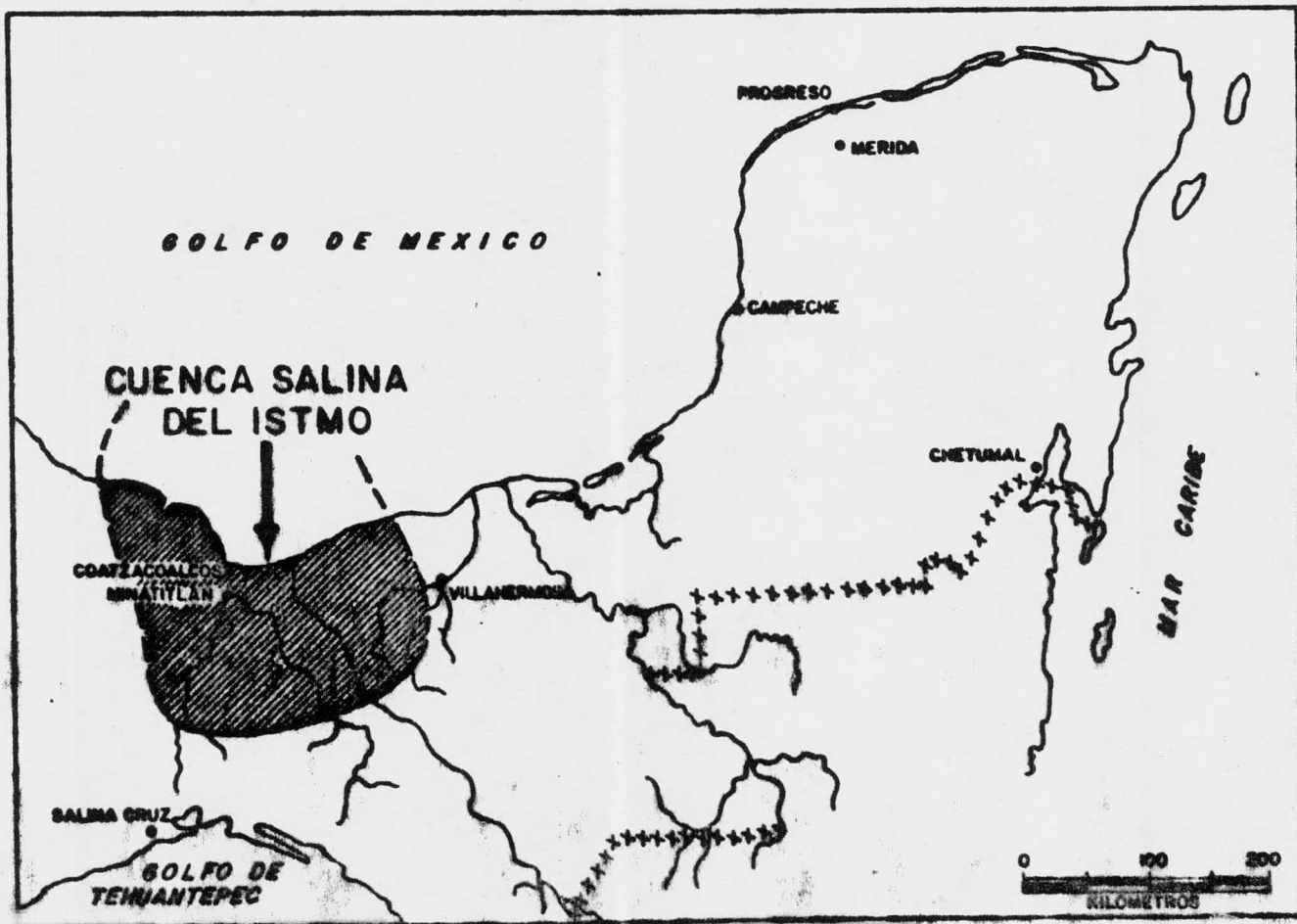
Las fallas son fracturas en la secuencia del estrato rocoso a lo largo del cual han ocurrido desplazamientos en dos direcciones relativos uno al otro, tales fracturas varían en un rango comprendido desde varios centímetros a kilómetros en longitud y los desplazamientos son de magnitud considerable, este tipo de fallas se pueden presentar en forma simple ó compleja, necesitando de la ayuda de la geofísica para poder definir las completamente (estudios de reflexión y refracción).

Se ha conocido a través de la experiencia, que las fallas pueden actuar como barreras al movimiento de fluidos ó como canales para el flujo de fluidos. Sin embargo muy poco es conocido en detalle acerca de como y porque algunas fallas son barreras y otras son canales de flujo. En teoría ninguna falla en un estrato sedimentario rocoso podra ser considerada como barrera absoluta pero la falla podra tener una permeabilidad más baja que el acuífero en su corte, lo cual para propósitos generales es considerada como una barrera, muy pocas veces ha sido posible para los geólogos que al iniciar un estudio determinen si una falla es una barrera ó una trayectoria de flujo, para propósitos generales de evaluación preliminar se recomienda se considere como trayectoria de flujo y si como consecuencia de esto la falla puede presentar problemas potencialmente peligrosos (fugas, etc.) sera necesario abandonar el proyecto y no reanudarlo hasta no comprobar que dicha falla no presenta riesgos de fugas. Una falla puede ser considerada util para la inyección si es lo suficientemente larga y extensa y posee la persistencia vertical para confinar un determinado efluente en una localización.

Los datos de la estructura geológica deberan ser desarrollados en mapas, cortes estructurales, secciones estructurales y otro tipo de figuras, una mayor información geológica sera obtenida en estudios tectonicos y geofísicos los cuales seran posteriormente desarrollados

en mapas de geología estructural. Se anexan las figuras No. 2, 3, 4 y 5 en las cuales se podrá observar el desarrollo de esta información. Adicionalmente y por considerarlo de interés, a continuación se definen ciertos términos geológicos que aparecen en las mencionadas figuras y que en los sucesivos de este trabajo podrán ser aplicados:

1. Un domo es una anticlinal simétrica, con el estrato sumergido más ó menos igual en todas las direcciones relacionadas al centro de dicha estructura (domos de chimaneca y Jaltipan). Los domos salinos son comunes en la costa del Golfo de México y fueron formados por el movimiento ascendente de la intrusión salina depositada en: el cretáceo superior, el paleoceno y eoceno.
2. Una graben es un block de estrato que ha sido obligada a descender por dos fallas.



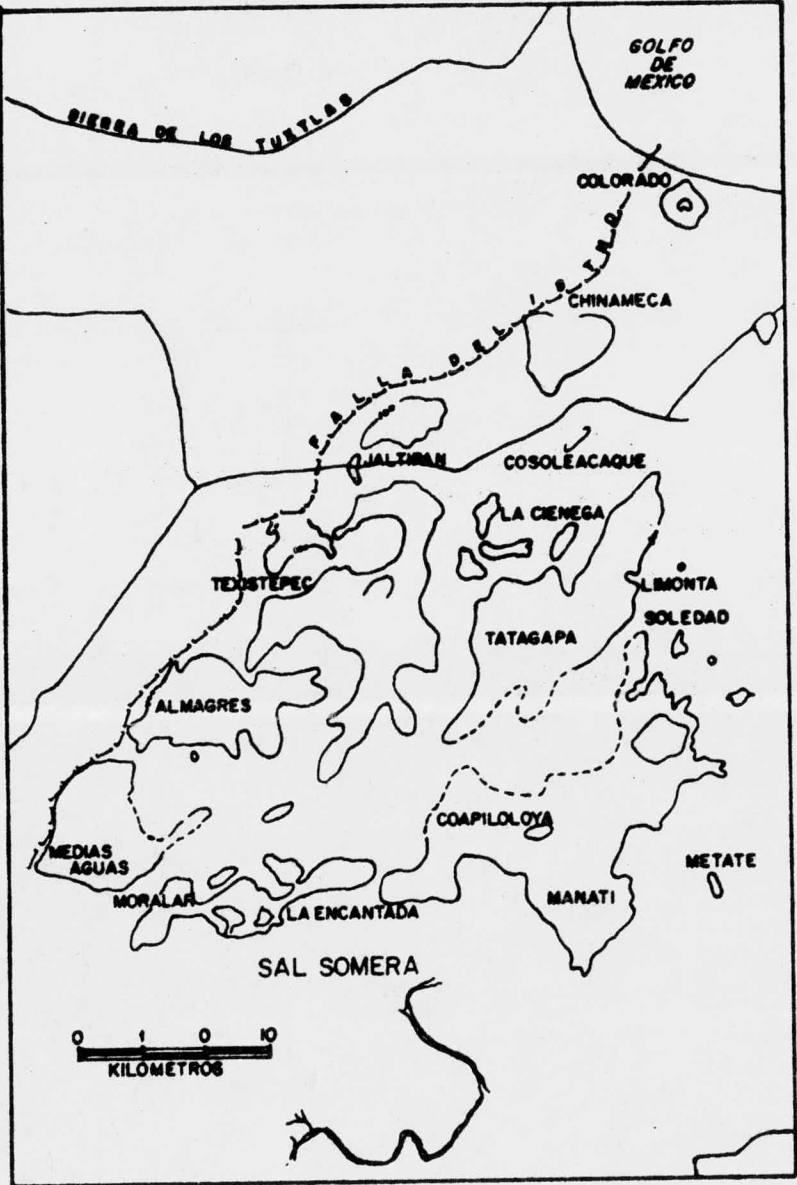


FIG. 3

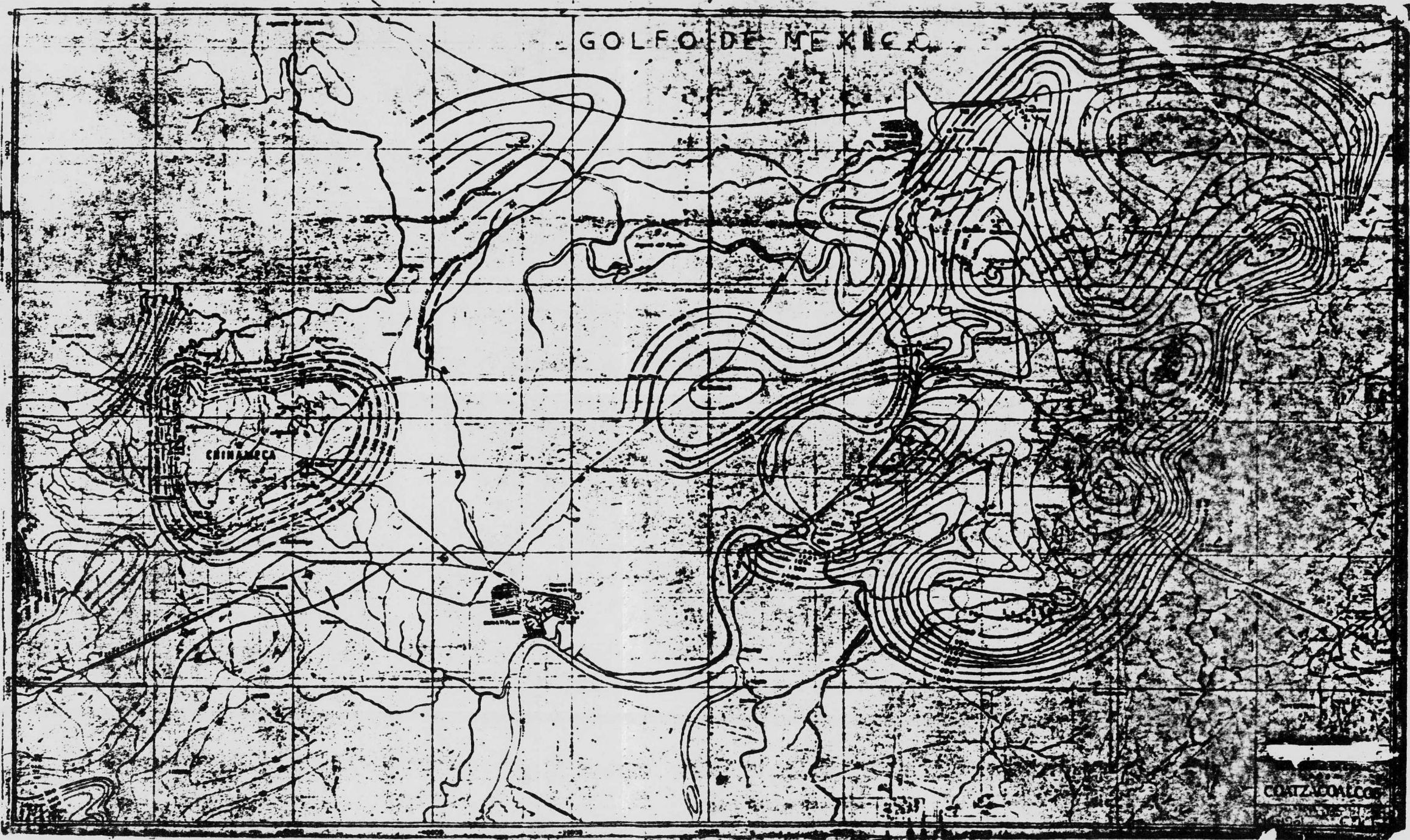




GOLFO DE MEXICO

CHINAMECA

CONZACALCO



## B. PROPIEDADES FISICAS DE LOS ESTRATOS

Si se desea conocer la respuesta mecánica del subsuelo con la inyección de efluentes líquidos, es necesario realizar una evaluación cuantitativa de las propiedades físicas de los diferentes estratos de intervalo de inyección con el fin de determinar su compatibilidad ó incompatibilidad con el efluente a inyectar.

Dentro de la clasificación de estas propiedades podemos incluir principalmente las siguientes:

1. Porosidad
2. Permeabilidad
3. Compresibilidad
4. Temperatura
5. Estado de esfuerzo
6. Propiedades de los fluidos del subsuelo
7. Sistemas de flujo en el subsuelo

### 1. Porosidad

La porosidad se define como:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \dots\dots\dots (1) \text{ \{Adimensional\}}$$

Donde:

$\phi$  = Porosidad expresada como una fracción decimal

$V_v$  = Volúmen de poros ó huecos

$V_t$  = Volúmen total del estrato

También la porosidad es comunmente expresada como porosidad total ó porosidad efectiva, la porosidad total es una medida de todos los

espacios huecos ó vacíos contenidos en un estrato. La porosidad efectiva esta basada en el volúmen de huecos interconectados y este concepto define mejor las propiedades hidráulicas de un estrato rocoso, ya que solo la porosidad interconectada es apropiada para el flujo de los fluidos a través del estrato.

La porosidad también puede ser clasificada en primaria (que se define como la porosidad que incluye los poros originales intergranulares ó intercristalinos y la porosidad asociada con fósiles, planos ligantes y cosas similares) y secundaria (que es el resultado de fracturas, canales de flujo, recristalización y dolomitación). La porosidad intergranular se presenta principalmente en arenas y areniscas no consolidadas, dependiendo de la distribución de tamaño, forma, angularidad, arreglo de empaque, composición mineral y el grado de cementación natural de los granos, lo cual puede ser determinado en laboratorios sobre cortes de rocas consolidadas obtenidas durante las perforaciones, los análisis sobre arenas inconsolidadas eran muy difíciles de obtener pero en la actualidad las técnicas han sido desarrolladas y por ende es posible obtener la porosidad de tales formaciones con cierto grado de exactitud. Así mismo cabe mencionar que la porosidad se ve aumentada por la presencia de fracturas y canales de solución en un estrato.

La porosidad de los estratos sedimentarios varia en un rango comprenido desde el 5% en arenas monolíticas hasta el 35% en arenas depositadas recientemente. Las calizas densas y dolomitas pueden estar

presentes con un valor casi nulo de porosidad. La porosidad no es una medida directa de la capacidad de almacenamiento de un estrato, pero generalmente un estrato con porosidad alta es mejor para la inyección que un estrato con baja porosidad, esto es debido a la mayor cantidad de espacios vacíos y por lo tanto el área entre el cual el fluido tendrá que esparcirse será menor. Adicionalmente cabe mencionar que no existe una relación universal entre porosidad y permeabilidad y generalmente es posible concluir, que a un incremento en porosidad le corresponde un incremento en la permeabilidad de un acuífero particular ó intervalo de inyección.

El promedio de la porosidad multiplicado por el espesor total del intervalo de inyección, nos proporciona el volumen poroso por unidad de área, este valor nos permite comparar la capacidad de almacenamiento de un estrato en varios puntos, siendo así factible seleccionar la zona de inyección más adecuada de un intervalo de inyección ó estrato receptor con alta porosidad (volumen poroso grande) será más adecuado para la inyección que uno con baja porosidad.

## 2. Permeabilidad

La permeabilidad de un estrato es la medida de su capacidad para transmitir fluidos sometidos a un gradiente de potencial. De igual forma que la porosidad, la permeabilidad intergranular es influenciada por las propiedades de los granos que se encuentran formando al estrato. (arenas, areniscas, limos, arcillas, etc.), sin embargo

mientras la porosidad no es dependiente del tamaño del grano, la permeabilidad es fuertemente dependiente de esta característica (tamaño de los granos). Por lo tanto podemos concluir que entre más pequeño sea el tamaño de los granos de un estrato, su permeabilidad tendera a ser nula, razón por la cual las arcillas y limos son excelentes intervalos confinantes.

Cuantitativamente, la permeabilidad es expresada por la ley de Darcy, una de sus ecuaciones es:

$$\bar{K} = \frac{q\mu}{A\rho g} \frac{dl}{dh} \dots\dots\dots (2) \text{ (L}^2\text{)}$$

Donde:  $q$  = Velocidad de flujo a traves del poro ó hueco promedio

$A$  = Area de la sección transversal a traves de la cual ocurre el flujo.

$\mu$  = viscosidad del flujo

$\rho$  = Densidad del fluido

$l$  = Longitud del poro ó hueco promedio a traves del cual ocurre el flujo

$h$  = Perdidas por fricción a traves de la longitud del poro ó hueco promedio

$g$  = Aceleración debida a la gravedad.

$\bar{K}$  = Coeficiente de permeabilidad

Quando la viscosidad y densidad de un fluido aparecen en la ecuación de Darcy, la capacidad de flujo de un medio particular es medido y referido como coeficiente de permeabilidad si se utilizan las unida-

des del sistema métrico decimal K podrá ser expresada en  $\text{cm}^2$ . Generalmente en los trabajos petroleros la permeabilidad es expresada en Darcys ó milidarcys siendo definidos por:

$$\bar{K} = \frac{q \mu}{A} \frac{dl}{dp} \dots\dots\dots (3) \text{ (L}^2\text{)}$$

Donde:  $P = lgh \dots\dots\dots (4) \text{ (M/L}^2\text{)}$

$p =$  Presión y las condiciones especificadas son:

$$1 \text{ Darcy} = \frac{1 \text{ cm}^3/\text{seg.} \times 1 \text{ cps.} \times 1 \text{ cm.}}{1 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ atm.}}$$

La forma más sencilla de la ley de Darcy, utilizada en estudios de acuíferos subterráneos poco profundos es:

$$\bar{K} = \frac{q}{A} \frac{dl}{dh} \dots\dots\dots (5) \text{ (L/t)}$$

Donde:  $K =$  Conductividad hidráulica

Los otros términos han sido definidos previamente.

Valores de permeabilidad adecuados para la inyección se consideran los comprendidos entre el 1 y 10 milidarcys, de 100 a 1000 milidarcys se consideran excelentes y menos de 1 milidarcy se considera como valor adecuado de permeabilidad para estratos confinantes (acuifugas) como las arcillas.

Al evaluar la capacidad de una unidad de inyección ó de confinamiento, el espesor del estrato es tan ó mas importante que la permeabilidad. El espesor del receptor (intervalo de inyección) saturado por el fluido inyectado multiplicado por la conductividad hidráulica es

la transmisibilidad, la cual puede ser interpretada como la velocidad a la cual el fluido existente es transmitido a su viscosidad y densidad a través de un acuífero ancho con un gradiente hidráulico.

Un intervalo de inyección apropiado generalmente requiere valores de transmisibilidad comprendidas en miles de milidarcys ft/cps. La permeabilidad de un fluido depende de las propiedades químicas del fluido penetrante ó a inyectar. También es importante el hacer notar que los fluidos con diferente capilaridad, tendrá diferente permeabilidad sobre el estrato, siendo siempre una mayor que la otra, razón por la cual es necesario remover el contenido de gases, grasas y aceites de un desecho líquido que va a ser inyectado.

### 3. Compresibilidad

La compresibilidad de un medio elástico se define como el cambio de volúmen originado por un cambio en la presión hidrostática ó sea:

$$\beta = \frac{-\partial v}{v \partial p} \dots \dots \dots (6) \{F/L^2\}^{-1}$$

Donde:  $\beta$  = Compresibilidad del medio {Presión}<sup>-1</sup>

$v$  = Volúmen

$p$  = Presión

La compresibilidad de un acuífero incluye las compresibilidades del esqueleto y del fluido contenido en él.

Un parámetro relacionado con la compresibilidad es el coeficiente de almacenamiento el cual fue definido por Lohman en 1972, como el volú-

men de agua de acuífero relacionado ó almacenado por unidad de área superficial y afectado por el cambio de cabeza hidráulica ó bien en forma matemática:

$$S = \phi \gamma b \left( \beta + \frac{\alpha}{\phi} \right) \dots\dots\dots (7) \text{ (Adimensional)}$$

Donde: S = Coeficiente de almacenamiento

$\phi$  = Porosidad

$\gamma$  =  $\rho g$  = Peso específico del agua por unidad de área ó presión hidrostática por ft de espesor de acuífero.

b = Espesor del acuífero

$\beta$  = Compresibilidad del agua

$\alpha$  = Compresibilidad del esqueleto del acuífero

#### 4. Temperatura

La temperatura de un acuífero y de los fluidos contenidos por él, es importante por el efecto que esta tiene sobre las propiedades físicas del fluido a inyectar. Por regla general los acuíferos explotables tienen una temperatura de  $\pm 3$  °F más elevada que la temperatura promedio anual del aire de la región en cuestión. Así mismo por regla general podremos considerar que la temperatura del subsuelo generalmente se incrementa en  $\pm 1.5$  °F por cada 100 ft de incremento en profundidad. A esta velocidad en el incremento de la temperatura con el incremento en la profundidad se le conoce como gradiente térmico.



## 5. Estado de esfuerzo

En una secuencia de estratos sedimentarios el esfuerzo vertical normal total se incrementa con la profundidad bajo incremento de espesores de los estratos y fluidos en un porcentaje de  $\pm 1 \text{ lb/in}^2$  por cada ft de profundidad incrementada. Los esfuerzos laterales pueden ser mayores ó menores que los esfuerzos verticales, siendo esto una función dependiente de las condiciones geológicas de los estratos involucrados. En áreas ó regiones en donde las incrustaciones han y estan siendo activamente comprimidas, los esfuerzos laterales son mayores que los esfuerzos verticales esperados: En áreas en donde las incrustaciones no han sufrido compresiones, los esfuerzos verticales seran mayores que los esfuerzos laterales. Concluyendo podemos afirmar que el conocimiento de esta información es esencial para estimar la perforación de pozos, en virtud de que nos permite determinar si una localidad se encuentra en un estado de actividad tectónica de compresión.

Para poder predecir la presión a la cual la fractura hidráulica ó movimiento de falla puede ocurrir en un estrato, es necesario estimar el estado de esfuerzo al que se encuentra sometido a la profundidad del intervalo de inyección. Por otro lado el poder determinar la presión actual de fracturamiento de un estrato en particular nos permite calcular el estado de esfuerzo al que se encuentra sometido ese estrato.

En general la ecuación para calcular el esfuerzo normal total de un plano arbitrario de un medio poroso (intervalo de inyección), ha sido

factible gracias a los trabajos de Hubbert y Willis quienes en 1972 establecieron esta propiedad de los estratos en la siguiente expresión:

$$S = P + \sigma \dots\dots\dots(8) \{F/L^2\}$$

Donde: S = Esfuerzo Total

P = Presión del fluido

$\sigma$  = Esfuerzo normal intergranular ó efectivo

El esfuerzo efectivo es el esfuerzo que permite resistir el fracturamiento hidráulico ó el esfuerzo a lo largo de una falla plana que actua para prevenir el movimiento sobre esa falla. Un análisis exhaustivo de la ecuación (8) nos permite demostrar que si el esfuerzo total permanece constante, un incremento en la presión del fluido incrementara el esfuerzo efectivo, cuando el esfuerzo efectivo es reducido a cero por la continua inyección de fluidos, un fracturamiento hidráulico puede ocurrir. En presencia de una falla, a lo largo de la cual existe un esfuerzo cortante, un movimiento de falla podra ocurrir, antes de que el esfuerzo normal a lo largo de la falla del plano sea reducida a cero.

## 6. Propiedades de los fluidos del subsuelo

Con el fin de poder determinar la compatibilidad e incompatibilidad entre el fluido a inyectar y el estrato de intervalo de inyección así como el fluido contenido en el es necesario conocer las propiedades de los fluidos del subsuelo que a continuación se mencionan en este trabajo.

#### a.- Química

Un criterio correcto para establecer si un efluente residual que se va a inyectar es compatible ó incompatible con el estrato receptor ó de confinamiento y el fluido en el contenido se obtiene por medio de análisis químicos del fluido inicialmente contenido en el estrato y del fluido a inyectar, lo cual se logra obteniendo muestras del agua del subsuelo a través de pozos perforados. En la figura No. 6 se enlistan los análisis químicos que es necesario realizar para tal fin. Adicionalmente cabe mencionar que ciertos estudios geofísicos tales como los registros geohidroeléctricos realizados sobre pozos perforados, permiten también correlacionar la compatibilidad e incompatibilidad entre el fluido a inyectar y el estrato receptor y el fluido en el contenido.

#### b.- Viscosidad

La viscosidad es la capacidad de un fluido para resistir el flujo, y es una propiedad importante que nos permite determinar la velocidad de flujo de un fluido a través de la porosidad promedio de un intervalo de confinamiento. Adicionalmente cabe mencionar que tanto la temperatura como la concentración de sólidos disueltos poseen un efecto significativo sobre el comportamiento del fluido, en virtud de que de todos es sabido que conforme aumenta la temperatura y/o la concentración de sólidos de un fluido, este tiende a incrementar su viscosidad, lo cual se puede lograr al incrementar la profundidad del intervalo de inyección.

ANALISIS COMUNMENTE REALIZADOS SOBRE MUESTRAS DE  
AGUA DEL SUBSUELO PARA DETERMINAR COMPATIBILIDAD

DETERMINACION	ANALISIS DE RUTINA	AGUA DEL INTERVALO DE INYECCION
ALCALINIDAD	X	X
ALUMINIO	X	X
BARIO	X	X
CALCIO	X	X
CLORUROS	X	X
CONDUCTIVIDAD	X	X
pH	X	X
ACIDO SULFHIDRICO	X	X
FIERRO	X	X
MAGNESIO	X	X
MANGANESO	X	X
POTASIO	X	X
SODIO	X	X
GRAVEDAD ESPECIFICA	X	X
SULFATOS	X	X
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	X	X

FIGURA No. 6

### c.- Densidad

La densidad de un fluido se define como el contenido de masa por unidad de volúmen, ó sea:

$$\rho = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (9) \text{ (M/L}^3\text{)}$$

Donde:  $\rho$  = Densidad

M = Masa

V = Volúmen

Como características importantes de la densidad, podemos mencionar las siguientes: La densidad de un fluido se incrementa conforme se incrementa la presión y se disminuye conforme se incrementa la temperatura sin embargo sus efectos no son lo suficientemente significativos como para producir cambios en el intervalo de confinamiento como los originados por el contenido de sólidos.

### d.- Presión

El conocimiento de la presión del fluido en la unidad propuesta para realizar la inyección del efluente es importante. Estas presiones pueden ser determinadas directamente en el pozo a la profundidad adecuada en el intervalo de inyección e indirectamente midiendo el nivel del agua en el pozo y posteriormente calculando la presión de la columna del fluido a la profundidad de interés.

Hanshaw y Zenn (1965) enlistaron las diez posibles causas que pueden

ocasionar presiones anómalas dentro del intervalo de inyección y las cuales son:

1. Alta cabeza hidráulica
2. Rápida carga y compactación de sedimentos
3. Fuerzas tectónicas
4. Efectos de temperatura
5. Fenómenos de membrana osmótica
6. Altas presiones originadas por enterramientos profundos de fósiles.
7. Infiltración de gases
8. Cambios en la fase mineral que involucran agua
9. Solución ó precipitación de minerales
10. Intrusiones magmáticas de agua

#### e.- Compresibilidad

Todos los espacios huecos ó porosos presentes en un estrato que se utiliza para inyección de residuos líquidos están ocupados con anterioridad por el acuífero natural y al inyectar el agua residual, se desplazan y comprimen tanto el acuífero natural como el esqueleto de contención ó acuífuga.

La compresibilidad del agua varía con la temperatura y presión, por cuestiones de seguridad en el diseño de pozos de inyección se deberá considerar un valor comprendido en el rango de:  $2.8 \times 10^{-3}$  a  $3 \times 10^{-6} \text{ PSI}^{-1}$  como un valor razonable para la mayoría de los casos.

## 7. Sistemas de flujo en el subsuelo

Para comprender el efecto de la inyección de aguas residuales en el subsuelo y sus alrededores es necesario conocer los sistemas de flujo locales y regionales del área donde se encuentra localizado el intervalo de inyección. Como consecuencia de los sistemas de flujo imperantes en los intervalos de inyección, existen en el subsuelo condiciones hidrodinámicas, así como niveles estáticos.

La superficie formada por los niveles de agua en pozos perforados sobre acuíferos que están confinados por un acuicludo ó acuitard es una superficie piezométrica ó potenciométrica y se pueden ilustrar con un perfil ó mapa de contorno. El potencial del fluido en un punto determinado de un acuífero fue definido matemáticamente por Hubbert en 1953 como:

$$\phi = gz + \frac{P}{\rho} \dots\dots\dots (10) (L)$$

- Donde:
- $\phi$  = Potencial del fluido
  - $g$  = Constante gravitacional
  - $p$  = Presión del fluido
  - $\rho$  = Densidad del fluido
  - $z$  = Elevación del punto de presión medido con relación a un dato seleccionado (generalmente referido a nivel del mar).

C) PRETRATAMIENTOS REQUERIDOS EN AGUAS RESIDUALES QUE SE ELIMINARAN A TRAVES DE POZOS DE INYECCION.

Una vez que se ha logrado caracterizar geológicamente con exactitud a un intervalo de inyección, las propiedades físicas del estrato receptor, la caracterización de los fluidos contenidos en el, el fluido a inyectar y por lo tanto su compatibilidad e incompatibilidad, sera necesario diseñar el ó los sistemas de pretratamiento requeridos para lograr una compatibilidad del 100% entre el agua residual que se va a inyectar y el intervalo de inyección receptor. (estratos receptores y fluidos nativos contenidos por el intervalo de inyección).

Generalmente todas las aguas residuales que se inyectan poseen materiales suspendidos, sustancias disueltas ó efectos corrosivos por lo que es necesario implementar un sistema que permita eliminar ó reducir al máximo dichas características, lo cual puede originar un mal funcionamiento del pozo. A continuación se enlistan las características ó propiedades principales que es necesario eliminar (a través de tratamientos superficiales) si dicho efluente residual se piensa eliminar a través de un pozo profundo de inyección. Fig. No. 7.

Un análisis concienzudo de dicha figura nos permite concluir que básicamente los sistemas de pretratamiento que generalmente necesitaremos implementar al decidir implementar un pozo profundo de inyección seran:



CARACTERISTICAS QUE ES NECESARIO ELIMINAR O REDUCIR AL MAXIMO EN AGUAS RESIDUALES  
QUE SE VAN A INYECTAR EN POZOS PROFUNDOS DE INYECCION

CARACTERISTICAS

TRATAMIENTO RECOMENDADO

---

1.- Material Suspendido como :

A) Grasas, Aceites y Material flotante.

Separadores Gravitatorios

B) Sólidos en todas sus formas.

Sedimentación

Centrifugación

Filtración por gravedad, por presión, etc.

C) Crecimiento Biológico.

Clorinación

Filtración

2.- Substancias Disueltas

Purgado

A) Gases

Agotamiento

Degasificación al vacío

B) Iones Específicamente aquellos que reaccionan para formar precipitados

Ajuste P H

Neutralización

Precipitación

3.- Corrosividad

Neutralización

Ajuste P H

- a) Sistema de homogenización, en virtud de que un pozo es un sistema que no acepta variaciones bruscas en el flujo ó calidad del efluente líquido a inyectar.
- b) Eliminación de grasas y aceites
- c) Sedimentación
- d) Centrifugación
- e) Filtración
- f) Cloración
- g) Neutralización ó ajuste de pH.

A continuación se presentara una somera descripción de la tecnología y parámetros de diseño de algunos de estos sistemas.

a) Sistemas de homogenización

El objetivo fundamental de los sistemas de homogenización es el controlar ó minimizar las fluctuaciones en las características de las aguas residuales, en virtud de que es necesario alcanzar condiciones óptimas de pretratamiento antes de realizar la inyección. Los tamaños y tipos de los sistemas de homogenización requeridos pueden variar con la cantidad y la variabilidad de la calidad de agua residual que se obtenga en cada proceso. Generalmente un buen criterio para el diseño de sistemas de homogenización para aguas residuales de origen industrial, sera el dimensionar el sistema con tamaño suficiente para absorber las fluctuaciones del efluente residual, que son causadas por las variaciones y/o reciclajes que ocurren en los procesos productivos.

Los propósitos fundamentales de la homogenización para facilidades de tratamiento superficial pueden ser enumerados como sigue:

1. Proporcionar un adecuado abatimiento de las fluctuaciones en el contenido de materia orgánica los cuales pueden ocasionar choques en los sistemas de tratamiento por exceso de carga.
2. Proporcionar un adecuado control del pH para minimizar los requerimientos de reactivos químicos necesarios para lograr la neutralización.
3. Permite minimizar los flujos de emergencia, logrando obtener velocidades de alimentación compatibles con los sistemas de tratamiento.
4. Proporcionar alimentación continua sin cambios físicoquímicos substanciales en los flujos que se alimentan a los sistemas de tratamiento cuando uno ó varios procesos no se encuentran operando.
5. Reducen altas concentraciones de materiales tóxicos en la alimentación de los sistemas de tratamiento.

Generalmente el mezclado es utilizado para establecer una adecuada homogenización de concentración y prevenir la sedimentación de sólidos en el sistema. Los métodos de mezclado que se utilizan para realizar el mezclado son:

- a) Distribución del fluido en la entrada y mamparas.
- b) Mezclado con turbina

- c) Mezclado con aire
- d) Aereación mecánica

De los cuales el mas recomendado para utilizarse es la aereación mecánica por su eficiencia e impacto económico. (de 15 a 20 HP por cada 1,000 gal. de agua residual).

Un sistema de equalización para pretratamiento de aguas residuales que seran dispuestos a traves de pozos profundos de inyección se deberan diseñar considerando un volúmen variable de influente para obtener un volúmen fijo de efluente.

#### METODOS DE DISEÑO

El diseño de un sistema de homogenización requiere la aplicación de principios estadísticos, ya que solo un número discreto de muestras es empleado para las bases de diseño. El diseño de un sistema de este tipo permite conocer el tamaño requerido para mantener concentraciones y volúmenes del efluente en un cierto rango, basandose en la variabilidad del influente y el nivel de confianza que se quiera obtener.

Bajo condiciones de flujo constante en un sistema de homogenización, se ha demostrado que la siguiente relación es valida:

La relación de las variancias del efluente e influente se relacionan con el tiempo de retención como se ilustra a continuación:

$$\frac{S'e}{S'i} = \frac{At}{t} \dots\dots\dots (11) \text{ {Adimensional}}$$

Donde:

$A_t$  = Tiempo de colección para las muestras com-  
puestas (t)

$t$  = Tiempo de retención (t)

$S^2_i$  = Variancia de los parámetros del influente

$S^2_e$  = Variancia de los parámetros del efluente

rearrreglando la ecuación anterior para obtener el tiempo de retención obtenemos:

$$t = \frac{A_t S^2_i}{S^2_e} \dots\dots\dots (12) \text{ (t)}$$

La variancia puede ser definida como el cuadrado de la desviación estandard ó sea:

$$S^2 = \sigma^2 \dots\dots\dots (13) \text{ (Variable)}$$

ó tambien como la sumatoria de los cuadrados de la diferencia entre cada muestra y el valor promedio ó el valor del percentil 50 dividida esta suma por el número de muestras menos una, ó sea:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \dots\dots\dots (14) \text{ (Variable)}$$

Donde:

$X^1$  = Medida individual de un parámetro realizada a una muestra discreta.

$\bar{X}$  = Valor promedio de todas las medidas.

$n$  = Número total de muestras discretas

Después de haber calculado el tiempo de retención se debiera calcular el volúmen del sistema de homogenización con la siguiente ecuación:

$$V = t Q \dots\dots\dots (15) \{L^3\}$$

Donde:

t = Tiempo de retención {t}

Q = Gasto volumétrico  $\{L^3/t\}$

y por último el área requerida en base a la siguiente ecuación:

$$V = L \times A \times h \dots\dots\dots (16) \{L^3\}$$

Donde:

L = Largo {L}

A = Ancho {L}

h = Altura ó profundidad {L}

Aplicando los siguientes criterios para el diseño:

$$L > 2 A \dots\dots\dots (17)$$

substituyendo la ecuación (17) en (16) obtenemos:

$$V = 2 A^2 \times h \dots\dots\dots (18)$$

Los valores de diseño recomendados para la profundidad se otorgan en función del tiempo de retención como se ilustra a continuación:

TIEMPO DE RETENCION	PROFUNDIDAD
(hr)	(ft)
.3	6
6	8
9	10
12	12

TIEMPO DE RETENCION (hr)	PROFUNDIDAD (ft)
15	14
18	16
21	18
24	20

b) Eliminación de grasas y aceites

I. Introducción

Unicamente es motivo de análisis en el presente reporte los principios generales aplicables al diseño de separadores del tipo diferencial gravitatorio, los cuales son ampliamente utilizados para la remoción de grasas y aceites contenidos en las aguas residuales de origen industrial. Su diseño y tamaño depende de las características y cantidad de las grasas y aceites contenidos por el agua residual a ser tratada, siempre que se construye y opera en forma apropiada un separador, este se limita unicamente a la separación y retención de sólidos y líquidos inmiscibles susceptibles a la separación por gravedad. La susceptibilidad de separación (método 734 - 53 API) es utilizada como una guía que determina que porción del influente estará sujeta a la separación por gravedad. Este tipo de separador no retiene sustancias en solución ni es capaz de romper emulsiones estables.

La eficiencia de separación de un separador operado a una velocidad de flujo determinada, dependerá siempre de la temperatura de operación del

fluido, la densidad y tamaño de las partículas esféricas de las grasas y aceites y de la cantidad y características de la materia suspendida presente en el efluente de agua residual. Sin embargo la eficiencia y porcentaje de retención dependen también de las técnicas de operación del separador.

Como resultado de los estudios experimentales realizados en este campo y de la experiencia derivada de la operación de este tipo de separadores, se generó un procedimiento para el diseño de separadores del tipo diferencial gravitatorio. Así mismo cabe mencionar que los parámetros de diseño que a continuación se enumeraran fueron obtenidos en 1948 por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Wisconsin e incluye los efectos que originan los diferentes arreglos de entrada y salida, factibilidad de forma, y los efectos debidos a los accesorios sobre las características hidráulicas de las cámaras de separación.

## II. Principios básicos de diseño

- a) Velocidad terminal de las partículas esféricas de aceite contenidas en las aguas residuales.

Los principios básicos de diseño para la separación gravitatoria diferencial, pueden ser expresados y aplicados matemáticamente cuando una partícula consigue moverse libremente en un fluido y se encuentra sujeta a fuerzas gravitacionales, la velocidad ascendente ó descendente con respecto al fluido, sera una constante cuando la resistencia al movimiento iguala al peso de la partícula en el fluido. En otras palabras la resistencia al movimiento de una partícula en un medio líquido es igual



al peso efectivo de la partícula, cuando la velocidad terminal a sido alcanzada por ejemplo cuando la velocidad causada por la gravedad es cero. La ecuación general que describe esta resistencia fue propuesto por primera vez por Newton en la forma siguiente:

$$D_f = C A \frac{(\rho_w V^2)}{2} \dots\dots\dots (19) \{ML/t^2\}$$

Donde:

- $D_f$  = Resistencia al movimiento de la partícula en el medio líquido.
- $C$  = Coeficiente de Dragg
- $A$  = Area proyectada de la partícula  $\{L^2\}$
- $\rho_w$  = Densidad del medio líquido  $\{M/L^3\}$
- $V$  = Velocidad terminal de la partícula en el medio líquido  $\{L/t\}$

La ecuación para el peso efectivo de la partícula es:

$$W = \frac{(\pi D^3)}{6} (\rho_w - \rho_o) g \dots\dots\dots (20) \{M\}$$

Donde:

- $W$  = Peso efectivo de la partícula en el medio líquido  $\{ML/t\}$
- $D$  = Diámetro de la partícula  $\{L\}$
- $\rho_o$  = Densidad de la partícula  $\{M/L^3\}$
- $g$  = Aceleración debida a la gravedad  $\{M/t^2\}$

igualando las ecuaciones (19) y (20) obtenemos:

$$CA \frac{(\rho_w V^2)}{2} = \frac{(\pi D^3)}{6} (\rho_w - \rho_o) g \dots\dots\dots(21) \{ML/L^2\}$$

considerando solo particulas esféricas, el área sera:

$$A = \frac{(\pi D^2)}{4} \dots\dots\dots (22) \{L\}$$

substituyendo la ecuación (22) en (21) obtendremos la velocidad de ascenso la cual es expresada como sigue:

$$V = \frac{(4 D)}{3} \left( \frac{(\rho_w - \rho_o)g}{c \rho_w} \right) \dots\dots\dots (23) \{L/t\}$$

La ecuación para la resistencia al movimiento de una particula esférica a su velocidad terminal sera:

$$D_f = 3\pi \mu v D \dots\dots\dots (24) \{ML/t^2\}$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad absoluta del agua residual a la temperatura de diseño.

Si igualamos la ec. (20) con (24) podremos obtener una nueva expresión para la velocidad terminal de particulas esféricas de aceite en un medio líquido acorde con la ley de Stokes que sera aplicable a la velocidad de ascenso de las particulas esféricas de aceite en agua, como:

$$V_r = \left( \frac{g}{18\mu} \right) (\rho_w - \rho_o) D^2 \dots\dots\dots (25) \{L/t\}$$

En teoría esta ecuación debería de incluir el coeficiente de deformación, el cual depende siempre de la viscosidad relativa del aceite y

agua residual, sin embargo la práctica ha demostrado que no es necesario incluir.

- b) Tamaño y gravedad de las partículas esféricas de aceite.

La aplicación de la ecuación (25) a partículas esféricas de aceite en aguas residuales ha sido investigada y determinada, tomando como base los resultados experimentales y datos obtenidos en la operación de separadores, por lo que para fines de diseño el diámetro de las partículas de aceite, se considerara de 0.015 cm. sustituyendo este valor en la ecuación (25) obtendremos la expresión para calcular la velocidad de ascenso para tales partículas.

$$V_t = 0.0241 \frac{(S_w - S_o)}{\mu} \dots\dots\dots (26) \text{ (L/t)}$$

Donde:

$V_t$  = Velocidad de ascenso para las partículas esféricas de aceite (con  $D_p = 0.015$  cm.) en aguas residuales.

$S_w$  = Gravedad específica del flujo de aguas residuales a la temperatura de diseño

$S_o$  = Gravedad específica del flujo de aceite residual a la temperatura de diseño.

- c) Criterios básicos de diseño

La ecuación (26) puede ser aplicada para el diseño de cámaras de separación diferenciales gravitatorias de geometría rectangular partículas

$D_p = 0.015$  cm., encontrándose contenidas en aguas residuales y los flujos de estas corrientes son uniformes y están libres de turbulencias.

El diseño de este tipo de cámaras de separación, están basados en tres relaciones, que son:

I. Área horizontal mínima ( $A_h$ ), la cual es expresada matemáticamente como sigue:

$$A_h = F \left( \frac{Q_m}{V_t} \right) \dots\dots\dots (27) \{L^2\}$$

Donde:

$F$  = Factor que permite alcanzar los efectos de turbulencia y corto circuito. (Adimensional)

$Q_m$  = Flujo de agua residual  $\{L^3/t\}$

II. Mínima área de sección transversal vertical ( $A_c$ ) calculada con la siguiente ecuación:

$$A_c = \frac{Q_m}{V_h} \dots\dots\dots (28) \{L^2\}$$

Donde:

$V_h$  = Velocidad horizontal del flujo (rango: no mayor que 15 veces la velocidad de ascenso  $\{V_t\}$  y no mayor que 3 ft/min).

III. Relación de profundidad a ancho mínima de 0.3

$$\frac{d}{B} = 0.3 \dots\dots\dots (29) \{Adimensional\}$$

Donde:

$d$  = Profundidad del agua residual en el separador

$B$  = Ancho de la cámara de separación

Estas tres relaciones mínimas que es necesario considerar en el diseño de las cámaras de separación gravitatorias diferenciales de geometría rectangular, son derivadas y definidas como sigue:

a) Área horizontal mínima de un separador

En un separador ideal (en el cual no existen cortos circuitos, turbulencias y/o remolinos) La remoción de una suspensión dada, es una función de la descarga dividida por el área superficial ó bien: velocidad de sobreflujo, cualquier partícula esférica de aceite cuyo incremento en velocidad es igual ó más grande que la velocidad de sobreflujo, podrá ser removida en un separador ideal, entonces cualquier partícula cuyo incremento en velocidad es igual ó más grande que la profundidad del agua, dividida por el tiempo de retención, podrá alcanzar la superficie, aunque parta desde el fondo de la cámara de separación. Cuando esta velocidad de ascenso ( $V_t$ ) es igual al sobre flujo, esta relación es expresada como:

$$V_t = \frac{d_i}{t_i} = \frac{d_i}{\frac{L_i B_i d_i}{Q_m}} = \frac{Q_m}{L_i B_i} = V_o \dots\dots\dots (30) \{L/t\}$$

Donde:

$d_i$  = Profundidad del agua residual en el separador ideal {L}

$t_i$  = Tiempo de retención en el separador ideal {L}

$B_i$  = Ancho del separador ideal {L}

$V_o$  = Velocidad de sobreflujo {L/t}

La ecuación anterior establece que el área superficial requerida por un separador ideal es igual al flujo de agua residual dividido por el incremento de velocidad de la partícula esférica de aceite e independiente de cualquier profundidad asignada.

Estudios desarrollados y pruebas realizadas sobre separadores experimentales, han demostrado que el Factor F de la ecuación (27) esta basado sobre los efectos de corto circuito y turbulencia y como resultado recomienda el uso de un valor de 1.2 para alcanzar los efectos de turbulencia se ha demostrado que esta se incrementa con la velocidad de remoción deseada y con la relación entre la velocidad horizontal promedio y el incremento de la velocidad de la partícula.

La tabla 2 nos muestra los valores del factor de turbulencia recomendados para varias relaciones de  $V_h/V_t$ .

RELACION $V_h/V_t$	FACTOR DE TURBULENCIA
(Adimensional)	$F_t$
	(Adimensional)
20	1.45
15	1.37
10	1.27
6	1.14
3	1.07

TABLA # 2

El producto del factor de corto circuito y el factor de turbulencia nos proporciona el valor del factor de diseño por el cual el área de un separador ideal deberá ser multiplicado para obtener, el área superficial requerida en un separador real, cabe mencionar que el área horizontal mínima requerida, no se determina directamente, sino que es necesario determinar previamente la profundidad y anchura adecuados y posteriormente determinar la longitud con la siguiente ecuación:

$$L = F \left( \frac{V_h}{V_t} \right) d \dots\dots\dots (31) \{L\}$$

Donde:

L = Longitud de la cámara de separación {L}

Esta ecuación es derivada de la ecuación (31) como sigue:

$$A_h = LB = F \left( \frac{Q_m}{V_t} \right) \dots\dots\dots (32) \{L\}$$

$$L = F \left( \frac{V_h}{V_t} \right) \left( \frac{A_c}{B} \right) = F \left( \frac{V_h}{V_t} \right) \left( \frac{Bd}{B} \right) \dots\dots (32) \{L^2\}$$

$$L = F \left( \frac{V_h}{V_t} \right) d \dots\dots\dots (34) \{L\}$$

b) Área mínima de la sección transversal de un separador

El propósito fundamental de esta especificación es la de limitar la extensión en la cual la turbulencia podrá afectar la operación adecuada de un separador. Dichos efectos de la turbulencia se explican como un incremento en la relación  $V_h/V_t$  estableciéndose un rango de 15 a 1 con un valor para  $V_h$  máximo de 3 ft/min.

C) Relación de profundidad con ancho mínimo de 0.3.

Pruebas realizadas a este tipo de separadores, indican que para cámaras de separación, con la misma área superficial la influencia de la profundidad no es tan marcada sobre la cantidad de aceite removido ó retenido, hasta que la relación de la profundidad y ancho no sea menor que 0.3. En valores de 0.2 para esta relación es notorio un decremento en la remoción cuando se hacen comparaciones con cámaras de separación con altos valores en la relación  $d/B$ , en virtud de lo cual, podemos concluir que no existen objeciones técnicas si el uso de la ecuación recomienda usar relaciones comprendidas en el rango de 0.3 a 0.5 para el diseño de cámaras de separaciones.

Por último podemos concluir, que es recomendable diseñar los separadores con las siguientes limitaciones:

Velocidad horizontal ( $V_h$ )

Limitación  $V_h$  max. =  $3.0 \frac{ft}{min}$  ó  $15 V_t$  (la que sea menor)

Profundidad (d)

Limitación  $3.0 \text{ ft} < d < 8.0 \text{ ft}$ .

Relación profundidad anchura del separador ( $d/B$ )

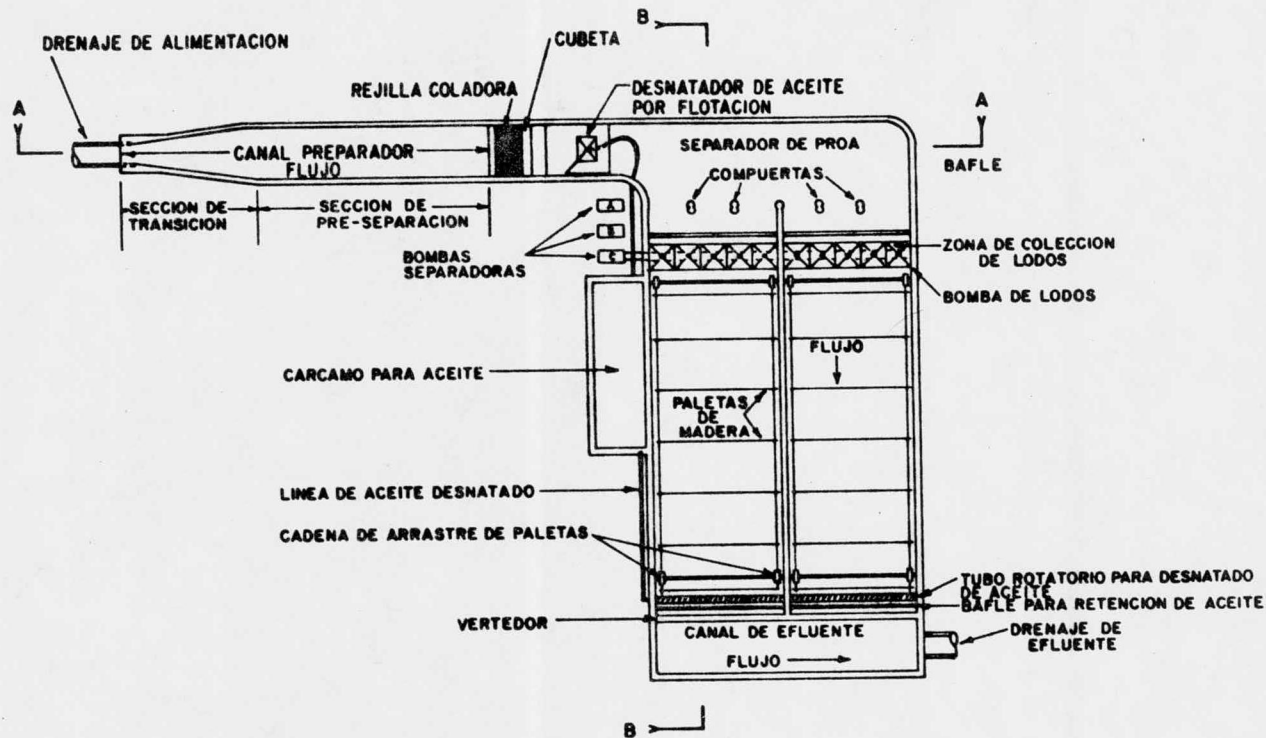
Limitación  $0.3 < d/B < 0.5$

Amplitud (b)

Limitación  $6.0 \text{ ft} < B < 20 \text{ ft}$ .

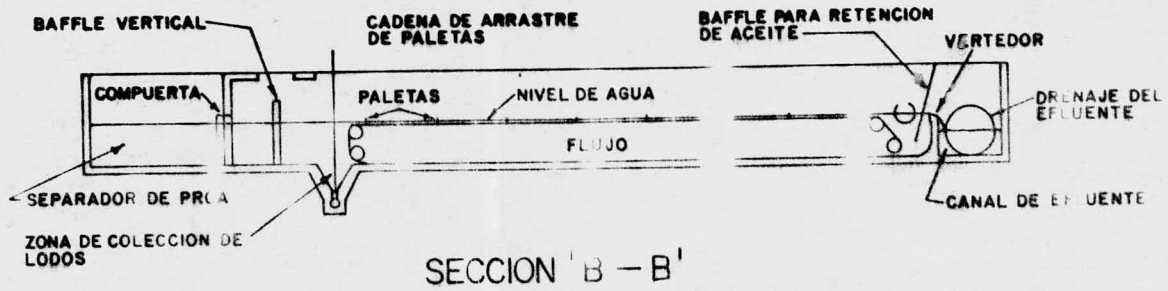
Se anexan las figuras No. 8, 9 y 10 que muestran los arrendos generales para separadores API.





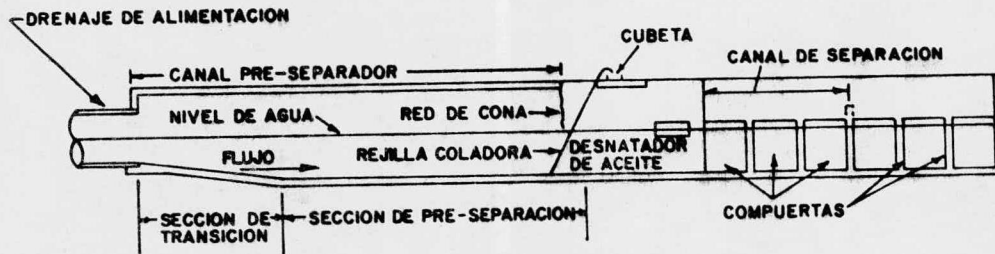
SEPARADOR DE GRASAS Y ACEITES TIPO API (VISTA DE PLANTA)

FIG.8



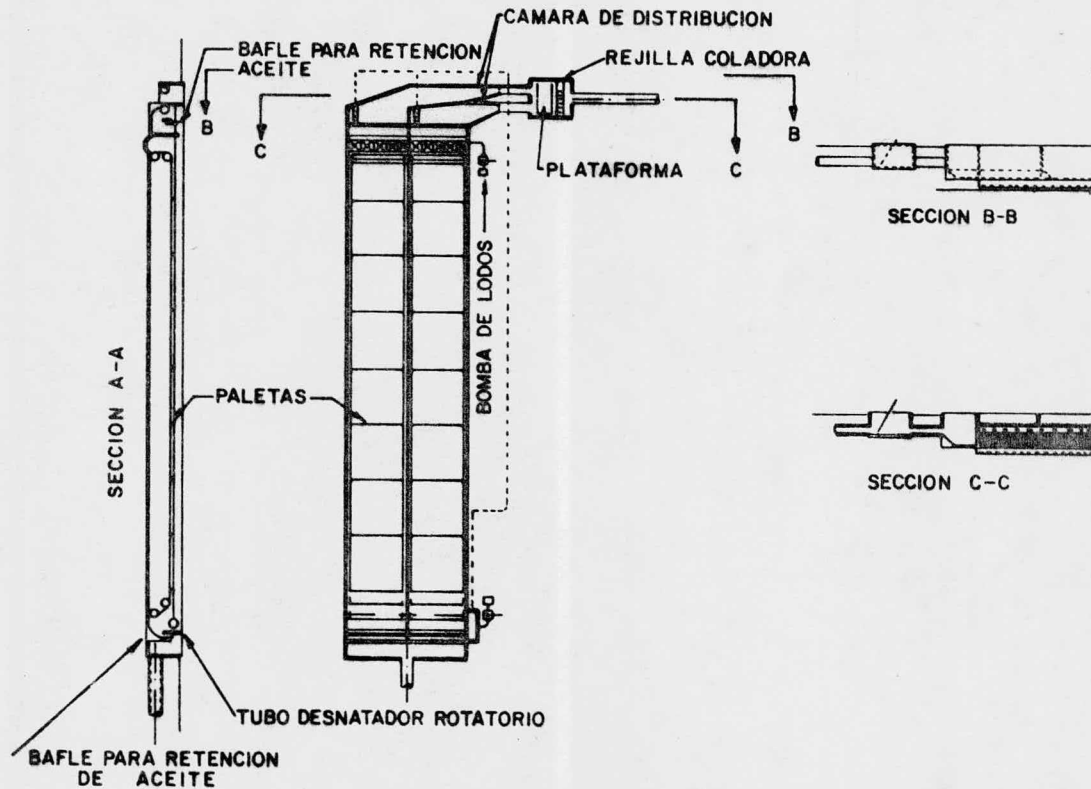
SEPARADOR DE GRASAS Y ACEITES TÍPO API (VISTA DE CORTE)

FIG. 9



SECCION 'A-A'

FIG.9a



ARREGLO GENERAL PARA SEPARADORES API

FIG.10

c) Sedimentación

1. Introducción

La sedimentación es la operación unitaria más utilizada en el tratamiento de aguas residuales, generalmente se utiliza para remover materiales sedimentables contenidos en residuos líquidos ó para remover materiales que se vuelven sedimentables por medio de tratamientos químicos ó biológicos, todos los sistemas de sedimentación tienen dos funciones:

I. Clarificación ó producción de un efluente libre de materia sedimentable.

II. Espesamiento ó producción de un flujo residual que contiene alta concentración de los sólidos removidos ó sedimentables (lodos).

2. Tipos de sedimentación

La velocidad de sedimentación de partículas contenidas en un medio líquido, es posible determinarlas involucrando los siguientes conceptos: peso de las partículas, la fuerza boyante ó flotante y la fuerza de arrastre del fluido que se oponen a la subsistencia de las partículas en el medio líquido.

Esto puede ser expresado en la siguiente ecuación si consideramos que las fuerzas y la velocidad  $V_p$  a la cual las partículas subsisten son:

$$V_p = \frac{4}{3} dg \frac{(S_s - 1)}{C_d} \dots\dots\dots (35) \text{ (L/t)}$$

Donde:

- d = Diámetro efectivo de la partícula {L}
- g = Aceleración debida a la gravedad {L/t}
- Ss = Gravedad específica de las partículas {Adimensional}
- Cd = Coeficiente de Dragg {Adimensional}

El valor para el coeficiente de Dragg, puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{24}{NRe} + \frac{3}{NRe} + 0.34 \dots\dots\dots (36)$$

Donde:

NRe = Número de Reynolds {Adimensional}

El cual a su vez puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$NRe = \frac{d V_p \rho_l}{\mu_l} \dots\dots\dots (37)$$

Donde:

- $\rho_l$  = Densidad del líquido
- $\mu_l$  = Viscosidad del líquido

Como se tiene soluciones de aguas residuales con alta concentración de partículas, las corrientes originan que las partículas coincidan entre si, chocando unas con otras, obteniéndose como resultado que el tiempo de subsistencia de estas partículas en el medio líquido es retardado por las partículas vecinas, bajo estas condiciones de obstrucción a la sedimentación, se ha demostrado (Richardson y Zaki, 1948) que la velocidad de obstrucción a la sedimentación es:

$$V_s = V_p E^{4.65} \dots\dots\dots (38) \{L/t\}$$

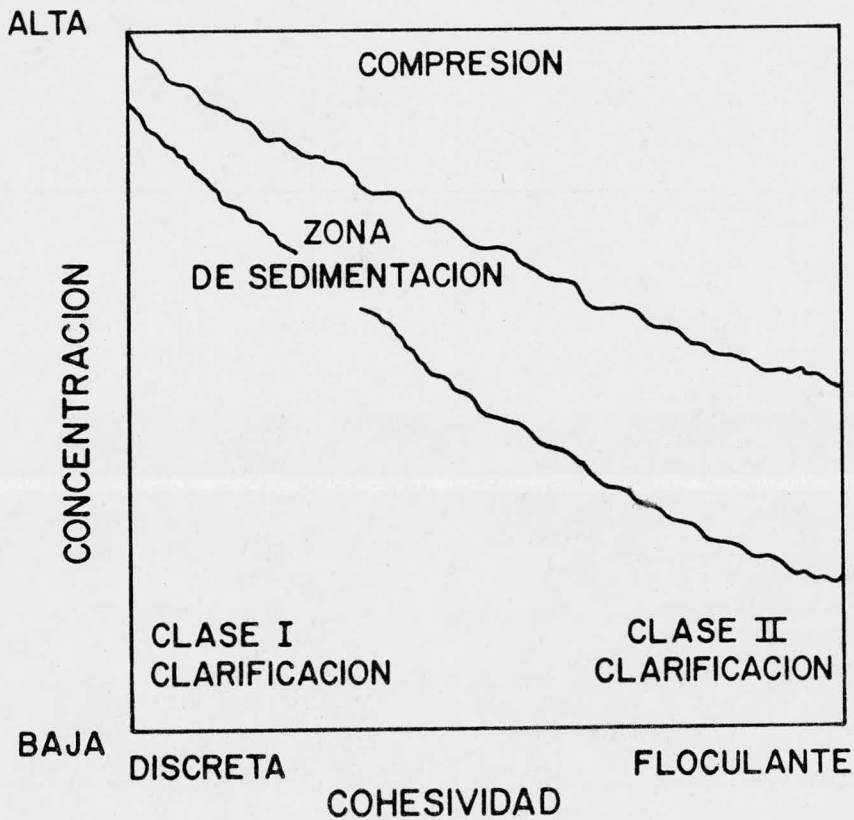
Donde:

$V_s$  = Velocidad de obstrucción a la sedimentación

$E$  = Porosidad en la Suspensión (Adimensional)

Se ha demostrado también que la naturaleza floculante de las partículas, ejerce influencia sobre la sedimentación, de acuerdo al siguiente comportamiento: En virtud de que las partículas floculan en grandes masas, la velocidad de sedimentación se incrementa de acuerdo a la masa floculada esta cantidad dependerá siempre de: concentración de las partículas en el medio líquido, tamaño de las partículas, características de superficie de las partículas, intensidad de mezclado y tiempo. La figura No. 11 muestra los efectos de la floculación y concentración de las partículas. Analizando concienzudamente dicha figura podemos resumir lo siguiente:

- I. Las soluciones diluidas de partículas no floculantes, sedimentan como partículas discretas este tipo de sedimentación se le conoce como clarificación clase I y raras veces se presenta en el tratamiento de aguas residuales.
- II. Las partículas más comunes en el tratamiento de aguas residuales son floculantes, a este tipo de sedimentación se le llama clarificación clase II.
- III. En aguas residuales con alta concentración de partículas la obstrucción a la sedimentación es más pronunciada que la sedimentación de las partículas en posición fija de una a otra. Este tipo de sedimentación está caracterizado por la presencia de una interfase sólido líquida distinta la cual es llamada



TIPOS DE SEDIMENTACION

FIG.11



da zona de sedimentación. Este tipo de sedimentación es de interés cuando se necesita considerar los fenómenos de clarificación y espezamiento de lodos. (se encuentra perfectamente caracterizado por el comportamiento normal para la sedimentación de lodos activados).

- IV. Cuando la concentración de una suspensión es alta, es entonces cuando las partículas están realmente en contacto entre sí, por lo tanto su subsistencia dependerá de la deformación de las partículas ó ruptura de las interligaduras de las partículas. Este tipo de sedimentación compresión es un concepto que se deberá considerar en el espezamiento que se producirá en las fosas de sedimentación.

#### 4. Sedimentación ideal

Los conceptos de sedimentación podrán simplificarse, si se considera una fosa de sedimentación con comportamiento ideal, en la cual todas las condiciones son óptimas para alcanzar la sedimentación una fosa ideal es mostrada en la figura No. 12 y debe de tener las siguientes características:

- I. El flujo y la concentración de las partículas están uniformemente distribuidas a lo largo de la entrada a la fosa.
- II. Todas las partículas que entran a la zona de lodos son removidas.
- III. El flujo está uniformemente distribuido a la entrada de la zona de salida, por lo tanto cualquier partícula que entre a la zona de salida será arrastrada por el efluente y no se-

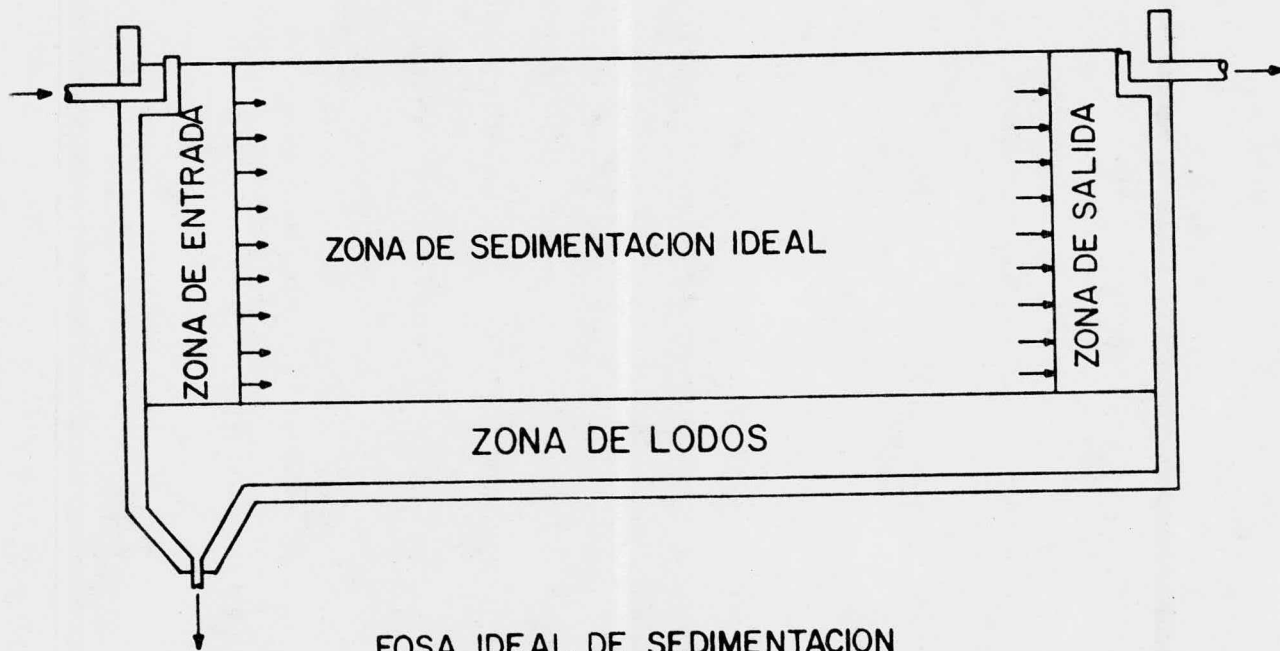
da zona de sedimentación. Este tipo de sedimentación es de interés cuando se necesita considerar los fenómenos de clarificación y espezamiento de lodos. (se encuentra perfectamente caracterizado por el comportamiento normal para la sedimentación de lodos activados).

- IV. Cuando la concentración de una suspensión es alta, es entonces cuando las partículas están realmente en contacto entre sí, por lo tanto su subsistencia dependerá de la deformación de las partículas ó ruptura de las interligaduras de las partículas. Este tipo de sedimentación comprensión es un concepto que se producirá en las fosas de sedimentación:

### 3. Sedimentación ideal

Los conceptos de sedimentación podrán simplificarse, si se considera una fosa de sedimentación con comportamiento ideal, en la cual todas las condiciones son óptimas para alcanzar la sedimentación una fosa ideal es mostrada en la Figura No. 12 y debe de tener las siguientes características:

- I. El flujo y la concentración de las partículas están uniformemente distribuidas a lo largo de la entrada a la fosa.
- II. Todas las partículas que entran a la zona de lodos son removidas.
- III. El flujo está uniformemente distribuido a la entrada de la zona de salida, por lo tanto cualquier partícula que entre a la zona de salida será arrastrada por el efluente y no se



FOSA IDEAL DE SEDIMENTACION

FIG.12

ra removido en la fosa:

IV. En las zonas restantes no existen gradientes de velocidad.

3. Remoción completa de fosas ideales de sedimentación

La figura No. 13 muestra la trayectoria de una ligera sedimentación, la cual es completamente removida en una fosa ideal de sedimentación. Las partículas se mueven horizontalmente a la misma velocidad como el flujo a través de la fosa, ó sea:

$$V_h = \frac{Q}{h_0 W} \dots\dots\dots (39) \text{ (L/t)}$$

Donde:

Q = Velocidad de flujo a través de la fosa {L<sup>3</sup>/t}

W = Anchura de la fosa {L}

h<sub>0</sub> = Profundidad de la fosa de sedimentación {L}

Analizando dicha figura podemos establecer que la velocidad descendente de una partícula que es completamente removida, es V<sub>o</sub>, ó sea si igualamos por triángulos similares obtendremos:

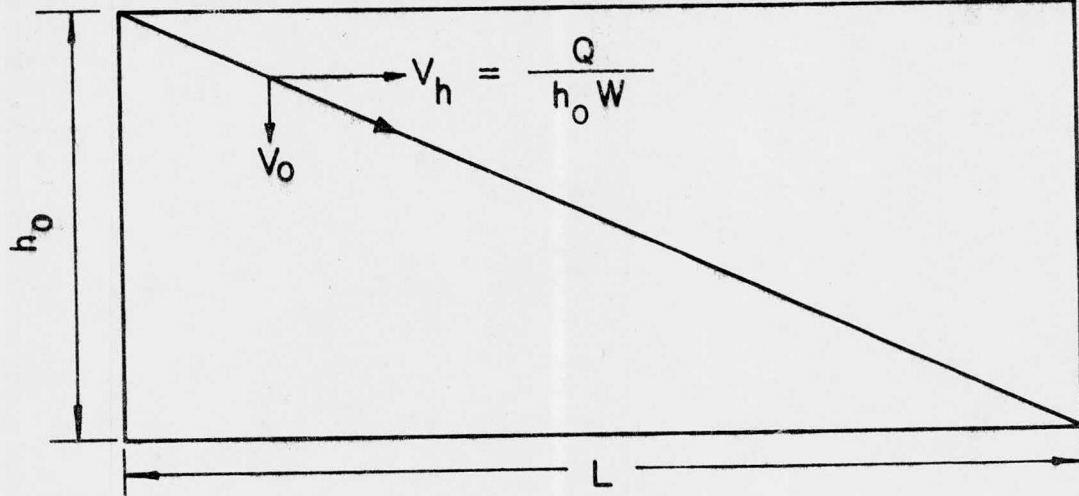
$$\frac{V_o}{V_h} = \frac{h_0}{L} \dots\dots\dots (40)$$

Despejando a V<sub>o</sub> tenemos

$$V_o = \frac{h_0 U_h}{L} \dots\dots\dots (41)$$

Substituyendo la ecuación (39) en la (41) obtendremos:

$$V_o = \frac{Q}{WL} \dots\dots\dots (42)$$



$$\frac{v_o}{v_h} = \frac{h_0}{L}$$

$$v_o = \frac{v_h h_0}{L} = \frac{Q}{WL} = \frac{Q}{A} = \text{VELOCIDAD DE SOBREFLUJO}$$

REMOCION COMPLETA EN FOSAS IDEALES DE SEDIMENTACION

FIG.13

$$V_o = \frac{Q}{A_c} \dots\dots\dots (43)$$

De donde podemos concluir que la carga hidráulica sobre una fosa de sedimentación por unidad de área de superficie  $Q/A$ , es equivalente a la velocidad de sedimentación de las partículas más pequeñas que son removidas, este parámetro es conocido como: Velocidad de sobreflujo, velocidad de sedimentación superficial ó carga superficial y es el pa rámetro fundamental para el diseño de clarificadores.

4. Remoción fraccionada en fosas de sedimentación

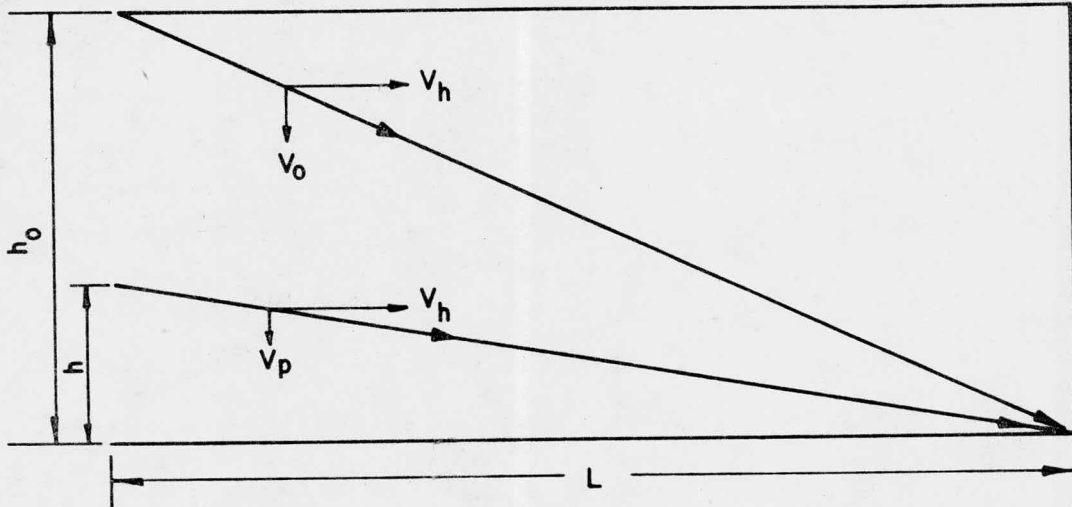
Del análisis anterior, también podemos establecer que todas las partículas que sedimentan con una velocidad igual ó mayor que  $V_o$ , podran ser removidas completamente en fosas de sedimentación ideales ó sea:

$$V_o = \frac{Q}{A_c} \dots\dots\dots (44) \text{ (L/t)}$$

Sin embargo como se ilustra en la figura No. 14, algunas partículas tardán más en sedimentar, sin embargo también podran ser removidas, la frac ción  $F$  de partículas cuya velocidad de sedimentación  $V_p$  es menor que  $V_o$  y que pueden ser removidas son:

$$F = \frac{h}{h_o} = \frac{V_{pt}}{V_o t} = \frac{V_p}{V_o} \dots\dots\dots (45) \text{ (Adimensional)}$$

Esto es si  $X_o$  representa la fracción de partículas en suspensión, las cuales sedimentan con una velocidad igual ó mayor a  $V_o$ , la remo ción to



$$\text{FRACCION REMOVIDA} = \frac{h}{h_0} = \frac{V_p t}{V_0 t} = \frac{V_p}{V_0} = \frac{V_p}{Q/A}$$

FRACCION DE REMOCION EN FOSAS DE SEDIMENTACION IDEALES

FIG.14

tal R en una fosa de sedimentación sera:

$$R = (1 - X_0) + \int_0^{X_0} \frac{V_s}{V_0} dx \dots\dots\dots (46) \text{ (Adimensional)}$$

El segundo término de la ecuación (46) representa la fracción de remoción parcial de partículas con velocidad de sedimentación lenta.

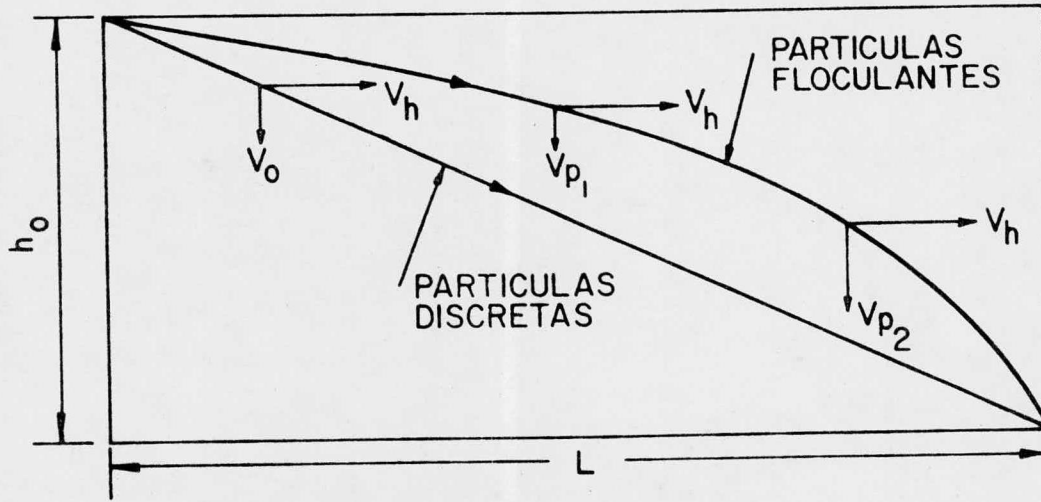
La figura No. 15 ilustra el comportamiento de las partículas floculantes en una fosa de sedimentación ideal, debido a que la aglomeración ocurre con el tiempo por lo tanto la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa conforme pasan a través de la fosa.

#### 5. Efecto de la profundidad en fosas de sedimentación

Las partículas discretas son removidas de un efluente residual en una fosa de sedimentación, si estas sedimentan a una velocidad mayor a Q/A su remoción no estará relacionada con la profundidad ó tiempo de retención, esta independencia de la profundidad es claramente ilustrada en la figura No. 16, en la figura (a) podemos ver que las partículas que sedimentan con una velocidad  $V_0$  son completamente removidas en la fosa con profundidad  $h_0$  y en la figura (b) la profundidad de la fosa ha sido reducida a la mitad y sin embargo las partículas son así mismo removidas.

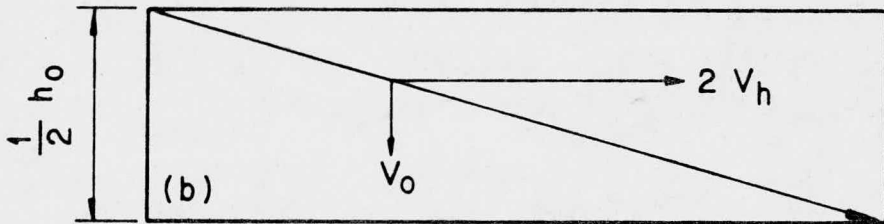
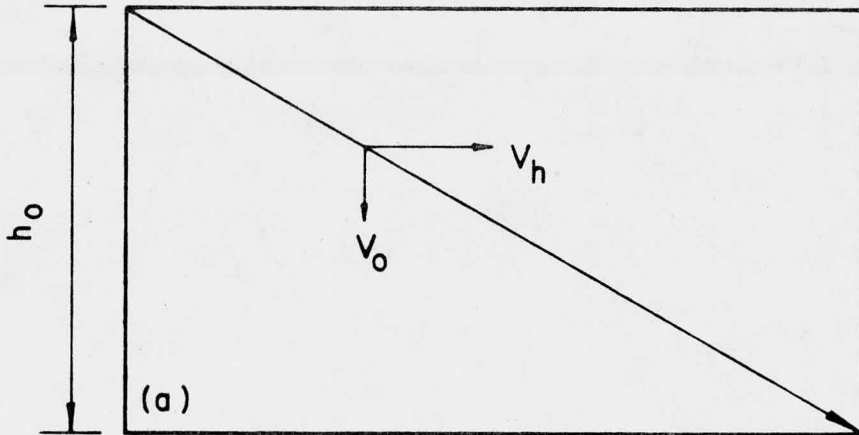
La figura No. 17 ilustra que con partículas floculantes, la profundidad sera significativa, cuando la profundidad de una fosa fue reducida la eficiencia de remoción de la fosa para partículas floculantes fue así mismo reducida, esto es debido a que las partículas estaran en la fosa un tiempo menor al requerido para aglomerarse en la cantidad requerida para





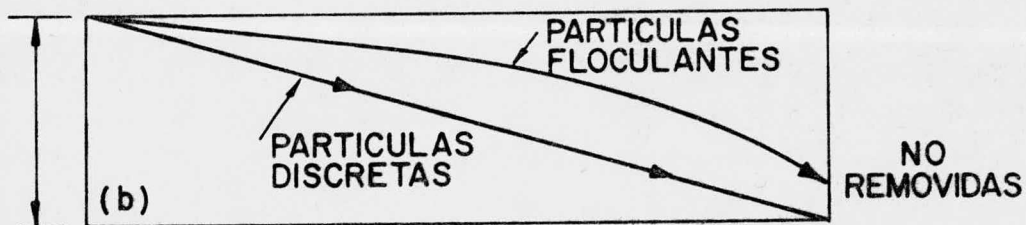
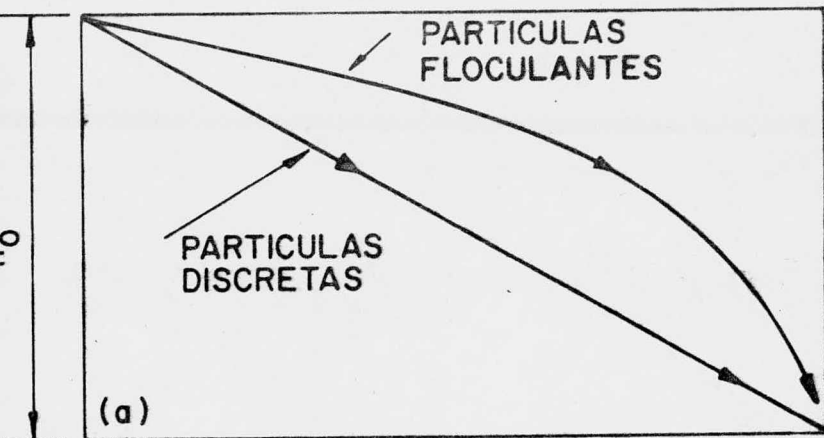
COMPORTAMIENTO DE PARTICULAS FLOCULANTES EN FOSAS DE SEDIMENTACION IDEALES

FIG.15



EFFECTO DE LA PROFUNDIDAD SOBRE LA REMOCION DE PARTICULAS

FIG.16



EFFECTO DE LA PROFUNDIDAD SOBRE LA REMOCION DE PARTICULAS FLOCULANTES

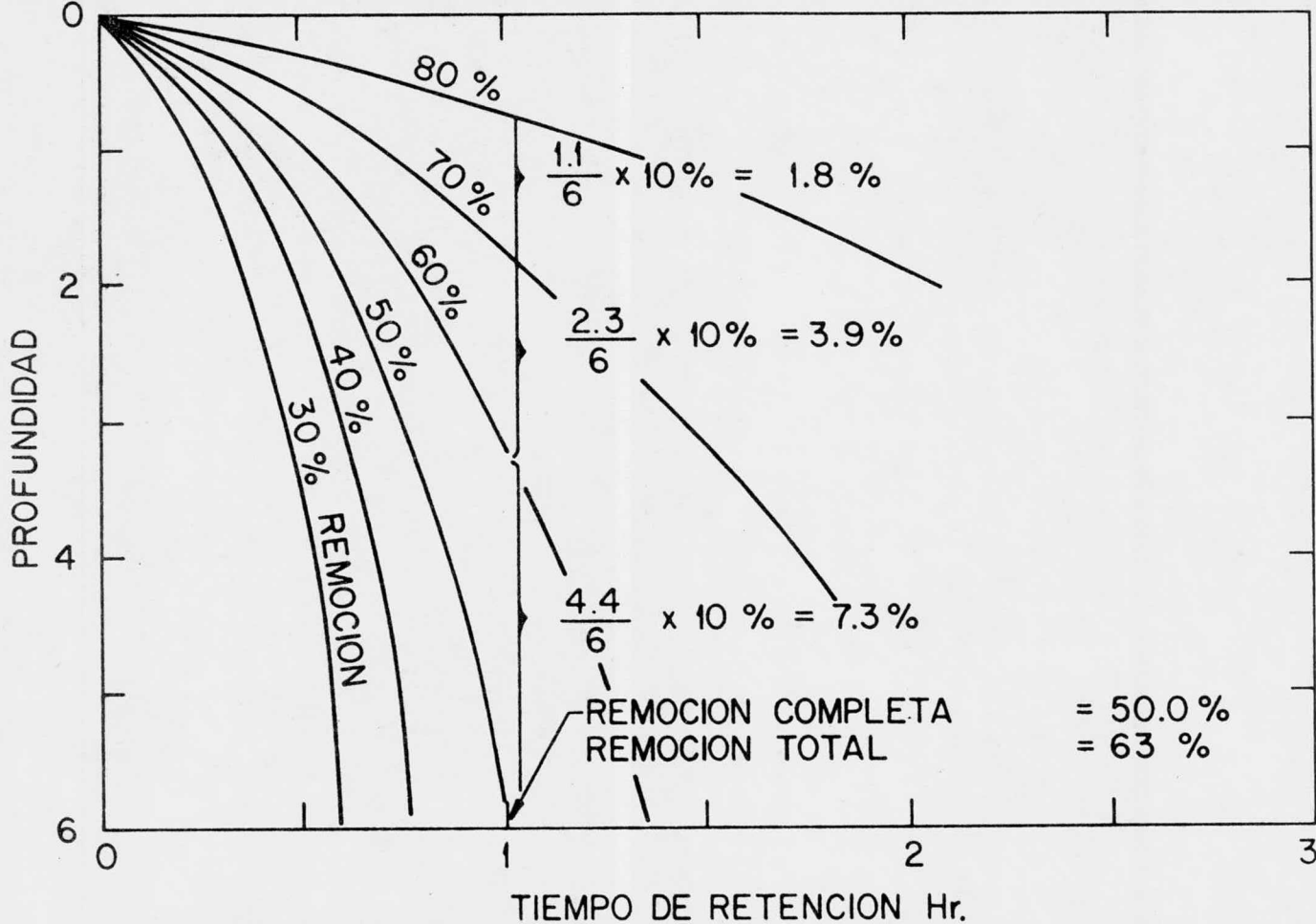
FIG.17

alcanzar la velocidad de sedimentación y ser completamente removidas.

Concluyendo podemos mencionar que en fosas de sedimentación el área superficial unicamente determina la capacidad de una fosa de sedimentación receptora de partículas discretas y que el tiempo de retención sera significativo cuando partículas floculantes esten involucradas y así mismo si el tiempo de retención es reducido por una reducción en la profundidad de la fosa, este efecto es compensado por el incremento en el número de colisiones por unidad de tiempo, causado por el efecto de mezclado turbulento que se logra por la profundidad en la fosa.

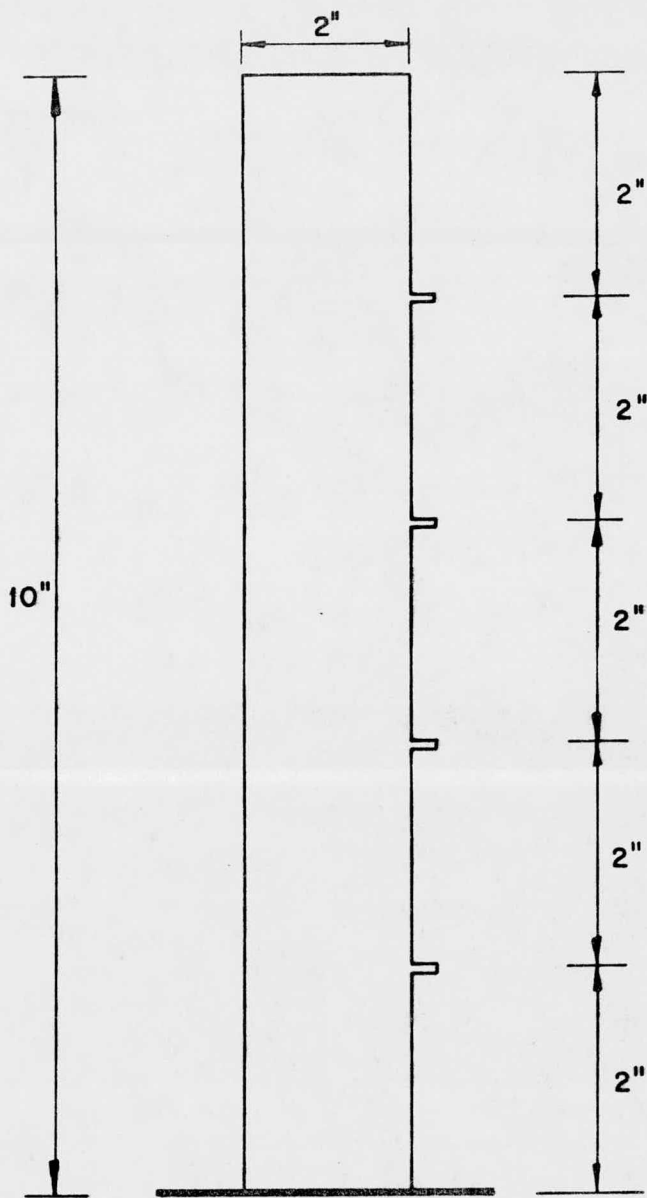
#### 6. Principios básicos de diseño para fosas de sedimentación

- I. Sera necesario determinar el tiempo de retención que nos permita alcanzar la concentración de sólidos requerida, en la columna de sedimentación experimental que se ilustra en la figura No. 19. (la cual fue diseñada para Eckenfelder y Oconors en 1958). Su operación consiste en llenar la columna con agua residual y agitar vigorosamente, posteriormente se tomaran muestras de un litro a diferentes tiempos y profundidades.
- II. Determinar el contenido de sólidos sedimentables en cada muestra utilizando la norma oficial mexicana DGN-AA-4-1973 "Determinación Sólidos Sedimentables en Aguas Residuales".
- III. Calcular el % de remoción con el uso de la siguiente ecuación, graficando de acuerdo a la figura No. 18.



TECNICA PARA ESTIMAR LA REMOCION TOTAL DE PARTICULAS FLOCULANTES EN FOSAS DE SEDIMENTACION

FIG.18



COLUMNA EXPERIMENTAL DE SEDIMENTACION

FIG.19

$$\% \text{ Remoción} = \frac{X_{t=0} - X_{t=x^1y}}{X_{t=0}} \times 100 \dots\dots\dots (47) \text{ \{Adimensional\}}$$

Donde:

$X_{t=0}$  = Concentración de sólidos sedimentables en la muestra en el tiempo 0.

$X_{t=x^1y}$  = Concentración de sólidos sedimentables en la muestra a la altura y tiempo X

IV. Con el gasto medio actual del agua residual a ser tratada, calcular: Q al 11%, Q al 25% (Q pa ó sea gasto Pico actual) y el Qpa al 15%. (Donde Qpa = Q al 25%).

V. Seleccionar una profundidad que cumpla con el % de remoción deseado y tiempo de retención, en base al siguiente criterio:

PROFUNDIDAD (ft)	DESCRIPCION
6	Profundidad baja
7	Profundidad baja
8	Profundidad media
9	Profundidad media
10	Profundidad alta

VI. Suponer un tiempo de retención en base al siguiente criterio

TIEMPO DE RETENCION (hr)	DESCRIPCION
0.5	Tiempo de retención bajo
1.0	Tiempo de retención bajo
1.5	Tiempo de retención medio

TIEMPO DE RETENCION (hr)	DESCRIPCION
2.0	Tiempo de retención medio
2.5	Tiempo de retención medio
3.0	Tiempo de retención medio
3.5	Tiempo de retención medio
4.0	Tiempo de retención medio
4.5	Tiempo de retención medio
5.0	Tiempo de retención medio
5.5	Tiempo de retención alto
6.0	Tiempo de retención alto

VII. Calcular un sobre flujo (overflow) de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\frac{h}{t} K = \frac{Q}{A} = \text{sobre flujo} \dots\dots\dots (48) \{L^3/t/L^2\}$$

Donde:

- h = Profundidad {L}
- t = Tiempo de retención {t}
- k = Constante Adimensional {588.9934}
- Q = Gasto {L<sup>3</sup>/t}
- A = Area {L<sup>2</sup>}

VIII. Calcular el volumen de la fosa con la siguiente ecuación:

$$V = A \times h \dots\dots\dots (49) \{L^3\}$$



Donde:

V = Volúmen {L<sup>3</sup>}

A = Area {L<sup>2</sup>}

h = Profundidad {L }

IX. Calcular el largo y ancho de la fosa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L = 4a \dots\dots\dots (50) \{L\}$$

Donde:

L = Largo de la fosa {L}

a = Ancho de la fosa {L}

Sustituyendo la relación (50) en la expresión del Area:

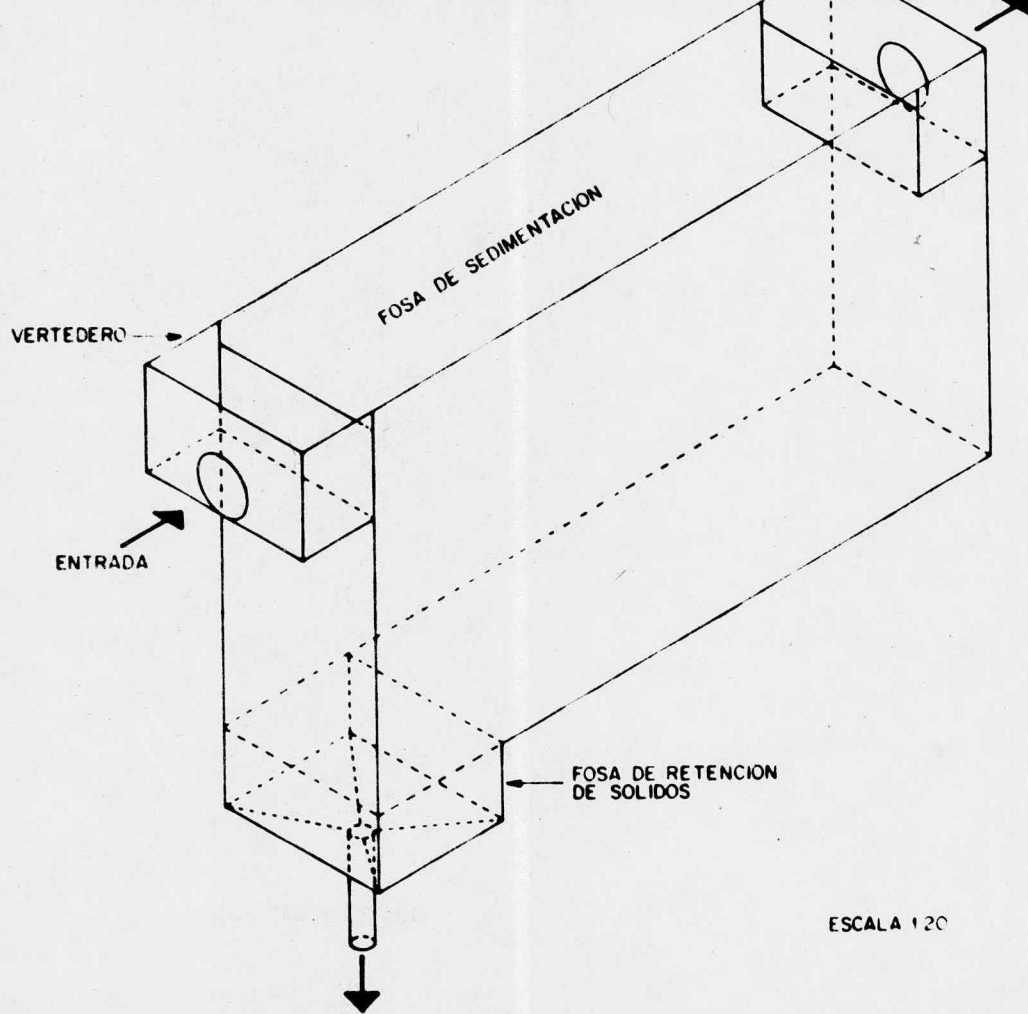
$$A = L \times a = 4a \times a = 4a^2 \dots\dots\dots (51) \{L\}$$

$$a = \sqrt{\frac{A}{4}} \dots\dots\dots (52) \{L\}$$

X. Dimensionar los vertederos (Entrada y Salida)

XI. Dimensionar fosa de retención de lodos.

Se adjunta la figura No. 20 para ilustrar los detalles típicos de diseño y construcción de fosas de sedimentación.



d) Filtración

La filtración es una de las aplicaciones más conocidas del flujo de fluidos a través de lechos empacados, la operación consiste en la separación de sólidos contenidos en un fluido, forzando a pasar al fluido a través de una membrana porosa, en donde se retienen las partículas sólidas contenidas en el fluido formando una capa sobre la membrana. Si las aguas residuales conteniendo sólidos suspendidos son pasados a través de una capa de porosidad promedio, parte de esta materia coloidal suspendida será parcialmente removida, cambiando las características físicas y químicas de las aguas residuales.

La eficiencia y costo de la filtración es una función que depende de:

- a. La concentración y características físicoquímicas de los sólidos en suspensión.
- b. Características físicoquímicas del fluido.
- c. Las características del medio filtrante y otras ayudas.
- d. El método de filtración seleccionado.
- e. Valores absolutos y relativos del influente y efluente
- f. Gastos relativos a: inversión, mano de obra, energía y tiempo.

Los principales tipos de filtros utilizados en el tratamiento de aguas residuales son:

I. Filtración en membranas granulares.

- II. Filtración a vacío
- III. Filtración a presión
- IV. Filtración con procesos de micro floculación.

I. Filtración en membranas granulares.

Los filtros de membranas granulares más ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales son: los filtros de arena, sílice, antracita ó de tierras diatomáceas, los cuales consisten en lechos de piedra, arena, sílice, antracita o tierras diatomáceas colocadas como barreras al flujo.

La filtración en medios (membranas) granulares es ampliamente utilizado para la remoción de materia suspendida, lo cual se logra pasando las aguas residuales a través de un lecho de materia granular a una velocidad de flujo controlada. Este proceso de remoción es bastante complejo ya que involucra diferentes mecanismos, los cuales pueden ser: tamizado, interceptación impactación, sedimentación y adsorción, el efecto de cada mecanismo de remoción depende siempre de las propiedades ffsicoquímicas de el medio granular, las partículas suspendidas y el flujo de acarreo.

Este tipo de filtración es una operación que involucra dos fases que son: la filtración y el retrolavado del medio granular, el final de la operación de filtración sera indicada al alcanzar la caída de presión límite a través del lecho ó medio filtrante ó por la presencia de sólidos en el efluente del filtro, en condiciones ideales estos eventos sucederan en

forma simultanea:

Los filtros de medios ó membranas granulares pueden ser clasificados como sigue:

- a. Tipos de medios filtrantes (simples ó multimedias)
- b. Dirección del flujo (descendente ó ascendente)
- c. Variación de tiempo de la Vel. de flujo (constante ó declinante)
- d. Presión de operación (gravedad ó presurizado).

-Velocidad de remoción de sólidos suspendidos:

La ecuación más aceptada para expresar esta velocidad de remoción es:

$$\frac{dc}{dT} = -\lambda c \dots\dots\dots (53) \{M/L^2\}$$

Donde:

C = Concentración de los sólidos suspendidos en el líquido (M/L<sup>3</sup>)

l = Distancia de la superficie del filtro (L)

$\lambda$  = Coeficiente del filtro ó modulo de impedimento (L<sup>-1</sup>)

El coeficiente depende de las propiedades del medio granular y la suspensión, la velocidad de flujo y el preacondicionamiento químico de la suspensión. En la mayoría de los casos el medio filtrante tendrá tamaño graduado y la suspensión tendrá una distribución de tamaño de partícula no uniforme. Sin embargo la filtración prosigue, las

capas porosas del filtro seran progresivamente obstruidas y cada capa del filtro estara expuesta a una suspencion de diferentes propiedades, obteniendose como resultado que en la operacion de filtracion no se establecen condiciones de regimen permanente.

En la practica ha sido posible demostrar que las particulas suspendidas retenidas en un medio filtrante tendran una distribucion de tamaño no uniforme, esto es aquellas particulas más grandes ó más susceptibles a la filtracion seran removidas en las capas superiores del filtro mientras que las particulas remanentes penetraran al lecho, siendo por lo tanto su remocion cada vez más difícil. La experiencia ha demostrado que este fenomeno puede ser expresado matematicamente como se establece en la ecuacion (54) la cual se conoce como: coeficiente decreciente de filtros no obstruidos de medio granular uniforme:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{(1 + aI)^n} \dots\dots\dots (54) \{L^{-1}\}$$

Donde:

- $\lambda_0$  = Modulo de impedimento inicial  $\{L^{-1}\}$
- $a$  = Constante determinada experimentalmente  $\{L^{-1}\}$
- $n$  = Constante determinada experimental  $\{\text{Adimensional}\}$

Para un filtro con obstruccion parcial, el decremento en el coeficiente del filtro puede ser aproximado por el factor

$$\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^m \dots\dots\dots (55) \{\text{Adimensional}\}$$

Donde:

Donde:

$\delta$  = Masa específica depositada  $\{M/L^3\}$

$\delta_u$  = Masa específica depositada al final  $\{M/L^3\}$

$m$  = Constante adimensional

La velocidad es dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{(1 + a_1)^n} (1 - \frac{\delta}{\delta_u})^m \lambda_0 C \dots\dots (56) \{M/L^2\}$$

En el inicio de la filtración, la masa específica depositada ~~sera~~ igual a cero y la velocidad de remoción, sera:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{(1 - a_1)^n} \lambda_0 C \dots\dots\dots (57) \{M/L^2\}$$

#### Relaciones de pérdida de columna

La velocidad de pérdida de columna en un filtro parcialmente obstruido, puede ser expresada por una ecuación de la forma:

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{dh}{dt}\right)_0 + f(\delta) \dots\dots\dots (58) \{Adimensional\}$$

Donde:

$\frac{dh}{dt}$  = Velocidad de pérdida de columna en un filtro parcialmente obstruido.

$\left(\frac{dh}{dt}\right)_0$  = Velocidad de pérdida de columna en un filtro limpio

$f(\delta)$  = Alguna función de la masa específica depositada.

La pérdida de columna total a través de un filtro con un lecho de profundidad L puede ser obtenida integrando la ecuación (58) entre los límites de 0 y L, ó sea:

$$H = H_0 + \int_0^L f(\delta) dl \dots\dots\dots (59) \{ft\}$$

Donde:

H = Pérdida total de columna en un filtro parcialmente obstruido.

H<sub>0</sub> = Pérdida total de columna en un filtro limpio

L = Profundidad total del lecho del filtro.

La experiencia ha demostrado que la función  $F(\delta) dl$  puede ser expresada en forma satisfactoria por la siguiente ecuación:

$$\int_0^L F(\delta) dl = a (\delta_t)^b \dots\dots\dots (60) \{M/L^2\}$$

Donde:

$\delta_t$  = Masa total depositada  $\{M/L^2\}$

a, b = Constantes numéricas

En virtud de lo cual podemos establecer que las pérdidas totales de columna debidas a la obstrucción serán expresadas en forma satisfactoria por la siguiente relación:

$$H - H_0 = a (\delta_t)^b \dots\dots\dots (61) \{L\}$$



## Consideraciones de retrolavado

Para remover el material acumulado en el lecho del filtro, el filtro es retrolavado pasando a través de el agua limpia a una velocidad tal que debiera causar la fluidización y algún grado de expansión. El grado de expansión esta relacionado a la porosidad del lecho expandido, por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{L_e - L}{L} = \frac{P_e - P}{1 - P_e} \dots\dots\dots (62) \{ \%$$

Donde:

- E = Grado de expansión
- L = Profundidad del lecho sin expandir {L}
- ▲ L<sub>e</sub> = Profundidad del lecho expandido {L}
- P = Porosidad del lecho sin expandir {L<sup>3</sup>}
- P<sub>e</sub> = Porosidad del lecho expandido {L<sup>3</sup>}

La porosidad del lecho expandido es una función del incremento de la velocidad de retrolavado, ó sea:

$$\frac{P_e^3}{1 - P_e} = \frac{\beta P_v}{g (P_g - P)} \left( \frac{q_w}{d^2} \right) \dots\dots\dots (63)$$

Donde:

- P = Densidad del agua {M/L<sup>3</sup>}
- P<sub>g</sub> = Densidad de los granos del medio filtrante {M/L<sup>3</sup>}
- v = Viscosidad cinemática del agua {L<sup>2</sup>/t}
- q<sub>w</sub> = Incremento en la velocidad de retrolavado {L/t}

- d = Tamaño promedio de los granos del filtro {L}
- g = Aceleración debida a la gravedad {L/t<sup>2</sup>}
- β = Factor adimensional que es una función que depende siempre de la porosidad y forma del grano del medio filtrante.

para un medio filtrante de forma dada y asignado un valor constante para β sobre el rango de porosidad conocidas en base a la experiencia, la ecuación (63) puede ser rearmada a la siguiente relación:

$$E = F + \frac{B \rho_v}{g (\rho_g - \rho)} \frac{(q_w)}{d^2} \dots\dots\dots (64) \{ \%$$

Donde:

F y B = Constantes dimensionales

La práctica y experiencia ha demostrado que un rango confiable para grados de expansión es el comprendido entre el 20 y 50%.

En virtud de que el parámetro F es solo afectado ligeramente por las propiedades físicas del medio filtrante, la ecuación (64) puede ser usada para calcular la relación de tamaño de granos requeridos para producir el mismo grado de expansión en varias capas de un filtro dual ó multiple, esto es, para filtros duales de relación requerida sera:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{(\rho^2 - \rho)}{\rho_1 - \rho^2}^{1/2} \dots\dots\dots (65) \{ \text{Adimensional} \}$$

Donde:

$d_1$  y  $d_2$  = Tamaño de los medios filtrantes 1 y 2 {L}

$\rho, \rho_1, \rho_2$  = Densidad del agua y medios filtrantes 1 y 2

### Procedimiento de diseño

I. Seleccionar los siguientes parámetros de diseño basandose en los requerimientos de funcionamiento, investigaciones experimentales:

- Modo de operación
- Medio filtrante (tamaño y tipo)
- Ayudas químicas (tipo y dosis)
- Velocidad de carga hidráulica
- Perdidas de columna
- Expansión requerida durante el retrolavado.

II. Calcular el área de filtración requerida con la siguiente ecuación:

$$A = 694 \frac{Q}{Q_a} \dots\dots\dots (66) \{L^2\}$$

Donde:

A = Area total de filtración {L<sup>2</sup>}

Q = Velocidad del flujo de diseño {L<sup>3</sup>/t}

Q<sub>a</sub> = Velocidad de carga hidráulica {L<sup>2</sup>/t/L}

III. Calcular la longitud del filtro

El máximo incremento de pérdidas de columna  $H - H_0$  será calculado al seleccionar las pérdidas de columna terminal  $H$  y el valor experimental de  $H_0$ . Los sólidos depositados correspondientes a este incremento en la pérdida de columna se determinará con el uso de la Figura No. 21

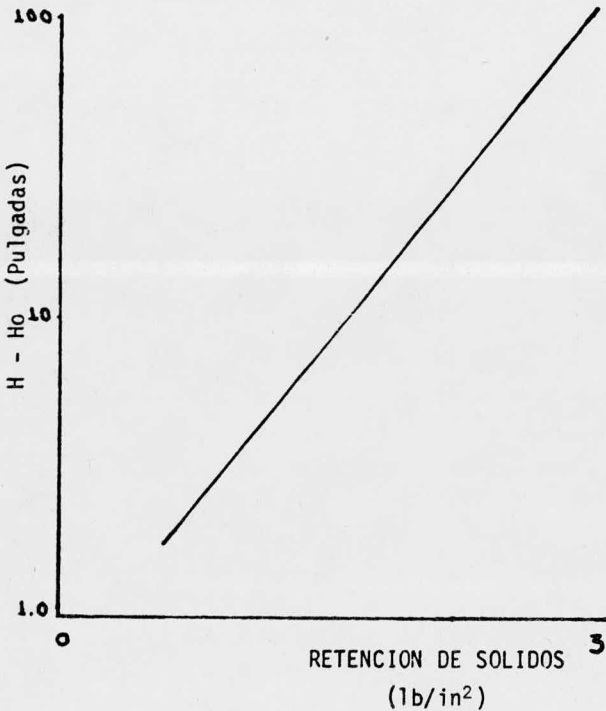


FIGURA No. 21

Los sólidos totales depositados en el filtro al termino de una corrida sera:

$$S = A \delta t \dots\dots\dots (67) \{M\}$$

Donde:

S = Sólidos totales depositados en el filtro

La velocidad de acumulación de sólidos en el lecho del filtro sera calculada con la siguiente ecuación:

$$\frac{ds}{dt} = 0.35 Q (C_o - C) \dots\dots\dots (68) \{M/t\}$$

Donde:

$\frac{ds}{dt}$  = Velocidad de acumulación de sólidos

Q = Velocidad de flujo  $\{L^3/t\}$

C<sub>o</sub> = Concentración de sólidos suspendidos en el influente  
 $\{M/L^3\}$

C = Concentración de sólidos suspendidos en el efluente  
 $\{M/L^3\}$

El tiempo de filtración sera calculado con:

$$T = \frac{S}{ds/dt} \dots\dots\dots (69) \{hr\}$$

Donde:

T = Tiempo de filtración.

IV. Calcular los requerimientos de retrolavado.

Utilizando la correlación de la Figura No.22 la velocidad requerida para el retrolavado sera determinada utilizando la expansión del lecho seleccionado. La velocidad para el flujo sera entonces calculada usando la siguiente ecuación:

$$Q_w = 449 q_w A \dots\dots\dots (70) \{L^3/t\}$$

Donde:

$Q_w$  = Velocidad de flujo del retrolavado

El porcentaje de agua residual tratada requerida para usarse en el retrolavado sera:

$$p = 0.0024 \frac{Q_w T_w}{Q T} \dots\dots\dots (71) \{\%\}$$

Donde:

$T_w$  = Duración del retrolavado {t}

$P$  = Fracción de agua residual usada en el retrolavado.

Como criterio general se puede establecer que si el retrolavado excede del 5%, el área del filtro debera incrementarse proporcionalmente hasta reducir el flujo al 5% ó menos.

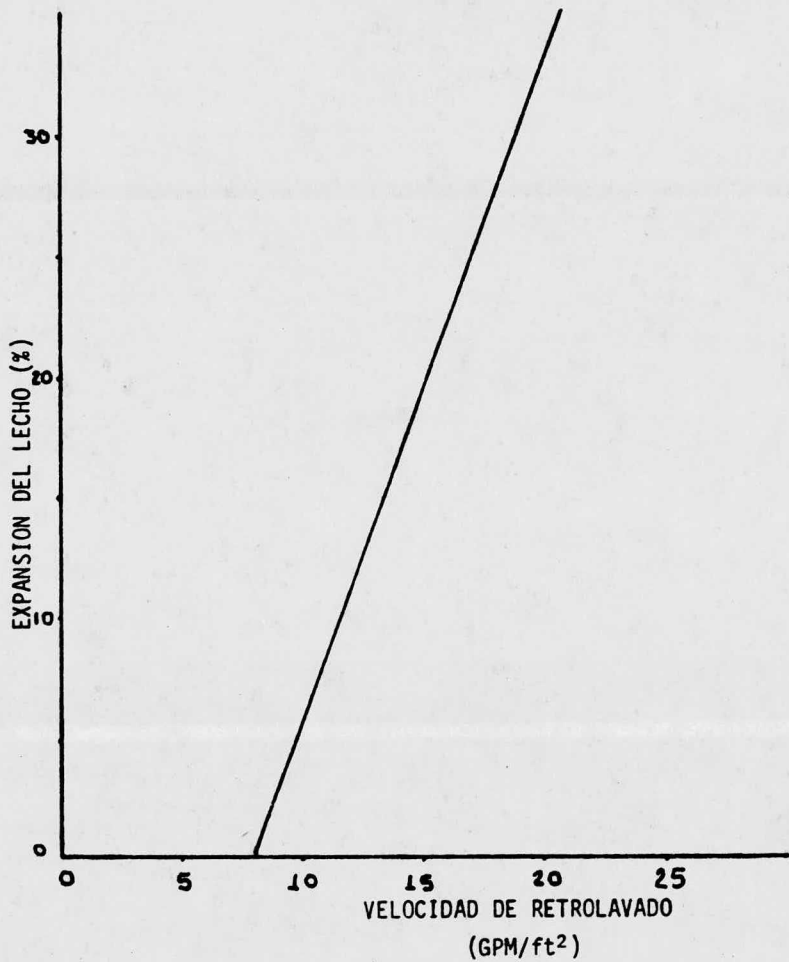


FIGURA No. 22

## II. Filtración a vacío

La filtración a vacío es utilizada para desecar lodos de aguas residuales, donde el agua es removida bajo un vacío aplicado a través de un medio poroso el cual retiene los sólidos. Los medios más ampliamente utilizados incluyen filtros de nylon, dacron, mallas de acero, etc. Los filtros de vacío más utilizados en el tratamiento de aguas residuales es el filtro de tambor rotatorio en el cual el tambor rotatorio con un vacío aplicado pasa a través de tanque de lodos, resultando que los sólidos son retenidos en el tambor, la cantidad de tambor sumergida en el tanque de lodos puede variar desde el 10 a 60%. Durante el ciclo de sumergencia, los sólidos son retenidos por el medio filtrante y el agua removida por la filtración, este período de la filtración es conocido como tiempo de formación, después de que el tambor emerge del tanque de lodos, la capa de lodos depositada será secada por arrastre del agua en el aire al aplicar el vacío, al final del ciclo de filtración la cantidad de lodos serán removidos hacia fuera del tambor por varios métodos y el medio filtrante deberá ser lavado con chorros de agua y nuevamente se inicia el ciclo de filtración.

Las variables que afectan la operación y capacidad de filtración de este tipo de filtros son:

- a. Naturaleza y concentración de sólidos alimentados.
- b. Viscosidad de los lodos y filtrado.
- c. Compresibilidad de los lodos.
- d. Composición físicoquímica de los lodos alimentados.



- e. Temperatura de operación
- f. Vacío de operación (rango comprendido entre 10 a 20" Hg)
- g. Porcentaje de sumergencia del tambor durante el período de secado (10 a 60%, lodos con alta porosidad requieren altas sumergencias).
- h. Acondicionamiento de los lodos por adición de reactivos químicos ó medios físicos.
- i. Tipo y porosidad del medio filtrante
- j. Velocidad del tambor
- k. Grado de agitación.

La ecuación fundamental para este tipo de filtración es derivada de las leyes de D'arcy y Poiseilles y es la siguiente:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PA^2}{\mu (rcV + RmA)} \dots\dots\dots (72) \{L^3/t\}$$

Donde:

- V = Volúmen del filtrado {L<sup>3</sup>}
- t = Tiempo de filtración {t}
- P = Presión de vacío aplicado {M/L<sup>2</sup>}
- A = Area de filtración {L<sup>2</sup>}
- c = Sólidos depositados por unidad de volúmen filtrado {M/L<sup>3</sup>}
- r = Resistencia específica {t<sup>2</sup>/M}
- Rm = Resistencia inicial del medio filtrante {t<sup>2</sup>/L<sup>2</sup>}
- μ = Viscosidad del filtrado {L<sup>2</sup>/t}

El rearrreglo e integración de esta ecuación permite calcular la resistencia específica, la cual es una medida de la filtrabilidad de los lodos y es numéricamente igual a la diferencia de presión requerida para producir una velocidad unitaria de flujo filtrado de viscosidad unitaria a través de peso unitario de lodos, la cual se expresa como:

$$\frac{t}{V} = \left( \frac{\mu r c}{2PA^2} \right) V + \frac{\mu R_m}{PA} \dots\dots\dots (73) \{t/L^3\}$$

Graficando t/V vs. V se puede obtener una relación lineal con una pendiente igual a  $\mu r c / 2PA^2$  y una intercepción de  $\mu R_m / PA$ , si definimos a la pendiente como b, tendremos la siguiente expresión:

$$b = \frac{\mu r c}{2 PA^2} \dots\dots\dots (74) \{Adimensional\}$$

sustituyendo en la ecuación (73) tendremos el valor para la resistencia específica (r) expresado como:

$$r = \frac{2 PA^2 b}{\mu c} \dots\dots\dots (75)$$

La resistencia específica se usa para comparar las características de filtración de diferentes lodos y para determinar los requerimientos óptimos de coagulante para un lodo específico. El embudo buchner se usa para determinar los datos necesarios para determinar la relación lineal t/V vs. V y posteriormente la resistencia específica, la mayoría de los lodos de aguas residuales forman capas de lodos compresibles en los cuales la resistencia específica y la velocidad de filtrado son una función de la diferencia de presión a lo largo de la capa de

todos, tal es que podemos establecer la siguiente relación:

$$r = r_0 P^s \dots\dots\dots (75)$$

Donde:

- s = Coeficiente de compresibilidad
- r<sup>0</sup> = Constante

El coeficiente de compresibilidad puede generarse graficando en escala logarítmica la resistencia específica r vs. la presión de vacío P, la intercepción a P = 1 P si sera la constante r<sub>0</sub> y la pendiente sera igual a s. La ecuación de diseño para este tipo de filtración se podra obtener desarrollando la ecuación (75) hasta la forma siguiente:

$$L = 35.7 \frac{c P^{(1-s)} }{Ro t_f}^{1/2} \dots\dots\dots (76) \{M/L^2t\}$$

Donde:

- L = Carga de filtro {M/L<sup>2</sup>t}
- t<sub>f</sub> = Tiempo de formado {t}
- P = Presión del vacío aplicado {M/L<sup>2</sup>}
- c = Sólidos depositados por unidad de volúmen filtrado {M/L<sup>3</sup>}
- Ro = r<sub>0</sub> x 10<sup>-7</sup> Seg<sup>2</sup>/g.

Los sólidos depositados por unidad de volúmen filtrado c, son determinados con el uso de la siguiente ecuación.

$$c = \frac{1}{\frac{C_1}{(100 - C_1)} \frac{C_f}{(100 - C_f)}} \dots\dots (77)$$

Donde:

$C_1$  = Contenido de lodos en la mezcla inicial { % ó M/100 L<sup>3</sup> }

$C_f$  = Contenido de lodos en la capa final { % ó M/100 L<sup>3</sup> }

En virtud de que la mayoría de los lodos poseen características particulares irregulares, la ecuación (77) puede ser modificada para predecir el comportamiento de la filtración, la cual será expresada con la siguiente expresión:

$$L = 35.7 P^{(1-S)} \frac{1}{2} \frac{C^m}{t_f^n} \dots\dots\dots (78)$$

Donde:

(1-S), m y n son coeficientes experimentales característicos de cada lodo en particular.

Adicionalmente existe una expresión aritmética que permite calcular el tiempo requerido para realizar un ciclo de filtración a vacío, la cual es:

$$t_c = t_f + t_d + t_w \dots\dots\dots (79) \{t\}$$

Donde:

- $t_c$  = Tiempo total de un ciclo de filtración
- $t_d$  = Tiempo de secado para los lodos
- $t_w$  = Tiempo requerido para descargar los lodos removidos por el filtro + tiempo requerido para lavar el filtro.

## Procedimiento de diseño

### I. Información requerida:

- Caracterización de los lodos:
  - \* Flujo
  - \* Peso
  - x Concentración
  
- Parámetros de comportamiento de los lodos que se deberán obtener en el Laboratorio:
  - \* Resistencia específica  $r$
  - \* Constante de los lodos  $r_0$ .
  - \* Exponente  $m$  (función de la concentración de lodos)
  - \* Exponente  $n$  (función del tiempo de formado)
  
- Requerimientos de secado:
  - \* Contenido de lodos en la mezcla ó capa final ( $C_f$ )
  - \* Concentración de sólidos en el filtrado

II. Calcular el tiempo para un ciclo de filtrado  $t_c$ .

III. Calcular el peso de sólidos por unidad de volumen filtrado.

IV. Calcular la carga del filtro (ec. {78})

V. Calcular el área de tambor del filtro usando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\text{Masa total de lodos}}{L} \text{ factor de escalamiento (89)}$$

Se recomienda utilizar un factor de escalamiento de aproximadamente 0.8

### III. Filtración a presión

La filtración a presión es ampliamente utilizada para la filtración de aguas residuales y concentración de lodos provenientes de aguas residuales, este tipo de filtración se realiza como operación en lotes y en caso de requerirse un sistema de operación continuo sera necesario instalar un sistema adicional para relevo. La operación de este sistema de filtración consiste en alimentar a presión, a los efluentes a ser filtrados dentro de la cámara de filtración de los lodos, asentandose los lodos a traves del medio filtrante el cual puede ó no estar recubierto, las altas presiones permiten formar capas de lodos bastante espesas dentro de la cámara de filtración. El filtrado fluye desde la parte inferior y a traves del medio filtrante por rutas que se forman dentro de la capa de lodos formada. La salida de cada plato de filtración puede ser abierta ó cerrada en líneas de tuberías, después de que la capa de lodos es completamente formada a la presión de filtración, el flujo de material dentro de cámara decae significativamente, indicando con ello el final del ciclo de filtración. El filtro sera entonces abier

to, una cámara a un tiempo y descargando los lodos, siendo nuevamente puesto en operación el filtro.

La presión ejercida sobre la capa de lodos durante la formación de estos esta limitada por la presión de bombeo y el diseño del medio filtrante. Un buen rango para el factor de diseño en filtros a presión es de 50 a 225 lb/in<sup>2</sup> lo cual permite concentrar lodos hasta en un 40 ó 50% con densidades de 80 a 100 lb/ft<sup>3</sup>. La calidad de este tipo de filtración es una función de: medio filtrante, acondicionamiento (qumico, físico ó ambos) y factor de preredimiento.

Las variables que afectan la operación y capacidad de filtración de este tipo de filtración son:

- a. Presión de operación ó presión final de filtración.
- b. Espesor de los lodos en la cámara de filtración.
- c. Tiempo requerido para realizar un ciclo de filtración.
- d. Tipo de acondicionamiento de los lodos (químico, físico, etc.)
- e. Temperatura de los lodos.
- f. Preredimiento en el medio filtrante
- g. Tipo y porosidad del medio filtrante
- h. Concentración de sólidos alimentados en el efluente, lo cual es determinado por la naturaleza del lodo y proceso de espezamiento.
- i. Viscosidad del filtrado y de los lodos
- j. Compresibilidad del lodo (lo cual relaciona las propiedades físicas de las partículas del lodo).

- k. Propiedades fisicoquímicas de la mezcla, los lodos y el filtrado.

Se ha intentado en muchas ocasiones desarrollar modelos matemáticos tendientes a ilustrar la filtración a presión, sin embargo, debido a la cantidad de factores que la afectan no ha sido posible adaptarlos y aceptarlos para el diseño de este tipo de filtros. El dimensionamiento de este tipo de sistemas se basa en aspectos experimentales como los que se enlistan a continuación:

- a. La cantidad total de lodos sólidos a ser desecados en un día, son calculados en términos de galones de lodos a ser manejados y libras de sólidos líquidos a ser eliminados.
- b. La cantidad de acondicionadores (químicos ó físicos), los cuales son agregados para permitir la formación de sólidos, deberan ser considerados dentro de todo el material alimentado al filtro.
- c. El volúmen de los lodos del filtro, basado en el porcentaje final de sólidos de los lodos filtrados debera ser determinado en base a la experiencia ó pruebas realizadas en plantas piloto.
- d. El volúmen total de cámaras de filtración requeridas por día.
- e. El número de cámaras de filtrado requeridas por día basado en el volúmen cubico actual de cada cámara de filtración.



A continuación se enlistan las ecuaciones básicas de diseño para este tipo de filtración:

Sólidos totales a ser filtrados = Lodos sólidos + sólidos acondicionadores.

$$\text{Masa filtrados} = \frac{\text{Lodos sólidos filtrados}}{\text{Sólidos secos}}$$

$$\text{Volúmen filtrado} = \frac{\text{Masa filtrada}}{\text{Densidad}}$$

$$\text{No. de cámaras de filtración} = \frac{\text{Volúmen filtrado}}{\text{Volúmen de la cámara de filtración}}$$

$$\text{Ciclos de filtrado} = \frac{\text{horas de operación}}{\text{Tiempo requerido por ciclo de filtrado}}$$

$$\text{Cámaras de filtrado por ciclo} = \frac{\text{Cámaras de filtrado}}{\text{Ciclos de filtrado.}}$$

Los parámetros de diseño para los filtros a presión varían de acuerdo a los siguientes conceptos individuales; geometría de las planchas de filtrado (rectangulares, cuadradas ó redondas), espesor de los lodos, etc. Existen tres tamaños generales de filtros los cuales son usados en el tratamiento de aguas residuales y son condensados en la siguiente tabla:

LONGITUD DE LAS PLANCHAS DE FILTRACION		VOLIMEN DE Lodos		RANGO DE ESPEZAMIENTO DE LOS Lodos		AREA DE FILTRACION POR CAMARA	
m	in	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	cm	in	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>
1 - 1.2	48 a 52	0.028 0.042	1 - 1.5	2.54 3.81	1 - 1.5	2.32 2.79	25 - 30
1.5	60 - 64	0.042 0.075	1.5 - 2.5	2.54 3.81	1 - 1.5	3.72 4.18	40 - 45
2	72 - 96	0.075 0.113	2.5 - 4	2.54 3.81	1 - 1.5	6.97 7.43	75 - 80

Generalmente en este tipo de filtros cuando se usa prereducimiento (tierras, diatomáceas, sílice, antracita, etc.) consumen de 3 a 15 lb de prereducimiento por cada 100 ft<sup>2</sup> de área por cada ciclo de filtración

#### Procedimiento de diseño

##### I. Información requerida

- Alimentación total de sólidos en suspensión contenidos en el lodo.
- Concentración de los lodos que entran al sistema.

- Tipo y cantidad de material de acondicionamiento requeridos.
  - Espesor de la capa de lodos que será producida con el filtro de presión requerido.
  - Tiempo total de un ciclo de filtración para acondicionar un lodo filtrado a las características requeridas.
  - Tiempo requerido para alcanzar la desecación total.
- II. Calcular la cantidad total de sólidos que deberán ser desecados diariamente.
- III. Calcular la cantidad de sólidos de acondicionamiento que deberán ser agregados a estos lodos.
- IV. Calcular los sólidos totales en el filtro.
- V. Calcular volumen total de lodos filtrados a el porcentaje de sólidos esperado. (Experimental)
- VI. Calcular el volumen total de lodos producidos por día de operación, basados en la densidad de los lodos esperados.
- VII. Calcular el número total de cámaras de filtración requeridas por día de operación para producir el volumen requerido de lodos.
- VIII. Calcular el número total de ciclos de filtrado, añadiendo los tiempos de descarga, lavado y prrecubrimiento.
- IX. Calcular el número total de cámaras requerido por cada ciclo de filtración.

#### IV. Filtración con procesos de microfloculación

Los principios de este tipo de filtración son básicamente los ya descritos, su diferencia estriba en que en estos procesos se requiere de adicionar agentes floculantes y/o coagulantes para aumentar la microfloculación.

#### D) CARACTERISTICAS DE POZOS DE INYECCION

Las características que describen la construcción y operación de los pozos de inyección son: ademe de conducción, ademe de protección de aguas dulces, ademe de protección para evitar la migración de los efluentes contaminados a estratos superiores, rejilla de inyección, tubería de inyección, cementado de ademes, cabezal del pozo, fluido anular para monitoreo de presión, profundidad de los ademes, presión de inyección y flujo de inyección estas tres últimas características dependen de la geología regional y de las propiedades ingenieriles (porosidad y permeabilidad) del estrato receptor.

La finalidad de los ademes de conducción es la de establecer un orificio guía que elimine los riesgos de inclinaciones de  $\pm 1.5^\circ$  en la trayectoria de la perforación, generalmente estos ademes alcanzan profundidades comprendidos entre el rango de 20 a 45 m., con diámetros variables, siendo determinado en función del diámetro de la tubería de inyección, el material de construcción más ampliamente utilizado es acero al carbon con recubrimiento para reducir la corrosión y especificaciones de construcción API Grado A.

El ademe de protección de mantos de aguas dulces, cuya finalidad primordial es la de reducir al mínimo los riesgos de contaminación de los acuíferos de aguas dulces por infiltración de los efluentes contaminados que pueden ser debido a fenómenos naturales, problemas de corrosión por mala selección en los materiales de construcción ó fenómenos naturales y adicionalmente la de establecer un agujero guía que elimine también los riesgos de inclinaciones de  $\pm 1.5^\circ$  en la trayectoria de perforación, estos ademes generalmente alcanzan una profundidad comprendida en el rango de  $\pm 250$  a  $350$  m., lo cual es una función que depende de las condiciones hidrológicas del sitio de inyección, como regla general se debe de perforar  $80$  m. adicionales al punto donde se localiza el último manto de aguas dulces, en estos ademes al igual que en los de conducción, el diámetro es variable y depende del diámetro de la tubería de inyección, el material de construcción más ampliamente utilizado es acero al carbon con recubrimiento para reducir la corrosión y especificación API Grado A.

El ademe de protección para evitar la migración de los efluentes contaminados a estratos superiores que han sido atravesados durante la perforación, cuya finalidades primordiales son: evitar que los efluentes contaminados emigren hacia estratos superiores, ocasionando con ella la contaminación de recursos naturales que se encuentren en los estratos superiores, como sal, azufre, gas, petroleo, agua, etc., eliminar los riesgos de fugas debidas a fallas en la tubería de inyección, el establecer una barrera permanente para evitar migración y el de establecer un agujero guía que permita colocar la rejilla de infiltración y tubería de inyección. Este ademe alcanza generalmente profundidades para cada caso en

particular y es una función que depende de la geología regional, como regla general se consideran los siguientes criterios para fines de evaluación económica:

PROFUNDIDAD (ft)	CLASIFICACION
1,000 - 2,500	Profundidad baja
2,500 - 7,000	Profundidad media
7,000 - 15,000	Profundidad grande

en este tipo de ademe al igual que los de conducción y protección de aguas dulces, el diámetro depende del diámetro de la tubería de inyección y como regla general debiera tener un diámetro mayor de 2" al diámetro de la tubería de inyección para poder colocar el paquer ó reten y sello-mecánico entre este y la tubería de inyección y centralizadores que evitan el combado de la tubería de inyección, así como el permitir colocar los instrumentos para poder monitorear la presión anular en la sección hueca. Los materiales de construcción más ampliamente utilizados son acero al carbon con recubrimiento para reducir la corrosión y especificación API Grado A.

La rejilla de inyección ó infiltración, cuya finalidad es la de distribuir uniformemente a todo lo largo del estrato receptor el efluente contaminado, consiste en un tubo horadado en toda su longitud que se encuentra en contacto con el intervalo de inyección, con diámetro suficiente para manejar el rango de flujo que se desea inyectar, de tal forma

que permita una vida útil de capacidad de almacenamiento de 9 años como mínimo. (función que depende de: área, espesor, porosidad y permeabilidad del estrato receptor; obteniéndose de ahí en forma indirecta la longitud mínima requerida en la tubería de inyección). Los materiales de construcción de esta rejilla deberán ser seleccionados en función de la resistencia a la corrosión originada por: el efluente a inyectar, la formación nativa, el fluido contenido en el y los productos de reacción, el material más ampliamente utilizados en el Alloy-20.

La tubería de inyección tiene la finalidad de conducir los efluentes contaminados del cabezal del pozo a la profundidad del intervalo de inyección, a la presión y flujo previamente determinados, debiéndose determinar con exactitud los materiales de construcción para reducir los efectos de corrosión originada por el efluentes a inyectar, los materiales de construcción más ampliamente utilizados son: Fibras de vidrio recubierta con poliéster, acero al carbon con ó sin recubrimiento y acero inoxidable 316. Las aleaciones no son comúnmente utilizadas por su costo excesivo. Se recomienda el siguiente criterio para seleccionar el diámetro de la tubería de inyección:

$$v = \frac{Q}{A} = 3.0 \text{ ft/seg. } \pm 15\%$$

El cementado de ademes tiene por finalidad el sellar los huecos comprendidos entre ademes, proporcionando una barrera física que aumenta la protección sanitaria y les confiere mayor resistencia mecánica a los ademes para los esfuerzos mecánicos a que estos pueden estar sometidos.

tidos en condiciones normales de operación y fenómenos naturales geológicos, con lo cual se aumenta la vida útil del pozo, la sección de materiales para su construcción es función del tipo de resistencia mecánica y química que se desea obtener, los más ampliamente utilizados son cementos tipo H mezclados con resinas, grava y cloruro de calcio en diferentes proporciones.

El cabezal del pozo cuya finalidad es la de permitir el flujo en el sentido de la inyección, aliviar sobre presiones y evitar que el fluido retorne a la superficie así como el permitir monitorear la presión de inyección y del espacio anular comprendido entre la tubería de inyección y ademe de protección. En la figura No. 23 se ilustra un diseño de un cabezal de pozo así como los materiales de construcción.

El fluido anual para monitoreo de la presión en el espacio comprendido entre la tubería de inyección y ademe de protección, se debe seleccionar que sea un fluido (líquido ó gas) que no presente problemas de corrosión sobre los materiales de construcción ó incompatibilidad con el efluente a inyectar y que así mismo sea muy sensible a cambios de presión. Los fluidos más ampliamente utilizados son: Nitrogeno, Helio, agua D.I., aceites orgánicos.

La profundidad de los ademes, presión de inyección y flujo de inyección son características que dependen de la geología regional y propiedades ingenieriles del estrato receptor de la localidad donde se encuentra localizado el pozo de inyección, a grandes rasgos podemos mencionar que la profundidad de los ademes depende de la geología regional del sitio donde se pretenda realizar la inyección y que la pre-



sión de inyección es una función que depende de la permeabilidad y porosidad del estrato receptor y por último el flujo de inyección depende de: espesor y área del estrato receptor así como de su porosidad.

Se anexan las figuras No. 24, 25 y 26 en las cuales se ilustra las diferentes características de construcción de los pozos de inyección.

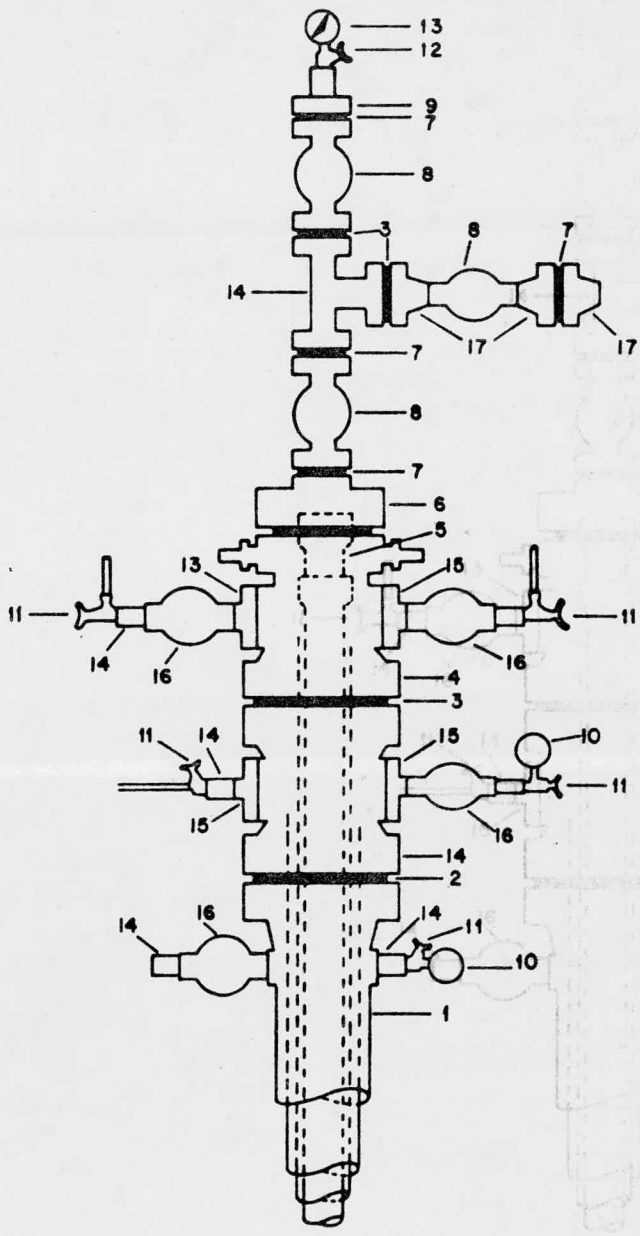


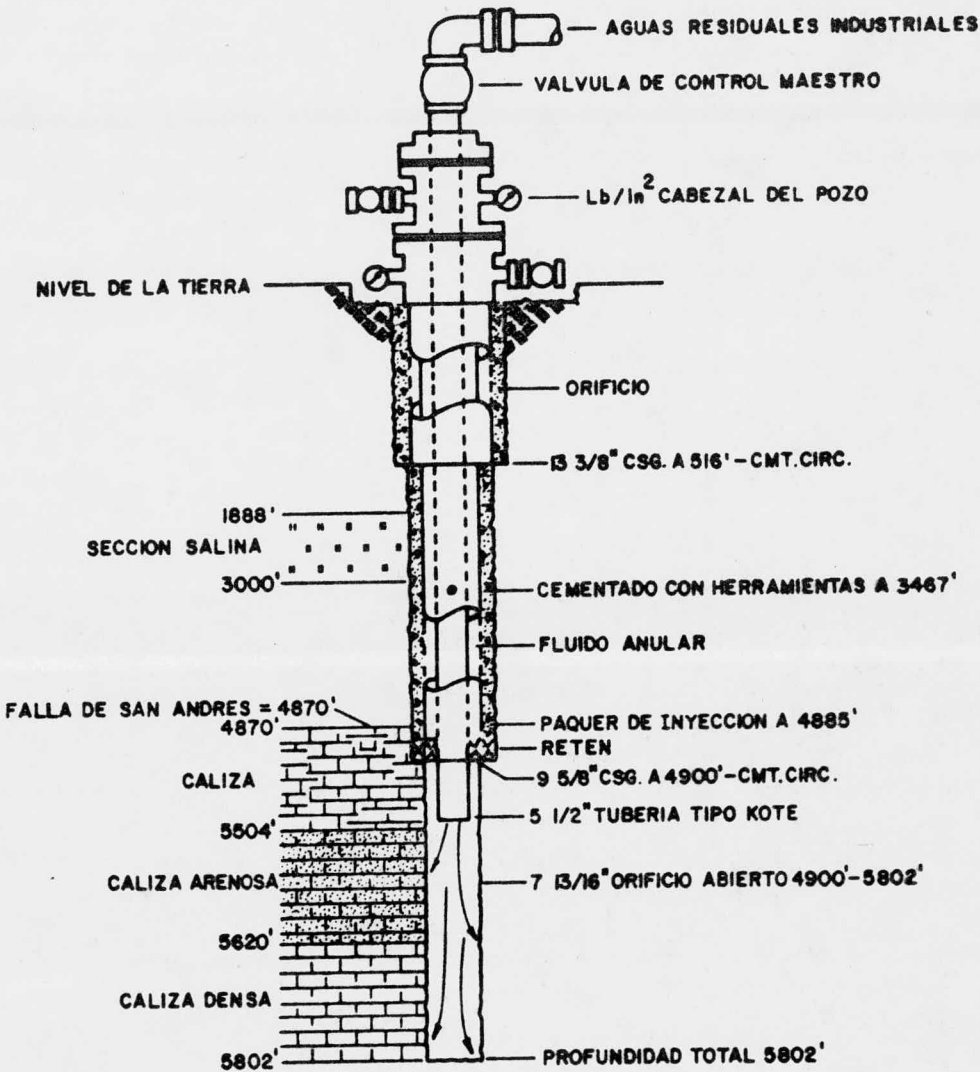
FIG. 22

## LISTA DE IDENTIFICACION

### NUMERO

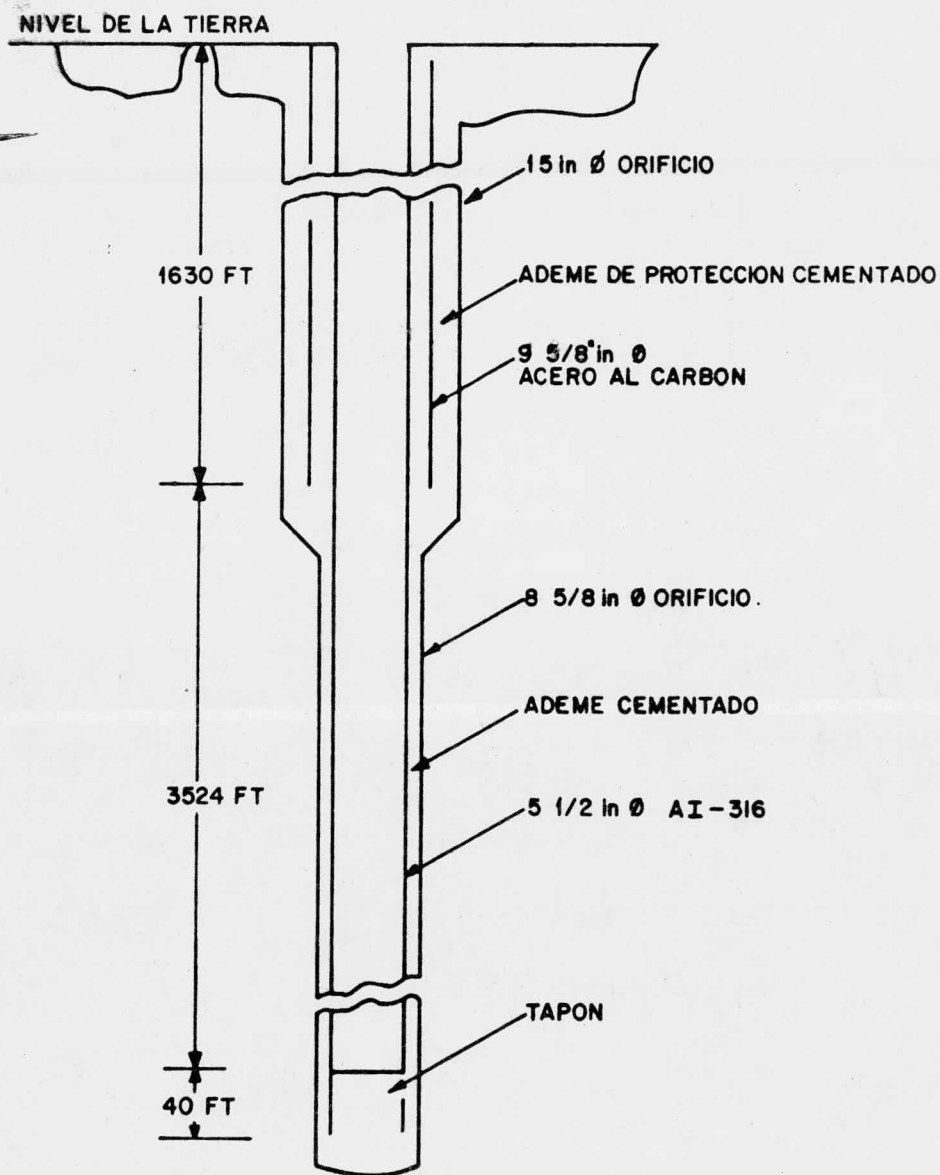
### DESCRIPCION

1. Cabezal Slip on, 2000# 13 3/8"  $\varnothing$
- 1-A. Cabezal de ademe con deslizamiento y empaque para ademe de 6 5/8"  $\varnothing$
2. Empaque R-57
3. Empaque R-57
4. Cabezal de ademe 12"  $\varnothing$  2000# x 6" 2000#.
5. Adaptador 4 1/2"  $\varnothing$ . Alloy 20
6. Brida de adaptación con esparragos Studded. Alloy 20.
7. Empaque R-57 Alloy 20.
8. Válvula de compuerta 4"  $\varnothing$  2000#. Alloy 20.
9. Reducción de campana con extremo bridado y otro roscado con entrada hembra 4"  $\varnothing$  2000#. Alloy 20.
10. Manometro sello químico 1000#
11. Válvula de orificio 1/2"  $\varnothing$  CS
12. Válvula de orificio 1/2"  $\varnothing$  Alloy 20.
13. Manometro 2000# Alloy 20.
14. Tee recta bridada 4"  $\varnothing$  2000# Alloy 20.
15. Brida de acomplamiento con salida roscada 2"  $\varnothing$  2000#.
16. Válvula de bola roscada 2"  $\varnothing$  2000#
17. Brida de acoplamiento roscada 4"  $\varnothing$  2000#
18. Tapones machos 2" 11 1/2 VTHD Alloy 20.
19. Tapones machos 2" - 11 1/2 VTHD
20. Empaque R-45



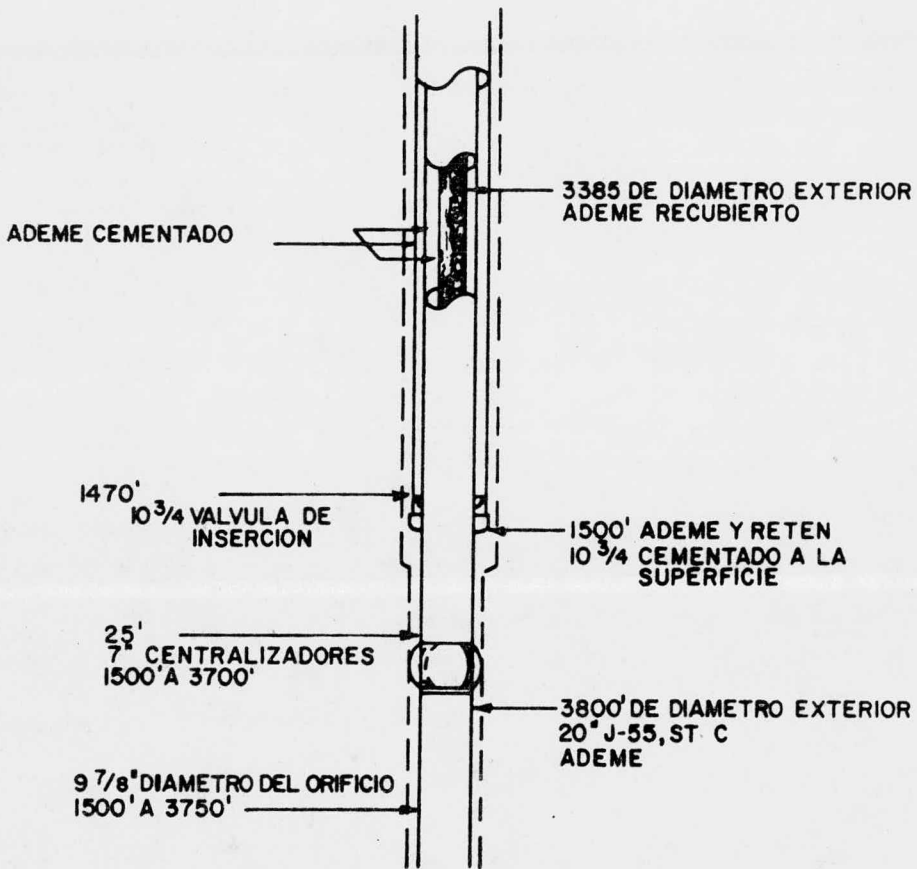
POZO TIPICO DE INYECCION DE AGUAS RESIDUALES

FIG. 2 2



DETALLES DE CONSTRUCCION EN POZOS DE INYECCION

FIG. 23



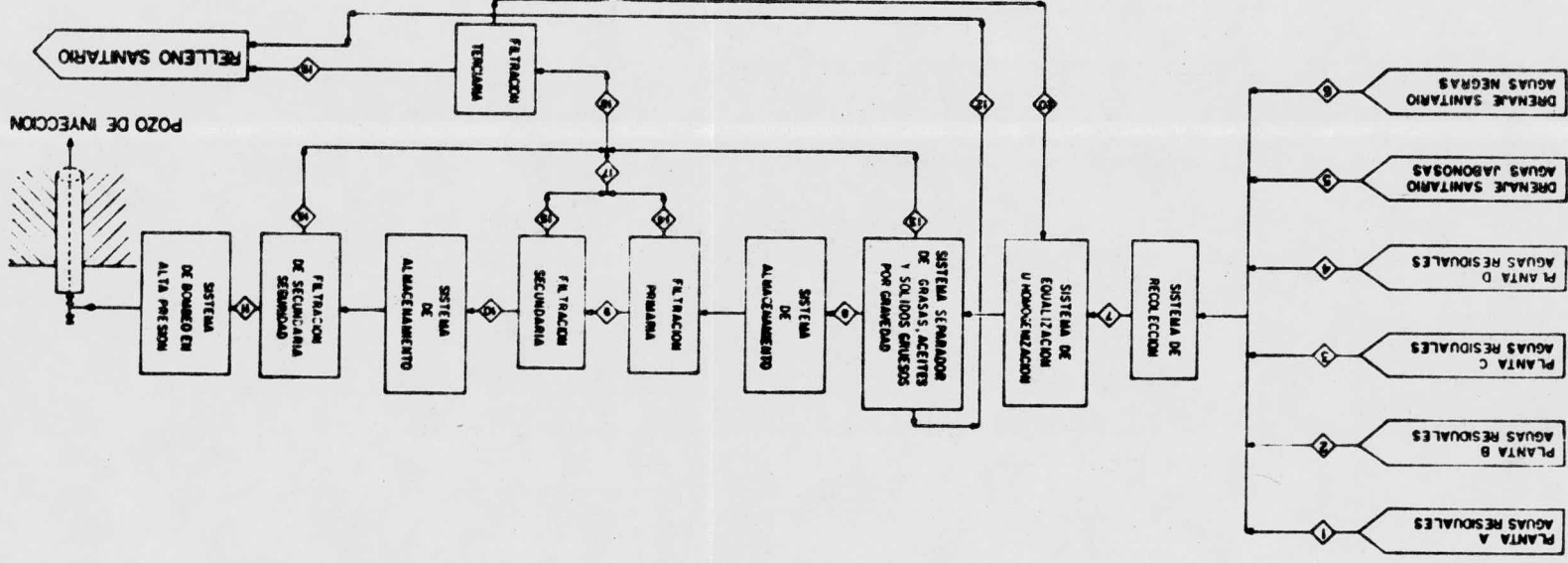
DISEÑO TIPICO DE TUBERIA DE INYECCION

FIG. 24

#### IV. DISEÑO PROPUESTO

1. DIAGRAMA DE BLOQUES Y BALANCE DE MATERIALES





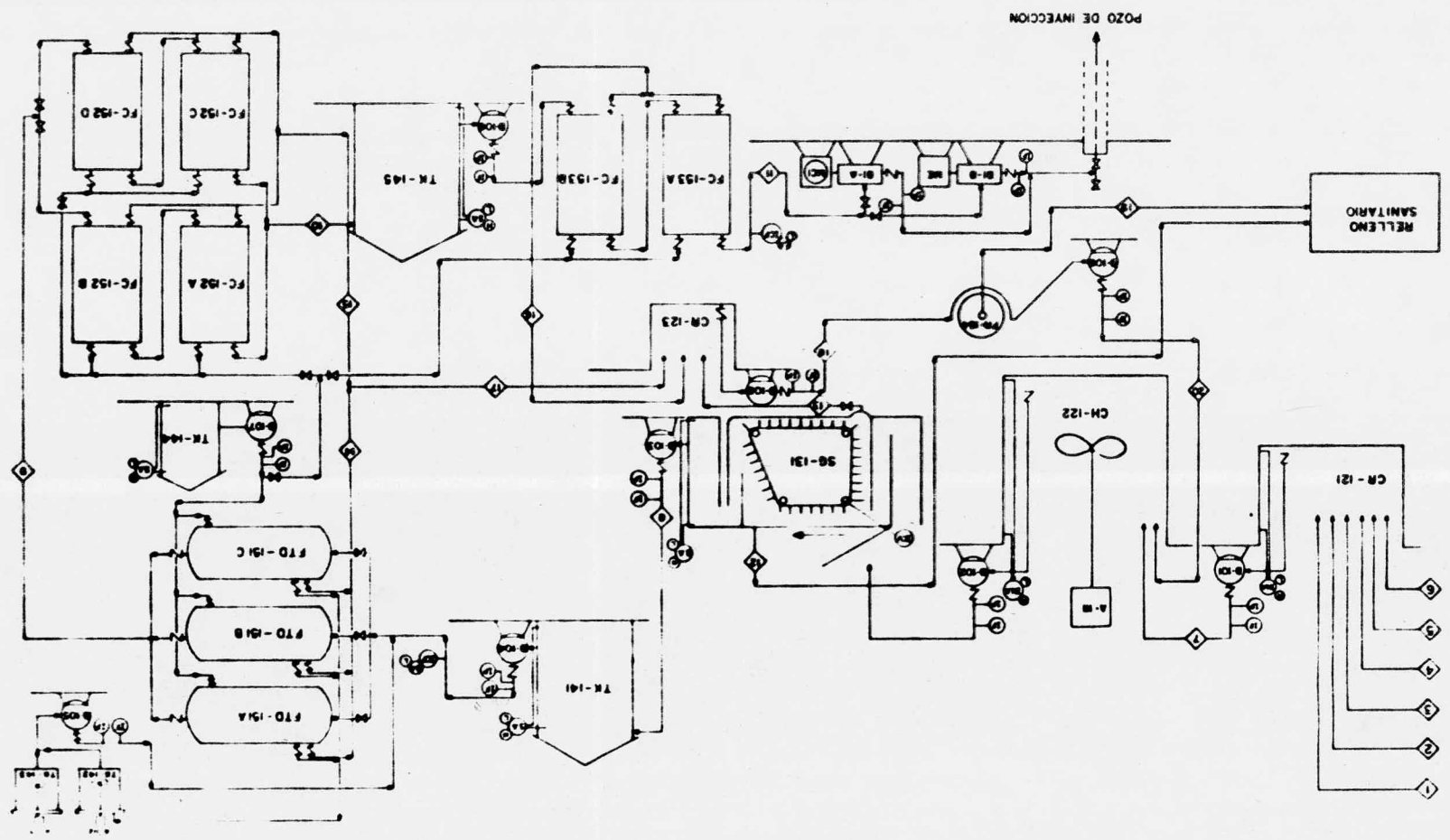
CAPACITACION	CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FLUJO VOLUMETRICO	m³/DIA	84.41	548.49	548.49	244.44	84.30	134.78	140.73	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94	140.94
L.F.S.		2.25	6.40	4.88	2.88	1.14	1.58	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82
FLUJO MASICO	kg/DIA	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
SOLIDOS SUSPENDIDOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
SOLIDOS DISUELTOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
CARGA DE SOLIDOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
CENTROS		0.89	0.87	4.00	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
POTENCIAL HORROROSO	h	12.00	3.00	3.00	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
GRAVEDAD ESPECIFICA	°C	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
TEMPERATURA		1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
SOLIDOS SUSPENDIDOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
SOLIDOS DISUELTOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
ROTACION	ROT/DIA	11.63	0.61	0.44	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SOLIDOS DISUELTOS	kg/DIA	103.04	760.98	346.57	109.87	14.77	47.17	62.81	74.63	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6	81.6
CALCULO	ppm	33.00	6.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
FIENO	ppm	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AMONIAS	ppm	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AMONIO	ppm	150.00	230.00	100.00	60.00	12.00	17.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
CLORURO	ppm	10.00	8.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
CANCIOS	ppm	10.00	8.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
CANCIOS TOTAL	ppm	5000.00	1800.00	2800.00	130.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
GRASAS Y ACEITES	ppm	8.00	10.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
PH		8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
ANIONES	ppm	8.00	10.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
ANIONES TOTAL	ppm	5000.00	1800.00	2800.00	130.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ANIONES Y CATIONES	ppm	1300.00	30.00	1300.00	130.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
%		0.00	0.30	11.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

SISTEMA DE BOMBEO EN ALTA PRESION  
 POZO DE INYECCION  
 BALANCE DE MATERIAS  
 PLANCHA 12/11/79  
 ESCALA:  
 DIBUJADO POR:

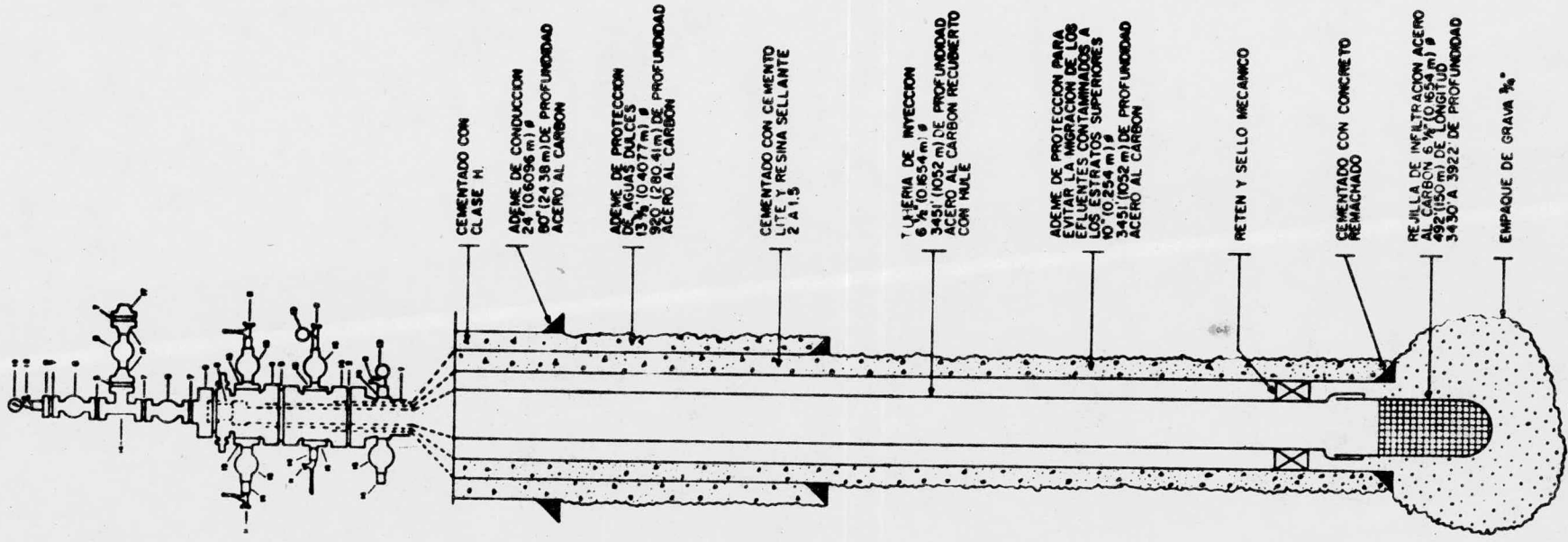
ING. A.F.Z.  
 PLANCHA 12/11/79  
 ESCALA:  
 DIBUJADO POR:

## 2. DIAGRAMA DE FLUJO

DIAGRAMA DE FLUJO  
 POZO PROFUNDO  
 DISEÑADO POR: E. L. S. A.  
 A LOPEZ: 1975  
 REVISADO POR: PLUMERIA  
 INY. 8.7.7



### 3. DISEÑO DEL POZO PROFUNDO DE INYECCION



CEMENTADO CON CLASE H.

ADEME DE CONDUCCION  
24 (0.6096 m) Ø  
80' (24.38 m) DE PROFUNDIDAD  
ACERO AL CARBON

ADEME DE PROTECCION DE AGUAS DULCES  
13 1/2 (0.4077 m) Ø  
920 (280.41 m) DE PROFUNDIDAD  
ACERO AL CARBON

CEMENTADO CON CEMENTO LITE Y RESINA SELLANTE  
2 A 1.5

TUBERIA DE INYECCION  
6 1/2 (0.1654 m) Ø  
3451 (1052 m) DE PROFUNDIDAD  
ACERO AL CARBON RECUBIERTO CON MULE

ADEME DE PROTECCION PARA EVITAR LA MIGRACION DE LOS EFLUENTES CONTAMINADOS A LOS ESTRATOS SUPERIORES  
10' (0.254 m) Ø  
3451 (1052 m) DE PROFUNDIDAD  
ACERO AL CARBON

RETEN Y SELLO MECANICO

CEMENTADO CON CONCRETO REMACHADO

REJILLA DE INFILTRACION ACERO AL CARBON 6 1/2 (0.1654 m) Ø  
42' (12.80 m) DE LONGITUD  
3450 A 3922 DE PROFUNDIDAD

EMPAQUE DE GRAVA 3/4"

DISEÑO PROPUESTO PARA POZO PROFUNDO DE INYECCION	
DISEÑADO POR	F. C. H. A.
REVISADO POR	M. B. G. P. S.
INGENIERO	812-003

## V. DESCRIPCION DEL PROCESO

Las aguas residuales provenientes de la planta A, corriente No. 1; planta B, corriente No. 2; planta C, corriente No. 3; aguas jabonosas del drenaje sanitario corriente No. 4 y aguas negras del drenaje sanitario, corriente No. 5, descargan por gravedad al carcamo de recolección CR-121, de donde por medio de la bomba B-101 son transferidas al carcamo de homogenización CH-122 en donde mediante agitación mecánica con el agitador A-111, son homogenizadas, siendo posteriormente y en forma continua transferidas mediante la bomba B-102 al separador de grasas, aceites y sólidos gruesos tipo API, SG-131, en el cual se les elimina el 97.6% de grasas y aceites por decantación y el 90% de sólidos gruesos por sedimentación gravitatoria -- (13.8% del contenido total de sólidos suspendidos) el efluente principal del SG-131, corriente No. 8 es posteriormente transferido al tanque de residencia TK-141 mediante el uso de la bomba B-103, de este tanque que permite mantener una alimentación continua es transferido el efluente mediante el uso de la bomba B-104 al sistema de filtración primaria.

El sistema de filtración primaria consiste en un conjunto de tres filtros horizontales a base de tierras diatomáceas, el cual es operado en forma automática, mediante medición de la caída de presión en cada unidad, manteniendo en operación en forma simultánea dos unidades y otra en reserva para que al momento de detectarse alta caída de presión en cualesquiera de las dos unidades en operación, esta sea rele-

vada en forma automática y se proceda a realizar el retrolavado de la unidad mediante alimentación a contracorriente de agua cruda proporcionada por la bomba B-107, el proceso de filtración se realiza manteniendo un sobre flujo del 300% del flujo de alimentación forzándolo a pasar a través del medio filtrante proporcionando por la solución porosa de tierras diatomáceas depositadas sobre las placas contenidas por los tanques. Este sobre flujo es proporcionado por la bomba B-105 y la solución del medio filtrante es preparada por la adición de tierras diatomáceas y agua al tanque de preparación del medio filtrante TK-142, en el cual mediante agitación mecánica a través del A-112 es preparada la solución, siendo posteriormente transferida a las unidades de filtración FTD-151 A, B y/o C por medio de la bomba B-105.

El sistema de filtración primaria a base de filtros de tierras diatomáceas posee una eficiencia de filtración del 85% sobre el contenido total de sólidos suspendidos (98.9 sobre el contenido de sólidos en la corriente No. 8) y del 1.2% para la remoción total de grasas y aceites (50% sobre el contenido de grasas y aceites en la corriente No. 8). Este efluente filtrado proveniente del sistema FTD-151 A, B ó C, corriente No. 9, pasa posteriormente a través de un sistema de filtración secundaria, consistente en dos unidades de filtros de cartuchos de efecto duplex en el cual se tiene una eficiencia de filtración del 0.77% sobre el contenido total de sólidos suspendidos (80% sobre el contenido de sólidos en la corriente No. 9), para partículas con tamaño de partícula comprendido en el rango de: 100v

$< D_p < 0.5 \mu$ , con una eficiencia del 99.9% para este rango.

Este sistema de filtración FC-152 A, B, C y D, al igual que el FTD-151 A, B y C es operado automáticamente mediante mediciones de presión, realizándose el cambio y retrolavado de la misma forma. Este sistema consiste en cuatro recipientes verticales conteniendo en su interior cartuchos con núcleo y devanado de polipropileno con las siguientes características 2 1/2" de diámetro interior y 30" de longitud (dos conteniendo 75 cartuchos y otros dos conteniendo 45 cartuchos conectados en serie entre sí y en paralelo con la línea de alimentación).

El efluente principal proveniente de los FC-152 A, B, C y D, corriente No. 10 pasa posteriormente a un tanque de almacenamiento TK-145, con un tiempo de residencia de 2 1/2 hrs. para garantizar una alimentación continua a las bombas de inyección. De este tanque, las aguas residuales son alimentadas a un sistema de filtración de efecto duplex consistente en dos filtros de cartuchos con 65 cartuchos y 40 cartuchos respectivamente, con el objeto de corregir cualesquier deficiencia en la operación de filtración de los FTD-151 y FC-152, el cual opera con el mismo principio de los FC-152, del sistema de filtración de seguridad FC-153 A y B, las aguas residuales pasan a las bombas de desplazamiento positivo B1-B (una equipada con motor eléctrico B1-B y otra con un motor de combustión interna B1-A con el objeto de no interrumpir la inyección en casos de falla en el suministro de energía eléctrica)



las cuales les proporcionan la energía (presión) requerida para realizar su inyección en el estrato receptor el cual esta en contacto con la rejilla de infiltración del pozo de inyección.

Adicionalmente cabe mencionar que en el cabezal del pozo de inyección se debiera monitorear: la presión de inyección con el objeto de poder determinar la tendencia del pozo a taponarse, el flujo de inyección, en virtud de que la inyección es muy susceptible a cualquier cambio, debiendo de hacerse en caso de ser necesario en forma gradual y controlada y por último es necesario monitorear la presión del espacio anular comprendido entre la tubería de inyección y ademe de protección para evitar la migración de efluentes contaminados a estratos superiores con el fin de poder detectar cualesquier fuga ocasionada por corrosión ó falla mecánica con la tubería de inyección.

El efluente conteniendo las grasas y aceites colectadas por el SG-131, corriente No. 12, es transferida para su esparcimiento en forma uniforme sobre el relleno sanitario con el fin de lograr su degradación biológica a productos inocuos.

El efluente conteniendo los sólidos gruesos colectados en el SG-131, corriente No. 13, se transfiere al carcamo de recolección CR-123, en donde a su vez se une con la corriente No. 17 que a su vez se forma por la unión del efluente secundario de los FTD-151 conteniendo los sólidos filtrados en el sistema corriente No. 14 y

la corriente No. 15 que es el efluente secundario conteniendo los sólidos filtrados en el sistema de filtración FC-152, así como en dicho carcamo se une adicionalmente la corriente No. 16, que es la que contiene los sólidos filtrados en el sistema de seguridad FC-153.

Del CR-123 estos efluentes corriente No. 18, son transferidos por medio de la bomba B-108 al sistema de filtración terciario el cual es un filtro de tipo rotatorio FR-154, en el cual los sólidos son acondicionados para su posterior disposición final en el sistema de relleno sanitario, lograndose con ello su degradación por medios biológicos a productos inocuos. El filtrado ó agua residual remanente del FR-154 es a su vez transferido por medio de la bomba --- B-109 al CH-122 para proseguir su acondicionamiento para realizar su inyección en el pozo.

Así mismo cabe mencionar que este sistema que se opera en forma totalmente automática, no impidiendose con ello el ser operado en forma manual en caso de así requerirse, el motivo por el cual se opera en forma automática es debido a que la operación de inyección es demasiado sensible a cambios bruscos en: la presión de inyección y flujo inyectado, lo cual puede ocasionar entre otras cosas; la ruptura de los estratos sellantes y el taponamiento de la porosidad del estrato receptor, reduciendo con ello la seguridad del sistema y su vida útil.

Por último cabe mencionar que este sistema en particular esta dise-

ñado para las siguientes especificaciones:

vida util = 250 años    A: = 300 GPM y P = 700 #

Espesor del estrato receptor = 250 m.

Area del estrato receptor =  $2.05 \times 10^6 \text{ m}^2$

Porosidad del estrato receptor = 0.28

Permeabilidad del estrato receptor = 150 milidarcys

Profundidad del estrato receptor = 1045 m.

## VI. ESTIMACION DE COSTOS

### 1. INVERSION

A continuación se enlista la estimación de costos de inversión requeridos para la ejecución del proyecto.

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
01		EQUIPOS.				
01	101	Bomba para transferencia de las aguas residuales colectadas en CR-122 300 GPM, 20 H.P. Al-Br al 10%	1	Pieza	270000	270,000
01	102	Bomba para transferencia de las aguas residuales colectadas en CR-121 al SG-131 300 GPM 20 H.P., Al-Br al 10%	1	Pieza	270000	270,000
01	103	Bomba para transferencia de las aguas residuales del SG-131 al TK-141 300 GPM 20 H.P. Al-Br al 10%	1	Pieza	270000	270,000
01	104	Bomba para transferir las aguas filtradas del TK-141 a FTD-151 A, B ó C. 300 GPM, 20 H.P. Al-Br al 10%	1	Pieza	270000	270,000
01	105	Bomba para mantener un sobre flujo del 300% en FTD-151, 9000 GPM, 75 H.P., Al-Br al 10%	1	Pieza	520000	520,000
01	106	Bomba para transferencia de aguas residuales del TK-145 a FC-153 B. 300 GPM, 20 H.P. Al-Br al 10%	1	Pieza	270000	270,000
01	107	Bomba para alimentación de agua cruda para retrolavado de FTD-151, -- FC-152 y FC-153, 75 GPM, 50 H.P. A, C.	1	Pieza	80,000	80,000
01	108	Bomba para manejo de sólidos producido de SG-131, FTD-151, FC-152 y FC-153 a FR-154, 75 GPM, 15 H.P. Alloy 20	1	Pieza	125000	125,000
01	109	Bomba para transferencia del filtrado de FR-154 al CR-122, 60 GPM, -- 15 H.P., Alloy 20.	1	Pieza	95,000	95,000
01	111	Agitador para CR-122, capacidad de bombeo de 50,000 GPM, 15 H.P. A.C. Recubierta con hule.	1	Pieza	250000	250,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
01	112	Agitador para TK-142, capacidad de bombeo de 8000 GPM, 1 1/2 H.P. A.C. Recubierto con hule	1	Pieza	45,000	45,000
01	113	Agitador para TK-143; capacidad de bombeo de 8000 GPM, 1 1/2 H.P. A.C. Recubierto con hule.	1	Pieza	45,000	45,000
01	131	Separador de grasas, aceites y sólidos gruesos Tipo API, 0.5 ft/in. Vel. de sedimentación, 300 GPM, A.C. recubierto con FVRP, con transportador sin fin y Motor de 7 1/2 H.P.	1	Pieza	1'50000	1'150,000
01	141	Tanque para almacenamiento de aguas residuales; 200 M <sup>3</sup> de capacidad, 2 1/2 Hr. de tiempo de residencia, FVRP.	1	Pieza	500000	500,000
01	142	Tanque para preparación de filtro ayuda, 2 m <sup>3</sup> de capacidad AI 316.	1	Pieza	145000	145,000
01	143	Tanque para recuperación de filtro ayuda, 2 m <sup>3</sup> de capacidad AI 316.	1	Pieza	145000	145,000
01	144	Tanque para almacenamiento de agua cruda de retrolavado FVRP, 15 m <sup>3</sup> de capacidad.	1	Pieza	85,000	85,000
01	145	Tanque para almacenamiento de aguas residuales filtradas 200 m <sup>3</sup> de capacidad, 2 1/2 Hr. de tiempo de residencia FVRP.	1	Pieza	500000	500,000
01	151	Sistema de filtración primaria consistente en tres tanques horizontales 10 m <sup>3</sup> de cap. con placas para 900 ft <sup>2</sup> de Sup. de filtración, A.C. recubierto con hule. tuberías interconexión y soporteria para montaje e instrumentación para control de operación automática.	1	Unidad	7500000	7,500,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
01	152	Sistema de filtración secundario con sistente en cuatro filtros de cartu- chos; dos con 75 cartuchos de pro- pileno de 2 1/2" $\phi$ x 30 long. y dos con 45 cartuchos iguales. A.C. Recu- bierto con hule.	1	Pieza	1750000	1'750,000
01	153	Sistema de filtración secundario de seguridad consistente en dos filtros de cartuchos; uno con 65 cartuchos de polipropileno de 2 1/2" $\phi$ 30" de longitud y otro con 40 cartuchos i- guales. A.C. Recubierto con hule	1	Pieza	800000	800,000
01	B1-A	Bomba de desplazamiento positivo pa- ra inyección de las aguas residuales equipada con motor de combustión in- terna 300 GPM, 750 #, Alloy 20, 400 H.P.	1	Pieza	2500000	2,500,000
01	B1-B	Bomba de desplazamiento positivo pa- ra inyección equipada con motor eléc- trico, 300 GPM, 750 #, 250 H.P. Alloy 20.	1	Pieza	2000000	2,000,000
01	154	Sistema de filtración terciaria consi- istente en un filtro rotativo para 75 GPM de Cap. de filtración con mo- tor de 20 H.P.	1	Pieza	300000	300,000
01	161	Transformador en alta tensión de 36000 V a 440 V de 750 KVA de Capa- cidad.	1	Pieza	800000	800,000
01	162	Transformador para 440 V a 127 V pa- ra alumbrar 25 KVA de capacidad	1	Pieza	60,000	60,000
01	163	Centro de control de motores para to- dos los equipos anteriores con combi- naciones de arrancador interruptor termomagnético para las capacidades de los equipos instalados y luz pilo- to para arranque y paro	1	Pieza	600000	600,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
01	164	Estaciones de botones de campo para para arrancar parar y seguro en pararr Nema 7.	16	Piezas	2,500	40,000
01	170	Cabezal para pozo de inyección especificado de acuerdo al plano D-003.	1	Pieza	2000000	2,000,000
01	180	Fletes para transportación de los equipos anteriores.	1	Partida	450000	450,000
		TOTAL SCTA. 01				23,835,000



## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
02		INSTRUMENTOS				
02	101	Indicador de nivel con switch de alarma en alto y bajo nivel para. CR-121 CR-122 TK-141 TK-144 TK-145 SG-131	6	Piezas	20000	120,000
02	102	Indicador y controlador de velocidad para banda sin fin de SG-131.	1	Pieza	150000	150,000
02	103	Indicador y controlador de flujo con switch de alarma en bajo flujo para B-104 y B1-A y B.	2	Piezas	85000	85,000
02	104	Medidores de flujo tipo rotámetro en Al-316 para B-101 B-102 B-103 B-104 B-105 B-106 B-107 B-108 B-109 B1-B B1-A	11	Piezas	15,000	15,000
02	105	Medidor de presión de 0-50 # con selloquímico para B-101 B-102 B-103 B-104 B-105 B-106 B-107 B-108 B-109	9	Piezas	5,000	5,000



## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Cantidad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
03		INSTALACION EQUIPOS				
		Se considerara en horas hombre requeridas.	45,000	H.H.	125	5,750,000
		TOTAL STCA. 03				5,750,000
04		INSTALACION INSTRUMENTOS				
		Se considerara en horas hombre requeridas.	2,500	H.H.	200	500,000
		TOTAL STCA. 04				500,000
04		OBRA CIVIL				
		Se considerara el 35% de la inversión de equipos.				8,342,250
		TOTAL STCA. 04				
05		TUBERIAS Y ACCESORIOS				
05	101	Tubería de interconexión FVRP, 150 # 5" $\phi$ bridada	750	m.	600	450,000
05	102	Accesorios tubería 5" $\phi$	5	Lotes	20,000	100,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad :	Unidad	Precio unitario	TOTAL
05	103	Válvulas 5" A.I-316 bridadas, cheqs globo compuerta solenoides	50 5 60 10	Piezas Piezas Piezas Piezas	10,000 15,000 12,500 45,000	500,000 75,000 750,000 450,000
05	104	Tubería de A.C. 3/4" $\phi$ 150 #. Soldada	200	mts.	400	80,000
05	105	Accesorios tubería AC 3/4"	1	Lote	20,000	20,000
05	106	Tubería para ademe de conducción 24" $\phi$	25	m.	4,000	100,000
05	107	Tubería para ademe de protección de aguas dulces 13 3/8" $\phi$	300	m.	2,500	750,000
05	108	Tubería para ademe para evitar la mi- gración de efluentes contaminados a estratos superiores 10" $\phi$	1100	m.	1,500	1,650,000
05	109	Tubería para tubería de inyección 6 1/2 " $\phi$	1100	m.	2,000	2,200,000
05	110	Tubería para rejilla de infiltración 6 1/2 " $\phi$	150	m.	22000	3,300,000
05	111	Paquer ó reten y sellomecánico para tubería de inyección 6 1/2 " $\phi$	1	Pieza	100000	100,000
05	112	Accesorios para tubería de pozos de inyección.	10	Lotés	20,000	200,000
05	113	Mano de obra para instalación de es- ta tubería		H.H.		6,200,000
		TOTAL SCTA. 05				16,520,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Cantidad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
06		ELECTRICOS				
06	100	CONDUCTORES				
	100-1	Conductor en alta tensión con pantalla magnética.	600	m.	500	300,000
	100-2	Calibre 2/00	1,500	m.	120	180,000
	100-3	Calibre # 6	1,200	m.	50	60,000
	100-4	Calibre # 8	1,200	m.	40	48,000
	100-5	Calibre # 10	1,200	m.	20	24,000
	100-6	Calibre # 12	2,000	m.	15	30,000
	100-7	Calibre # 14	2,500	m.	10	25,000
	101	CONDUITS				
	101-1	Conduit 2 1/2" $\phi$ A1	500	m.	750	375,000
	101-2	Conduit 1 1/2" $\phi$ A1	500	m.	600	300,000
	101-3	Conduit 1" $\phi$ A1	1,000	m.	400	400,000
	101-4	Conduit 3/4" $\phi$ A1	1,500	m.	350	525,000
	101-5	Accesorios para conduits	10	lotes	20,000	200,000
		Mano de obra instalación				1,480,000
		TOTAL SCTA. 06				3,947,000

## ESTIMACION DE COSTOS

## PROYECTO POZO DE INYECCION

ENERO DE 1979

CUENTA	ITEM	CONCEPTO	Canti- dad	Unidad	Precio unitario	TOTAL
07		DRENAJES				
		Red de drenajes para las facilidades de superficie	1	Red	500,000	500,000
		TOTAL SCTA. 07				500,000
08		Perforación pozo profundo de inyección.	1	Lote	12000000	12,000,000
		TOTAL SCTA. 08				12,000,000
09		Otros; contingencias y refacciones 3% de la inversión total				2,160,000
		TOTAL SCTA. 09				2,160,000
		GRAN TOTAL				74,116,250

2. ESTIMACION DE COSTOS DE OPERACION

A. Materiales, Combustible y Servicios

a) Filtro ayuda (tierras diatomáceas)

Costo unitario = \$ 4,000.00 ton. métrica

Remoción de sólidos = 726.67 Kg/día

Filtro ayuda 30% 311.43

Remoción total: 1,038.10

Sobre flujo =  $1038.1 \times 1.15 = 1,193.815$

Consumo de filtro ayuda =  $1,193.815 \times 0.45 = 537.22$  Kg/día

Consumo anual =  $537.22 \times 360 \times 0.98 = 184$  ton.

Costo anual por filtro ayuda =  $184 \times 4,000 = 736,000$

Fletes =  $9 \times 20,000 = \$ 180,000.00$

TOTAL = \$ 916,000.00

b) Cartuchos

Costo por cartucho = \$ 165.00

Vida útil de c/cartucho = 25 días

# de cambios =  $\frac{350}{25} = 14$

# de cartuchos totales =  $345 \times 14 \times 1.2 = 5800$

Costo anual =  $5800 \times 165.00 = \$ 957,000.00$

Flete =  $3 \times 20,000 = \$ 60,000.00$

TOTAL = \$ 1,017,000.00

c) Combustible

bomba de inyección eq. con motor de C.I.

Tiempo de op. =  $0.25 \times 350 = 87.5$  días

Consumo de comb. =  $0.18$  Lts/H.P.

Potencia =  $400$  H.P.

Consumo anual =  $400 \times 0.18 \times 87.5 \times 24 = 151,200$  Lts

Costo diesel = \$  $1.00$  Ha.

Consumo anual = \$  $151,200.00$

Fletes =  $8 \times 5,000.00 = \$ 40,000.00$

TOTAL = \$  $191,200.00$

d) Electricidad

$$\text{Kwhr} = \frac{\text{Pot inst}}{0.746} \times 350 \times 24 \times 0.98$$

$$\text{Kwhr} = \frac{550}{0.746} \times 350 \times 24 \times 0.98$$

$$\text{Kwhr/año} = 6.07 \times 10^6 \text{ Kwhr}$$

Costo Kwhr = \$  $0.56$

Consumo anual = \$  $3,400,000$

e) Agua cruda

$Q = 756$  GPM

$t_{op} = 35$  min/8 hr.

$t_{op. \text{ anual}} = 35 \times 3 \times 350 \times 0.98 = 36,015$  min/año



$Q \text{ total} = 75 \times 36,015 = 2,701,125 \text{ Gal/Año} = 10,225,000 \text{ Hs/Año}$

$Q = 10,225 \text{ m}^3/\text{Año}$

Costo agua cruda = \$ 0.19

Costo Anual =  $0.19 \times 10,225,000 = \$ 1,142,750.00$

f) Aire para inst.

$2 \text{ ft}^3/\text{min}$  x cada valvula solenoide de 5"φ

10 valvulas solenoides

Consumo anual =  $10 \times 2 \text{ ft}^3/\text{min.} \times 0.5 \times 60 \times 24 \times 350 = 5,040,000 \text{ ft}^3/\text{año}$

Consumo anual =  $143,000 \text{ m}^3/\text{año}$ .

Costo aire = \$ 0.28

Costo anual =  $143,000 \times 0.28 = \$ 40,000.00$

## B. Salarios

	No.	\$ AÑO	LOS SALARIOS SON
Supervisor	1	275,000	LOS ESTIMADOS PARA
Ayudante supervisor	1	200,000	LA ZONA I.A (DEFI-
Operadores	6	750,000	NIDA EN EL DIARIO
Ayudantes de operadores	4	400,00	OFICIAL DEL 29 DE
Laboratorista	1	160,000	DICIEMBRE DE 1979
Personal de mantenimiento		300,000	ARTICULO 4, FRACCION
(40% mec. 40% eléctrico,			III.)
20% instrumentista, 40%			
tubero)			

TOTAL 2,385,000.00

RESUMEN COSTOS DE OPERACION POZO DE INEYCCION

DESCRIPCION	CONSUMO ANUAL	COSTO UNITARIO	TOTAL
<u>MATERIALES</u>			
Filtro ayuda (TD)	184 ton	\$ 4,000.00	736,000.00
Fletes	9	20,000.00	180,000.00
Cartuchos	5800	165.00	957,000.00
Fletes	3	20,000.00	60,000.00
Combustible (Diesel)	151.3 m <sup>3</sup>	1,000.00	151,200.00
Fletes	8	5,000.00	40,000.00
SUBTOTAL			2,124,200.00
<u>SERVICIOS</u>			
Electricidad	6,07x10 <sup>6</sup> Kwhr	0.56	3,400,000.00
Agua cruda	10,225 m <sup>3</sup>	0.20	2,045.00
Aire de instrumentuos	143000 m <sup>3</sup>	0.78	40,000.00
SUBTOTAL			3,442,045.00
<u>SALARIOS*</u>			
Supervisor	1		275,000.00
Ayudante supervisor	1		200,000.00
Obreros	6		750,000.00
Ayudante obreros	4		400,000.00
Laboratorista	1		160,000.00

DESCRIPCION	CONSUMO ANUAL	COSTO UNITARIO	TOTAL
Personal de Manto.			
40% Mecánico			85,700.00
40% Eléctrico			85,700.00
20% Instrumentista			42,000.00
40% Tubero			85,700.00
SUBTOTAL			2,084,100.00
GRAN TOTAL			7,650,345.00

\* IDEM A NOTA DEL PUNTO B DE ESTA ESTIMACION DE COSTOS DE OPERACION

Vol. = 2.35 Hs/Seg.

Vol. anual =  $72.63 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{Año}$

Costo anual de operación del sistema = \$ 7,650,345.00

COSTO UNITARIO =  $\$ \frac{7,650,345}{72630 \text{ m}^3}$

COSTO UNITARIO = 104.5 \$/m<sup>3</sup>

Ventas Netas = \$ 1200,000,000.00

INCREMENTO EN PRECIOS = 0.63%

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como consecuencia del conocimiento de esta tecnología para la disposición final de efluentes líquidos a través de pozos profundos de inyección, podemos concluir lo siguiente:

- A. Es una tecnología ampliamente probada en otros países como E.U.A., Inglaterra, Francia, U.R.S.S., etc. que permite disponer en forma final, efluentes líquidos altamente contaminados en forma segura siempre y cuando se observen las condiciones de diseño del sistema.
- B. Es una solución total y permanente que elimina efluentes líquidos altamente contaminados cuyo tratamiento superficial sería excesivamente costoso e ineficiente, ya que no lograría alcanzar las condiciones de calidad para poder cumplir con las legislaciones vigentes para prevenir y controlar la contaminación ambiental.
- C. Es factible que estos efluentes al ser eliminados a través de un sistema de inyección, reaccionen con la formación receptora y/o su fluido nativo, transformándose en productos inocuos, de sospecharse y/o comprobarse lo contrario debe de abandonarse en forma total el proyecto u operación del sistema.
- D. Es una solución con capacidad ilimitada para resolver problemas de contaminación ambiental siempre y cuando se reúnan y respeten las siguientes premisas.

1. Condiciones geológicas adecuadas para implemen  
tar este sistema.
  2. Se implemente, construya y opere un sistema de  
pretratamiento superficial adecuado.
  3. Se respeten las condiciones de operación previa  
mente establecidas.
  4. Siempre que se desee aumentar el flujo a inyectar,  
se deberán agotar los estudios de compatibilidad  
para determinar la factibilidad técnica de esta ex  
pansión.
- E. Es una solución con altos costos de inversión inicial pero  
con bajos costos de operación.
- F. Es una solución para la disposición de efluentes que permi  
te desarrollar las políticas de expansión de las empresas,  
siempre y cuando se respeten las condiciones de diseño, ago  
ten los estudios de compatibilidad y se respeten las condi-  
ciones de operación.
- G. Es una solución que permite reducir los costos de operación  
que se tienen como consecuencia de otros tratamientos de su  
perficie, tales como neutralización, destrucción de cianuros,  
oxidación biológica, osmosis, procesos de floculación, etc.  
ya que elimina el uso de reactivos químicos, y reduce los  
consumos de servicios (aire, agua, electricidad).

- H. Es un sistema que si se opera en forma satisfactoria puede tener OST del orden del 95 al 98%.
- I. Es un sistema que como todos los que se implementan para prevenir y controlar la contaminación ambiental en nuestro país, puede ser depreciada en forma acelerada su inversión inicial.
- D. Es una solución que de acuerdo a la legislación vigente en nuestro país para prevenir y controlar la contaminación ambiental originada por aguas residuales y a los criterios de las dependencias oficiales encargadas de la vigilancia, inspección y aplicar sanciones es un método autorizado para llevarse a la practica.

Como un corolario de esta serie de conclusiones, se puede terminar este trabajo, con las siguientes recomendaciones para las diferentes etapas del proyecto:

A. Recomendaciones para estudios preliminares

1. Se debera obtener un banco completo de información de la geología regional donde se pretenda localizar el pozo profundo de inyección.
2. Se deberan realizar los estudios fisicoquímicos que permitan caracterizar a cada uno de los efluentes que se desean inyectar, así como sus combinaciones, productos y subproductos.

3. Con la información obtenida en los puntos anteriores, se deba de realizar una evaluación superficial para determinar la factibilidad técnica económica para la implementación de este método de disposición final.
4. Si la evaluación resulta favorable, se prosigue con el desarrollo de la ingeniería.
5. Con la ingeniería completa se deba solicitar ante las dependencias oficiales el permiso de perforación correspondiente así como el respectivo permiso de aprobación para la operación del sistema.
6. Realizar la construcción, prueba y demostración del sistema.
7. Operar el sistema.

B. Recomendaciones de operación

1. Establecer y respetar las condiciones de operación establecidas en el diseño para las facilidades de superficie.
2. Monitorear en forma permanente la presión de inyección, el flujo de inyección así como la presión anular.
3. Optimizar al máximo la eficiencia de los equipos de facilidades de superficie.
4. Elaborar y establecer el uso de procedimientos de operación para cada equipo en particular y para todo el sistema en conjunto.

5. Conocer perfectamente las limitaciones de cada equipo en particular así como el global del sistema.
6. Perseguir la implementación de controles automáticos que eliminan los riesgos de falla de tipo humano.
7. Establecer y llevar a cabo un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de acuerdo a las necesidades.
8. Borrar de la mente del personal que ahí labore la idea de que este sistema es un basurero subterráneo.



## VIII. BIBLIOGRAFIA

- Advanced water pollution control  
Physical and Chemical waste water treatment, sludge  
Handling and disposal  
College of Engineering  
The University of Texas at Austin, 1977
  
- Carl E. Adams Jr., and W. Wesley Eckenfelder Jr.  
AWARE, 1974  
Enviro press Inc.
  
- Collins A.G.  
Geochmentry of oil field waters  
Elsevier Publishing Co.  
New York, 1966
  
- Daves S.M. and Dewisst R.J.M.  
Hidrogeology  
John Wiley and Sons, Inc.  
New York, 1966
  
- Dean B.T.  
Design and operation of a deep well disposal system  
Water Pollution Control Federation Control Journal  
Vol. 37, No. 2, 1965

- Estudio de Reflexión en la Cuenca Salina del Istmo de Tehuantepec.  
Petroleos Mexicanos  
Superintendencia de Exploración Zona Sur.  
Coatzacoalcos, Ver.
- Hundley, C.L. and Matulis, J.T.  
Deep well disposal of industrial waste by F.M.C. Corp.  
Industrial water and waste, 1962
- Katz, D.L. and D.L. Coats  
Underground Storage of Fluids  
Ulrichs Books, Inc.  
Ann Arbor, Michigan, 1968
- Kerr, S. Robert  
An Introduction to the Technology of Subsurface Waste Water Injection.  
National Technical Information Service, 1977
- Liptak, Vol. I  
Environmental Engineers Hand Book  
Chilton, 1976
- Lohman, S.W.  
Ground Water Hydraulics  
U.S. Geological Survey Prof. 1972

- Mac Leod, I.C.  
Disposal of Spent Caustic and Phenolic Water in Deep Wells.  
8 th. Ontario Industrial Waste Conference Proc. 1961
  
- Mecham, D.E., and Garret, J.H.  
Deep Injection Disposal well for Liquid Toxic Wastes  
American Society Civil Engineers Proceedings  
Journal Construction Div., 1963
  
- Metcalf and Eddy  
Waste Water Engineering  
Mc. Grow Hill Book Co.,
  
- Moore, P.L.  
Drilling Practices Manual  
The Petroleum Publishing Company  
Tulsa, Oklahoma, 1964
  
- Ostroot, G.W. and Donaldson, A.L.  
Subsurface Disposal of Acidic Effluents  
1970 Evangeline Section Regional Meeting of the Society  
of Petroleum engineers of AIME,  
Lafayette, La., 1970
  
- Paradiso, S.J.  
Disposal of fine Chemical Waste  
Industrial Waste Conference No. 10, 1955  
Purdue University, Engineering Extension Service

- Rima, Donald R., Chase, Edith B. and Myers, Beverly  
Subsurface Water Disposal by Means of Wells  
U. S. Geological Survey Water Supply  
Washington, D. C., 1971
  
- Smith, D. K.  
Cementing  
Society of Petroleum Engineers Monography, Vol. 4,  
Society of Petroleum Engineers of AIME  
New York, 1976
  
- Talbot, J. S.  
Some basis factors in the consideration and installation  
of Deep Well Disposal Systems  
W. & S. W., 1968
  
- Van Everdingen, A.F.  
Fluid Mechanics of Deep Well Disposals in Surface  
Disposal in Geologic basins, a study of Reservoir Strata  
J. E. Galley ed. AA PGM, 1968
  
- Veslind  
Treatment and disposal of water waste sludge  
Ann Arbor, Science

- Warner, D. L.

Deep Well Ineyction of Liquid Waste,

U. S. Public Health Service,

Division of Water Supply and Pollution Control

Cincinnati, Ohio, 1965

150h