

01121  
16



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS  
COMO SOLUCIÓN A SU  
SOBREEXPLOTACIÓN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A N :

**RAFAEL BELTRÁN MOLINA**

**GERARDO ESPINOSA DE LOS MONTEROS REBOLLEDO**



ASESOR: ING. MIGUEL A. GONZÁLEZ LÓPEZ

MÉXICO, D. F.

2003



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/158/02

Señores  
RAFAEL BELTRÁN MOLINA  
GERARDO ESPINOSA DE LOS MONTEROS REBOLLEDO  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS COMO SOLUCIÓN A SU SOBREENPLOTAÇÃO"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. LEGISLACIÓN EN MATERIA DE AGUAS  
CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PRINCIPALES DE LOS ACUÍFEROS
- III. TÉCNICAS DE RECARGA DE MANTOS ACUÍFEROS
- IV. ANÁLISIS PARA SELECCIONAR LA TÉCNICA DE RECARGA  
CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universidad a 30 Octubre 2002.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

B

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*Agradecemos:*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México*

*Por abrirnos las puertas y brindarnos los conocimientos para desarrollarnos como Profesionistas.*

*A los Profesores de la Facultad de Ingeniería.*

*Porque gracias a su labor y dedicación nos ayudaron a lograr ésta meta, siendo uno de los anhelos más importantes de nuestra vida.*

*Al Ing. Miguel Ángel González López.*

*Quien nos cedió gran parte de su tiempo para la revisión y asesoría en la realización de éste trabajo.*

*A los Compañeros Anónimos de la F. I.:*

*A todos aquellos que a pesar de no ser mencionados en esta dedicatoria, estuvieron presentes en algún momento con nosotros. Gracias.*

*A la Ing. Julia Ribera Jaramillo.*

*Quien nos apoyo de manera significativa en la culminación de éste trabajo. Gracias*

*Nuestros Amigos:*

*Gabriela V, Leslie P, Enrique M, David R, quienes nos ayudaron en la impresión, captura y edición de éste trabajo. Gracias.*

*Gerardo & Rafael*

C

*Dedico ésta Tesis a:*

**A Dios.**

*Por darme la gran oportunidad de vivir.*



**A mis Padres: Concepción y Alberto.**

*Por otorgarme su confianza, amor, cariño, comprensión y por guiarme siempre por el mejor camino. LOS AMO. Mil Gracias.*

**A la Familia: Rodríguez Espinoza de los Monteros.**

*Por todo el apoyo incondicional hoy y siempre y por ese gran ejemplo que ha sido mi guía. Gracias.*

**A la Familia: Quintero Mármo Espinosa de los Monteros.**

*Por todos aquellos momentos que hemos pasado juntos y por darme la mayor de las alegrías que son Desireé y Daniel, espero ser un buen ejemplo para ellos. Gracias.*

**A mis Hermanos Alberto y Jorge.**

*Que gracias a sus consejos, enseñanzas y ejemplo, he logrado cumplir ésta meta. Gracias.*

**A Rafael.**

*Quien me ha apoyado en todo momento y brindado su amistad en todo éste trayecto, siendo alguien con quien se puede contar y por todos aquellos grandes momentos que hemos pasado juntos y espero que puedan llegar a ser muchos más. Gracias AMIGO.*

Gerardo

D

*Dedico ésta Tesis a:*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*A mis padres.*

*Por darme la vida, amado a su cariño haber tomado la decisión correcta y con su guía haber dado uno de los pasos más importante de mi camino. Gracias.*

*A mis hermanos.*

*Por haber recibido su apoyo en los momento más difíciles de la carrera y haberme ofrecido su comprensión cuando la necesite.*

*A Sara.*

*Por ser mi amiga, y haber estado en los momentos que necesite de una persona y haberme brindado su apoyo incondicional..*

*A la familia Locta Molina.*

*Por haberme ofrecido su cariño y haberme aceptado como un integrante más de su familia.*

*A Gerardo.*

*Por haberme enseñado el valor de la amistad y haber confiado en mí en todo momento de nuestro larga andar.*

Rafael

E

Descripción	Página
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	i
<b>1. LEGISLACIÓN EN MATERIA DE AGUAS</b>	
1.1. Artículo 27 Constitucional .....	4
1.2. Ley de Aguas Nacionales .....	6
1.3. Ley Federal de Derechos del Agua .....	15
1.4. Normas Oficiales Mexicanas .....	18
<b>2. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PRINCIPALES DE LOS ACUÍFEROS</b>	
2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS .....	21
2.1.1. Porosidad .....	21
2.1.2. Permeabilidad .....	25
2.1.3. Gradiente Hidráulico .....	26
2.1.4. Contenido de Agua y Grado de Saturación .....	28
2.1.5. Ley de Darcy .....	29
2.1.6. Zona Saturada y Zona No Saturada .....	31
2.2. TIPOS DE ACUÍFEROS .....	34
2.2.1. Según el Tipo de Acuífero .....	35
2.2.2. Según las Propiedades Físicas de las Rocas .....	36
2.2.3. Según las Condiciones Hidráulicas y Posición Estructural del Terreno .....	38
2.2.4. Según la Zona en que se Ubican .....	43
2.3. PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS .....	45
2.3.1. Almacenamiento Específico .....	45
2.3.2. Coeficiente de Almacenamiento .....	47
2.3.3. Transmisibilidad .....	48
2.3.4. Permeabilidad o Conductividad Hidráulica .....	51
2.4. FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO .....	54
2.4.1. Inicial .....	54
2.4.2. Intermedio .....	55
2.4.3. Avanzado .....	55
<b>3. TÉCNICAS DE RECARGA DE MANTOS ACUÍFEROS</b>	
3.1. PROBLEMÁTICA NACIONAL DEL USO Y MANEJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA .. 57	
3.1.1. La Escasez de Agua en México .....	58
3.1.2. Agua Subterránea .....	64
3.1.3. Contaminación del Agua Subterránea .....	65
3.1.4. Prevención y Corrección de la Contaminación .....	78

3.2. REGIONALIZACIÓN .....	79
3.2.1.Regionalización en México .....	83
3.2.2.Regionalización en el Valle de México .....	104
3.3. USOS DEL AGUA .....	106
3.3.1.Uso de Consumo .....	107
3.3.2.Uso Agrícola .....	107
3.3.3.Uso Industrial .....	108
3.3.4.Uso de Generación de Energía Eléctrica .....	109
3.3.5.Acuacultura y Pesca .....	110
3.3.6.Turismo y Navegación .....	110
3.4. SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS .....	111
3.4.1.Grados de Sobreexplotación .....	115
3.4.2.Efectos de la Sobreexplotación .....	117
3.5. TIPOS DE RECARGA .....	124
3.5.1.Recarga Natural .....	124
3.5.2.Recarga Inducida o Accidental .....	125
3.5.3.Recarga Artificial .....	126
3.6. TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL .....	128
3.6.1.Métodos Superficiales Directos .....	129
3.6.2.Métodos Subsuperficiales Directos .....	132
3.6.3.Recarga por Combinación Subsuperficial-Superficial .....	136
3.6.4.Métodos Indirectos .....	137
3.6.5.Fases de la Recarga .....	139
3.7. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RECARGA .....	141
3.7.1.Estudios Preliminares .....	141
3.7.2.Calidad del Agua de Recarga .....	142
3.7.3.Colmatación .....	144
3.8. METODOLOGÍA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL .....	147
3.9. DISEÑO POR MEDIO DE MODELACIÓN DE LA TÉCNICA DE RECARGA .....	151
3.10 APLICACIONES DEL MÉTODO DE RECARGA ARTIFICIAL .....	165
3.10.1 Proyectos Realizados en México .....	167
4. ANÁLISIS PARA SELECCIONAR LA TÉCNICA DE RECARGA .....	
4.1. EVALUACIÓN TÉCNICA .....	191
4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	194
CONCLUSIONES .....	198
BIBLIOGRAFÍA .....	202

CUADROS

- Cuadro 1.1 Legislación en Materia de Aguas.
- Cuadro 1.2 Artículos de la Ley de Aguas Nacionales.
- Cuadro 1.3 Artículos de la Ley Federal de Derechos del Agua.
  
- Cuadro 2.1 Intervalos de Porosidad en Suelos Sedimentarios.
- Cuadro 2.2 Grados de Permeabilidad en los Suelos.
- Cuadro 2.3 Diferencias entre Zona Saturada y no Saturada.
- Cuadro 2.4 Clasificación de los Acuíferos.
- Cuadro 2.5 Valores medios del Coeficiente de Almacenamiento.
  
- Cuadro 3.1 Disponibilidad de Agua Subterránea en México.
- Cuadro 3.2 Parámetros del Índice de Calidad del Agua según su importancia relativa.
- Cuadro 3.3 Calidad del aguas subterráneas en México.
- Cuadro 3.4 Índice de calidad según el uso del agua
- Cuadro 3.5 Condiciones de explotación acuífera.
- Cuadro 3.6 Número de acuíferos por regiones administrativas.
- Cuadro 3.7 Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina.
- Cuadro 3.8 Efectos colaterales de la sobreexplotación de acuíferos.
- Cuadro 3.9 Metodología para la recarga artificial.
- Cuadro 3.10 Metodología para la recarga de acuíferos por inyección.
- Cuadro 3.11 Cálculo del flujo subterráneo para el subsistema Ciudad de México.
- Cuadro 3.12 Cálculo del flujo subterráneo para el subsistema Valle de Chalco.
- Cuadro 3.13 Cálculo del flujo subterráneo para el subsistema Texcoco.
- Cuadro 3.14 Extracciones en los subsistemas.
- Cuadro 3.15 Cambio de almacenamiento para los subsistemas.
- Cuadro 3.16 Drenado vertical de los subsistemas.
- Cuadro 3.17 Porcentaje de sobreexplotación de los subsistemas.
- Cuadro 3.18 Cuadro resumen del Balance Hidrológico.
  
- Cuadro 4.1 Comparativo de costos en un proyecto de recarga.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

TESIS CON  
FIGURAS FALLA DE ORIGEN

- Figura 2.1 Relación entre volumen de sólidos y de vacíos.  
Figura 2.2 Porosidad que se presenta en las arcillas.  
Figura 2.3 Relación entre porosidad y permeabilidad y su granulometría.  
Figura 2.4 Representación del gradiente hidráulico.  
Figura 2.5 Experimento de Henry Darcy.  
Figura 2.6 Zona saturada y zona no saturada en un suelo.  
Figura 2.7 Clasificación de los acuíferos.  
Figura 2.8 Acuífero confinado que pasa a libre durante un bombeo.  
Figura 2.9 Acuífero que se encuentra confinado en algunas zonas y en otras libre.  
Figura 2.10 Acuífero libre en zona de descarga con componentes de flujo ascendente.  
Figura 2.11 Acuífero confinado simple.  
Figura 2.12 Surgencia a favor de trampa tectónica.  
Figura 2.13 Acuífero semiconfinado simple.  
Figura 2.14 Acuífero semiconfinado complejo.  
Figura 2.15 Acuífero colgado.  
Figura 2.16 Transmisibilidad de un acuífero confinado.  
Figura 2.17 Transmisibilidad de un acuífero no confinado.  
Figura 2.18 Relación de profundidad con el contenido del agua.
- Figura 3.1 Desequilibrio en la distribución del agua.  
Figura 3.2 Distribución en la extracción total nacional.  
Figura 3.3 Tendencia del crecimiento poblacional en México.  
Figura 3.4 Carta hidrológica de Baja California Sur.  
Figura 3.5 Regionalización del agua a nivel nacional.  
Figura 3.6 Región I "Península de Baja California".  
Figura 3.7 Distribución del agua en la Región I.  
Figura 3.8 Región II "Noroeste".  
Figura 3.9 Distribución del agua en la Región II.  
Figura 3.10 Región III "Pacífico Norte".  
Figura 3.11 Distribución del agua en la Región III.  
Figura 3.12 Región IV "Balsas".  
Figura 3.13 Distribución del agua en la Región IV.  
Figura 3.14 Región V "Pacífico Sur".  
Figura 3.15 Distribución del agua en la Región V.  
Figura 3.16 Región VI "Río Bravo".

- Figura 3.17 Distribución del agua en la Región VI.  
Figura 3.18 Región VII "Cuencas Centrales del Norte".  
Figura 3.19 Distribución del agua en la Región VII.  
Figura 3.20 Región VIII "Lerma Santiago-Pacífico".  
Figura 3.21 Distribución del agua en la Región VIII.  
Figura 3.22 Región IX "Golfo Norte".  
Figura 3.23 Distribución del agua en la Región IX.  
Figura 3.24 Región X "Golfo Centro".  
Figura 3.25 Distribución del agua en la Región X.  
Figura 3.26 Región XI "Frontera Sur".  
Figura 3.27 Distribución del agua en la Región XI.  
Figura 3.28 Región XII "Península de Yucatán".  
Figura 3.29 Distribución del agua en la Región XII.  
Figura 3.30 Región XIII "Valle de México".  
Figura 3.31 Regionalización en el Valle de México.  
Figura 3.32 Acuíferos con problemas en la República Mexicana.  
Figura 3.33 Evolución de los hundimientos de la Ciudad de México.  
Figura 3.34 Cuña de agua salada en un acuífero costero.  
Figura 3.35 Cono de agua salada debajo de extracciones.  
Figura 3.36 Representación esquemática de la cuña de agua salada.  
Figura 3.37 Desarrollo de un pozo costero al paso del tiempo.  
Figura 3.38 Recarga por zanjas.  
Figura 3.39 Recarga por balsas.  
Figura 3.40 Recarga con doble sistema de balsas.  
Figura 3.41 Dispositivo de recarga con bomba instalada.  
Figura 3.42 Esquema de los pozos de recarga.  
Figura 3.43 Combinación de balsas y pozos de recarga.  
Figura 3.44 Preparación del cauce aumentando el recorrido del Río.  
Figura 3.45 Preparación del cauce inundándolo a lo ancho.  
Figura 3.46 Las fases de la recarga artificial.  
Figura 3.47 Malla generada por el programa de cómputo.  
Figura 3.48 Modelo isométrico del funcionamiento del acuífero del Valle de México.  
Figura 3.49 Isométrico general del Valle de México.  
Figura 3.50 Esquema de la dirección del flujo subterráneo.  
Figura 3.51 Componentes de los pozos de inyección y extracción.  
Figura 3.52 Corte de pozos de inyección y extracción.  
Figura 3.53 Componentes del pozo de inyección.  
Figura 3.54 Profundidad de los pozos de inyección.



- Figura 3.55 Esquema de una presa de infiltración.  
Figura 3.56 Localización de los pozos usando agua tratada.  
Figura 3.57 Modelo de recarga del acuífero.  
Figura 3.58 Características estructurales del pozo SC-6.  
Figura 3.59 Características del pozo SC-6 Color y Turbiedad  
Figura 3.60 Localización de pozos de monitoreo.  
Figura 3.61 Corte de terminación de los pozos de monitoreo.  
Figura 3.62 Brocal del pozo de monitoreo.  
Figura 3.63 Sección mostrando los pozos de monitoreo y recarga.  
Figura 3.64 Comportamiento del acuífero a la recarga.  
Figura 3.65 Comportamiento de la prueba de inyección.  
Figura 3.66 Sobreexplotación acuífera a través del Balance Hidrológico.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable en el país, los problemas de sobreexplotación de acuíferos en muchas zonas, así como otras actividades antropogénicas, han ocasionado el deterioro de la calidad del agua en algunos sitios. De igual forma estas aguas son de gran importancia para la agricultura, industria, comercio y servicios. Existe evidencia de que un número significativo de acuíferos que cubren el territorio nacional están siendo sobreexplotados o se encuentran muy cercanos a sus niveles máximos de extracción.

La Ciudad de México enfrenta el reto del continuo crecimiento de su población, que demanda cada día mayores volúmenes. Los niveles del acuífero se están abatiendo con rapidez, un metro al año en promedio, al extraérseles entre 30 y 65% más agua que la que reciben como recarga. Casi toda su recarga fluye de las montañas que rodean a la Ciudad, hacia la parte central del Valle.

Lo anterior se debe al incremento en las demandas de agua de los diversos sectores de usuarios, la falta de medición y de sistemas de control de las extracciones del subsuelo, el desconocimiento de las disponibilidades de agua y de balances hidráulicos de los acuíferos y la ausencia de infraestructura hidráulica que propicie y facilite la recarga. A su vez, la demanda es resultado del incremento demográfico, expansión de las ciudades, crecimiento y diversificación de la industria y los servicios y al aumento de la frontera agrícola de riego.

La sobreexplotación del acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), comprende al volumen de agua perdido por el acuífero el cual está representado por el cambio de almacenamiento, más el volumen de drenado vertical de las arcillas, que también es agua perdida por el subsuelo. La relación de estos parámetros con la entrada por flujo subterráneo indica el porcentaje de sobreexplotación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La magnitud de la sobreexplotación del acuífero del Valle de México es del 25% para el Subsistema de la Ciudad de México; 53% para el Subsistema de Texcoco, y 19% para el subsistema Valle de Chalco.

La irregularidad en la distribución en los recursos hidráulicos, el constante desarrollo del consumo del agua, la contaminación considerable en las aguas subterráneas, su intensa extracción en las regiones económicamente más desarrolladas, la deficiencia existente de aguas dulces potables y otros factores provocan la necesidad de emplear métodos de reposición o recarga artificial y de regulación de las reservas de las aguas subterráneas. La recarga artificial de las aguas subterráneas es una medida de ingeniería consistente en asegurar las condiciones favorables para disponer parte de los escurrimientos superficiales en escurrimientos subterráneos, siendo una tarea de muchos aspectos que asegura no sólo la reposición de las reservas de aguas subterráneas y su protección contra el agotamiento, sino también la utilización más integral, racional y la protección de los recursos hidráulicos, los suelos y otros recursos naturales.

El presente trabajo pretende dar una idea general de la recarga de acuíferos en México; la condición actual en la que se encuentra el país en éste ámbito, además se detallarán las leyes con que cuenta nuestra nación para hacer cumplir las normas y reglamentos en cuanto a materia de aguas se refiere, los conceptos básicos que se relacionan con los acuíferos así como sus características, también se mostrarán los métodos que existen para combatir los problemas más comunes que enfrenta el país como sería el caso de la intrusión salina y la sobreexplotación de los acuíferos. A su vez se describirán proyectos realizados en nuestro país para enfrentar estos problemas.

En el primer capítulo se hablará acerca de las políticas y leyes que reglamentan a las aguas nacionales fijadas en la Constitución Política de México, haciendo hincapié que éstas leyes han sido sustituidas paulatinamente con el paso de los años, dando origen a otras leyes especializadas como el caso de la Ley de Aguas Nacionales, haciendo valer su normatividad a través de su

Reglamento, por otra parte también se hablará de la Ley Federal de Derechos del Agua, de igual manera se muestra un panorama de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, su aplicación y las normas que se encuentran en proceso de aprobación.

En el segundo capítulo se dará un panorama de los parámetros más importantes en el estudio de los suelos como sería la permeabilidad, conductividad, coeficiente de almacenamiento, gradiente hidráulico, porosidad, entre otros, dado que en todo estudio vinculado con los suelos, éstos parámetros juegan un papel muy importante, se mostrarán los diferentes tipos y propiedades de los acuíferos dependiendo de las zonas en que se encuentran así como de las características de las rocas que los forman, además se abarcarán aspectos acerca de su funcionamiento durante el transcurso de la explotación acuífera.

El tercer capítulo, es el más significativo e importante del presente trabajo, ya que se dará una visión de la problemática actual del uso y manejo del agua subterránea, detallando a su vez las regiones administrativas, en que se ha dividido el territorio nacional, y la regionalización del Valle de México, dado que se hablará de la problemática del agua, no podría quedar sin mencionarse los diversos usos a los que las aguas se destinan en México, y por supuesto los problemas ocasionados por una explotación excesiva de los acuíferos mexicanos, se mostrarán las técnicas de recarga, a través de las diversas modalidades existentes, como son superficiales, subsuperficiales, mixtos, directos e indirectos.

De igual forma se detallarán todos los estudios preliminares necesarios para la realización de una recarga artificial, se presentará una metodología básica de lo que consiste una recarga artificial en forma general y una recarga artificial por inyección, Se mostrará como la tecnología ha formado un papel importante en la modelación de flujos subterráneos, en donde se citarán programas de cómputo que desarrollan ésta actividad, se mostrarán las principales aplicaciones en México de algunas técnicas de recarga, se presentarán algunos proyectos que se

han realizado en México, los cuales tienen por objeto solucionar los problemas ocasionados por la extracción excesiva de las aguas subterráneas, se presentará el proceso de análisis de la obtención de un Balance Hidrológico, que es pieza fundamental en un proyecto de recarga artificial, y finalmente se describirá un proyecto realizado en la Ciudad de Mérida para la mitigación de la intrusión salina que se presenta en la región.

En el capítulo cuarto se detallarán de manera general los aspectos más importantes que son necesarios en un proyecto de recarga artificial, los cuales servirán para poder definir cual es la técnica más apropiada según las condiciones que se tengan presentes, se mostrará el desarrollo del estudio de factibilidad comparado con los aspectos económicos que intervienen en un proyecto y se describirán características relevantes en la determinación del mejor método de recarga artificial, además de mostrar un comparativo entre los aspectos a considerar en cada uno de los métodos ya sea superficial o subterráneo.

## **CAPÍTULO I**

### **LEGISLACIÓN EN MATERIA DE AGUAS**

Los aspectos legales de las aguas subterráneas se encontraban enmarcados en una serie de ordenaciones anteriores a 1917, éstas ordenaciones estaban enfocadas únicamente al agua superficial como era caso de la Ley sobre Vías Generales de Comunicación de 1888 que se refería únicamente a las aguas navegables y concesiones de energía, los decretos de Concesiones de Agua de Riego e Industria de 1894, y 1896 revalidaron las concesiones otorgadas por los gobiernos de los estados para la utilización de aguas federales.

En los códigos sanitarios de 1891 y 1894, y los códigos y leyes mineras de 1884, 1892, 1909 se aborda en materia, a quienes correspondía el manejo de las aguas, al paso del tiempo se fueron conjuntando diversas necesidades, puntos de vista, y experiencias, y el 13 de diciembre de 1910 se creó la Ley sobre Aprovechamiento de Aguas de Jurisdicción Federal, manteniéndose ésta, hasta la legislación de 1917 que involucra ya las aguas subterráneas.

Siguiendo un orden cronológico fue decretada la Ley de Aguas de Propiedad Nacional en 1934, seguida por la Ley de Aguas de Propiedad Nacional en 1945, que nunca entró en vigor, y cuya vigencia se condicionó a la expedición de su correspondiente reglamento, mismo que nunca fue publicado, en 1947 con la creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos se estableció la Ley Reglamentaria, que establece "el libre alumbramiento y apropiación de las aguas subterráneas por los dueños de la superficie, excepto cuando se afectara el interés público o los aprovechamientos existentes".

El 29 de diciembre de 1956 fue expedida la nueva Ley Reglamentaria en materia de aguas subterráneas derogando la anterior de 1947, y que tuvo vigencia hasta 1972. El Artículo 11 del Reglamento de la Ley de 1956 clasificaba a las zonas de veda en tres categorías: la primera se consideraba que ya no era posible

umentar las extracciones sin peligro de abatir seriamente o agotar los mantos acuíferos, en la segunda se incluían aquellas zonas en las que la capacidad de los acuíferos permitía solamente extracciones para uso doméstico, mientras que la tercera zona estaba referida a que la potencialidad de los acuíferos permitía extracciones limitadas para toda clase de usos, posteriormente se denominó veda rígida, flexible, y controlada respectivamente.

Es conveniente señalar que en 1972, entró en vigor la nueva Ley Federal de Aguas con la intención de, "regular la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas propiedad de la Nación, incluidas aquellas del subsuelo libremente alumbradas, mediante obras artificiales, para que se reglamente su extracción, utilización y veda conforme lo exija el interés público".

Previamente se revisaron varias leyes y reglamentos, de tal manera que se promulgara una sola ley que hiciera un reparto equitativo de la riqueza pública y cuidar de su conservación, pues era necesario vincular los ordenamientos en materia agraria, industrial, sanitaria y de contaminación, en dicha ley la Secretaría de Recursos Hidráulicos debería contemplar la relación de servicios como; a) usos domésticos, b) servicios públicos urbanos, c) ganadería, d) riego de terrenos ejidales y comunales, e) industrias, primero la de generación de energía y luego la de servicio público, f) acuicultura, g) generación de electricidad para servicio privado, h) lavado de terrenos, i) otros.

Dicha Ley desapareció debido a incongruencias jurídicas y a la imposibilidad técnica para fijar en los reglamentos un buen número de zonas de veda, y volúmenes de extracción autorizados, debido a la falta de estudios geohidrológicos que determinarían el potencial de los acuíferos, favoreciendo únicamente la prioridad de otorgar permisos para perforación de acuerdo a la relación de usos y servicios antes mencionados.

El 7 de agosto de 1986 fue creado el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), cuyas atribuciones son: desarrollar la tecnología y recursos humanos calificados que sean necesarios para asegurar el aprovechamiento y manejo racional e integral del agua a corto, mediano y largo plazo.

El 10 de abril de 1989 con la creación de Comisión Nacional del Agua se le asignaron las atribuciones de normar, programar, estudiar, proyectar, construir, administrar, operar, conservar y rehabilitar obras de riego y apoyar a gobiernos estatales, municipales, y particulares en el estudio, proyecto y ejecución de obras de infraestructura hidráulica.

En diciembre de 1992 fue promulgada la Ley de Aguas Nacionales que se complementa con su correspondiente Reglamento decretado en 1994, esta ley vino a sustituir la Ley Federal de Aguas de 1972, en el Reglamento de Aguas Nacionales se aprecia un conjunto de procedimientos sencillos y ágiles en beneficio de los usuarios que dan certeza y seguridad jurídica, así mismo facilita las disposiciones de la ley, consolidando a la Comisión Nacional del Agua (CNA) como única autoridad ejecutiva en la materia.

En nuestro país, la normatividad tiene su origen en nuestra Carta Magna, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en la que en su Artículo 27 norma la propiedad, cuidado y conservación de las aguas y recursos nacionales, del dicho Artículo se deriva la Ley de Aguas Nacionales por ser propiedad de la Nación, y de ésta ley se derivan los Reglamentos, así tenemos el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.

De los Reglamentos se derivan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) como pueden ser las que establecen las características de las descargas a los cuerpos receptores y también determinan las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua potable. En el cuadro 1.1 se muestra la historia de la legislación en materia de aguas

**Cuadro 1.1 Legislación en Materia de Aguas**

INSTITUCION	ENFOQUE	AÑOS	MARCO LEGAL
Comisión Nacional de Irrigación	Fomentar la producción agrícola mediante la construcción de infraestructura hidroagrícola	1926-1946	Ley sobre irrigación con Aguas Federales (1926)  Ley de Aguas de Propiedad Federal (1934)
Secretaría de Recursos Hidráulicos	Marca una acción más amplia para el desarrollo integral de los recursos hidráulicos.  Se establecen las Comisiones Ejecutivas en las principales cuencas	1947-1976	Ley reglamentaria del párrafo V Constitucional en materia de aguas del subsuelo (1947)  Ley de Riegos (1947)  Ley General de Ingeniería Sanitaria (1948)  Ley Federal de Aguas (1972) Ley Federal de Derechos (1982)
Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH)	Fortalecimiento de la infraestructura Hidroagrícola en la producción de alimentos	1976-1994	Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas de Infraestructura Hidroagrícola (1986)
Comisión Nacional del Agua	Órgano desconcentrado de la SARH. Su enfoque es el desarrollo sustentable del agua	1989-1994	Ley de Aguas Nacionales "LAN" (1992)  Reglamento de la LAN (1994)
Comisión Nacional del Agua	Con la sectorización en la SEMARNAP, tiende a la instrumentación de una nueva política del agua, con un enfoque ambiental	1995-2000	Modificaciones al Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (1997)

Fuente: Datos obtenidos de las memorias del XVI Congreso Nacional de Hidráulica.

## 1.1 ARTÍCULO 27 CONSTITUCIONAL.

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, de acuerdo al Capítulo I de las Garantías Individuales en su Artículo 27 establece que *"La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada"*.

De igual manera determina que *"corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos,*

constituyan depósitos cuya naturaleza sea distinta de los componentes de los terrenos, tales como los minerales de los que se extraigan metales y metaloides utilizados en la industria; los yacimientos de piedras preciosas, de sal de gema y las salinas formadas directamente por las aguas marinas”.

Detalla que “Son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanentemente o intermitentemente con el mar; la de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquellas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República, de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino, de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas, los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley”.

Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos; el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional.

## 1.2. LEY DE AGUAS NACIONALES.

A continuación en el cuadro 1.2 se muestran los Artículos que dentro de la Ley de Aguas Nacionales tienen relación con los acuíferos, y aguas subterráneas.

Cuadro 1.2 Artículos de la Ley de Aguas Nacionales

Ley de Aguas Nacionales	Título Primero	Capítulo Único	Artículo 1
			Artículo 2
			Artículo 3
	Título Segundo	Capítulo I	Artículo 4
			Artículo 6
			Artículo 7
			Artículo 9
			Artículo 16
	Título Cuarto	Capítulo I	Artículo 18
			Artículo 19
			Artículo 20
			Artículo 24
			Artículo 32
	Título Quinto	Capítulo Único	Artículo 38
			Artículo 39
			Artículo 41
			Artículo 42
			Artículo 43
	Título Sexto	Capítulo I	Artículo 44
Artículo 47			
Artículo 64			
Artículo 81			
Título Séptimo	Capítulo Único	Artículo 85	
		Artículo 86	
		Artículo 88	
Título Octavo	Capítulo IV	Artículo 91	
		Artículo 112	
Título Décimo	Capítulo I	Artículo 119	

**TÍTULO PRIMERO**  
**DISPOSICIONES PRELIMINARES**  
**CAPÍTULO ÚNICO**

*Art. 1º La presente Ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales, es observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público y de interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, distribución y control, así como la preservación en cantidad y calidad para lograr su desarrollo sustentable.*

*Art. 2º Las disposiciones de esta Ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo, y a los bienes nacionales que la ley señala.*

*Art. 3º Para efectos de esta Ley se entenderá por*

*FRACC. I.- "Aguas Nacionales", las aguas propiedad de la Nación, en los términos del párrafo quinto del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*

*FRACC. II.- "Acuífero", cualquier formación geológica por la que circulan o almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.*

**TÍTULO SEGUNDO**  
**ADMINISTRACIÓN DEL AGUA**  
**CAPÍTULO I**  
**DISPOSICIONES GENERALES**

*Art. 4º La autoridad y administración en materia de aguas nacionales inherentes corresponde al Ejecutivo Federal, quien la ejercerá directamente a través de la "Comisión".*

**CAPÍTULO II  
EJECUTIVO FEDERAL**

**Art. 6° Compete al Ejecutivo Federal:**

*Fijar los volúmenes de extracción y utilización de aguas nacionales, según el Artículo 38 de la Ley de Aguas Nacionales, que establece las zonas de veda o de reserva de aguas en los siguientes casos:*

- FRACC. I.- Para prevenir o remediar la sobreexplotación de los acuíferos;*
- FRACC. II.- Para proteger o restaurar un ecosistema;*
- FRACC. III.- Para preservar fuentes de agua potable o protegerlas contra la contaminación;*
- FRACC. IV.- Para preservar y controlar la calidad del agua; o*
- FRACC. V.- Por escasez o sequía extraordinarias.*

*De igual manera en el Artículo 41 de la Ley de Aguas Nacionales establece que "el Ejecutivo Federal tiene la autoridad para levantar o decretar como reserva total o parcial de las aguas nacionales para usos específicos".*

**Art. 7° Se declara utilidad pública:**

- FRACC. II.- La protección, mejoramiento y conservación de las cuencas, acuíferos, cauces, vasos y demás depósitos de propiedad nacional así como la infiltración de aguas para reabastecer mantos acuíferos y la derivación de las aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras.*
- FRACC. IV.- Restablecer el equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, incluidas las limitaciones de extracción, de vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo al uso doméstico.*

**CAPÍTULO III  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

**Art. 9º Son atribuciones de "La Comisión":**

**Administrar y custodiar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes:**

- Formular el programa hidráulico, actualizar y mantener su cumplimiento.
- Expedir títulos de concesión, asignación y permisos.
- Llevar el Registro Público de Derechos de Agua.
- Ejercer atribuciones fiscales.
- Verificar el cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales.

**Manejar y controlar el sistema hidrológico:**

- Proyectar, construir y operar la infraestructura hidráulica federal.
- Prevenir y atender emergencias por fenómenos meteorológicos y climatológicos.
- Desarrollar y operar infraestructura para el control de inundaciones.
- Desarrollar y operar sistemas hidrométricos y meteorológicos.

**Promover e inducir el desarrollo social:**

- Apoyar sistemas de riego y drenaje agrícola.
- Fomentar el desarrollo de sistemas de agua potable, alcantarillado, saneamiento y reúso.
- Desarrollar y operar infraestructura cuando las autoridades locales o los organismos no puedan hacerlo.

**TÍTULO CUARTO  
DERECHOS DE USO O APROVECHAMIENTO  
DE AGUAS NACIONALES  
CAPÍTULO I  
AGUAS NACIONALES**

**Art. 16º Son aguas nacionales, las que enuncia el párrafo quinto del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. El régimen de propiedad nacional de las aguas, subsistirá aún cuando las aguas, mediante la construcción de obras, sean**

*desviadas del cauce o vaso original, se impida su afluencia a ellos o sean objeto de tratamiento, igualmente las aguas residuales provenientes del uso de las aguas propiedad de la Nación tendrán el mismo carácter.*

*Art. 18° Las aguas nacionales del subsuelo podrán ser libremente alumbradas mediante obras artificiales, excepto cuando el Ejecutivo Federal por falta de interés público reglamente su extracción y utilización, establezca zonas de veda o declare su reserva. La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo causará las contribuciones fiscales que señale la ley.*

*Art. 19° Cuando se den los supuestos previstos del Artículo 38 de ésta ley, será de interés público el control de la extracción y utilización de las aguas del subsuelo, inclusive de las que hayan sido libremente alumbradas conforme a las disposiciones que el Ejecutivo Federal dicte...*

## **CAPÍTULO II CONCESIONES Y ASIGNACIONES**

*Art. 20° La explotación, uso o aprovechamiento de la aguas nacionales por parte de personas físicas o morales se realizará mediante concesión otorgada por el Ejecutivo Federal a través de "La Comisión", la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales por dependencias y organismos descentralizados de la administración pública federal, estatal o municipal la asignación será otorgada por "La Comisión".*

*Art. 24° El término de concesión o asignación para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales no será menor de cinco años ni mayor de cincuenta años....*

## **CAPÍTULO IV REGISTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE AGUA**

*Art. 32° En el Registro Público de Derechos del Agua se llevará igualmente el registro nacional permanente por zonas o regiones, de las obras de alumbramiento y de los brotes de*

agua del subsuelo para conocer el comportamiento de los acuíferos y, en su caso regular su explotación, uso y aprovechamiento, "La Comisión", solicitará los datos a las propiedades de las tierras, independientemente de que estas se localicen dentro o fuera de una zona de veda. Los propietarios estarán obligados a proporcionar esta información y la relativa a las obras de perforación o alumbramiento que hayan efectuado.

**TÍTULO QUINTO**  
**ZONAS REGLAMENTADAS,**  
**DE VEDA O DE RESERVA**  
**CAPÍTULO ÚNICO**

Art. 38º El Ejecutivo Federal, previos los estudios técnicos que al efecto se elaboren y publiquen conforme lo dispuesto en el artículo 6º de la presente Ley podrá reglamentar la extracción y utilización de las aguas nacionales, establecer zonas de veda o declarar la reserva de aguas en los siguientes casos de interés público:

FRACC. I.- Para prevenir o remediar la sobreexplotación de los acuíferos...

Art. 39º En la reglamentación de la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales a que se refiere el Artículo anterior, el Ejecutivo Federal fijará los volúmenes de extracción y descarga que se podrán autorizar, las modalidades o límites a los derechos de los concesionarios o asignatarios así como las demás disposiciones especiales que se requieran por causa de interés público. Igualmente, en circunstancias de sequías extraordinarias, de sobreexplotación grave de acuíferos o de estados similares de necesidad o urgencia por causa de fuerza mayor...

Art. 41º El Ejecutivo Federal podrá levantar o declarar mediante decreto la reserva total o parcial de las aguas nacionales para usos específicos.

Art. 42º La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo en las zonas en donde el Ejecutivo Federal reglamente o decreta veda, incluso las que hayan sido libremente alumbradas, requerirán de:

- FRACC. I.- Concesión o asignación para su explotación uso o aprovechamiento;*
- FRACC. II.- Permisos para las obras de perforación que se realicen a partir del decreto de veda o reglamentación. Las asignaciones o concesiones se otorgarán con base en el volumen anual de agua usada o aprovechada como promedio en los dos años inmediatos anteriores al decreto respectivo....*

*Art. 43° En casos del Artículo anterior, será necesario solicitar a "La Comisión" el permiso para realizar:*

- FRACC. I.- La perforación con el objeto de completar el volumen autorizado si una vez terminada la obra hidráulica no se obtiene el mismo;*
- FRACC. II.- La reposición del pozo; y*
- FRACC. III: La profundización, la relocalización o cambio de equipo del pozo. El permiso tomará en cuenta las extracciones permitidas en los términos de los Artículos respectivos.*

**TÍTULO SEXTO**  
**USOS DEL AGUA**  
**CAPÍTULO I**  
**USO PÚBLICO URBANO**

*Art. 44° La explotación uso aprovechamiento de aguas nacionales superficiales o del subsuelo por parte de los sistemas municipales o estatales de agua potable y alcantarillado, se efectuará mediante asignación que otorgue "La Comisión"...*

*Art. 47° Las descargas de aguas residuales a bienes nacionales o su infiltración que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos, se sujetarán a lo dispuesto en el Título Séptimo...*

**CAPÍTULO II**  
**USO AGRÍCOLA**  
**Sección cuarta, Distritos de Riego**

*Art. 64° Los distritos de riego se integrarán con las áreas comprendidas dentro de su perímetro, las obras de infraestructura hidráulica, las aguas superficiales y del subsuelo*

destinadas a prestar el suministro de agua, los vasos de almacenamiento y las instalaciones necesarias para su operación y funcionamiento...

**CAPÍTULO III  
USO EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

*Art. 81° La explotación, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a ochenta grados centígrados, cuando se pueda afectar a un acuífero requerirán de la previa asignación o concesión para generación geotérmica u otros usos.*

**TÍTULO SÉPTIMO  
PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA  
CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS  
CAPÍTULO ÚNICO**

*Art. 85° Es de interés público la promoción y ejecución de las medidas y acciones necesarias para proteger la calidad del agua en los términos de la ley.*

*Art. 86° "La Comisión" tendrá a su cargo:*

*FRACC. VI.- Promover o realizar las medidas para evitar que basura, desechos, sustancias tóxicas y lodos productos de los tratamientos de aguas residuales contaminen las aguas superficiales o del subsuelo...*

*Art. 88° Las personas físicas o morales requieren permiso de "La Comisión" para descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos, "La Comisión" mediante acuerdos de carácter general por cuenca, acuífero, zona, localidad o por usos podrá sustituir el permiso de descarga de aguas residuales por un simple aviso...*

**Art. 91°** La infiltración de las aguas residuales para recargar acuíferos, requieren de "La Comisión" y deberá ajustarse a las Normas Oficiales Mexicanas que al efecto se emitan.

**Art. 96°** En las zonas de riego y en aquellas zonas de contaminación extendida o dispersa, el manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar las aguas nacionales o del subsuelo, deberán cumplir las normas, condiciones y disposiciones que se desprendan de la presente ley y su reglamento. "La Comisión" promoverá en el ámbito de su competencia, las normas o disposiciones que se requieran para hacer compatible el uso de los suelos con el de las aguas, con el objeto de preservar la calidad de las mismas dentro un ecosistema, cuenca o acuífero.

## **TÍTULO OCTAVO INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA**

### **CAPÍTULO IV**

#### **COBRO POR EXPLOTACIÓN, USO O APROVECHAMIENTO DE AGUAS NACIONALES Y BIENES NACIONALES**

**Art. 112°** La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, incluyendo las del subsuelo... motivará el pago por parte del usuario de las cuotas que establece la Ley Federal de Derechos...

## **TÍTULO DÉCIMO INFRACCIONES, SANCIONES Y RECURSOS**

### **CAPÍTULO I**

#### **INFRACCIONES Y SANCIONES ADMINISTRATIVAS**

**Art.119°** "La Comisión" sancionará, conforme a lo previsto por esta Ley, las siguientes faltas:

**FRACC. I.-** Descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la siguiente Ley en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos que

*puedan contaminar el subsuelo o el acuífero, sin perjuicio de las acciones que fijan las disposiciones sanitarias y de equilibrio ecológico y protección al ambiente.*

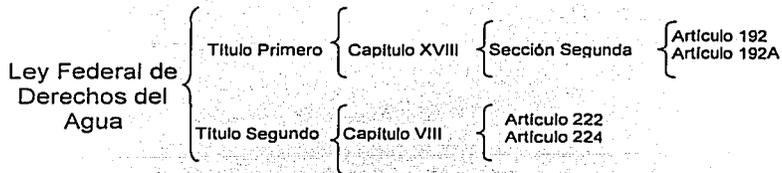
**FRACC. IX.-**  *Ejecutar para sí o para un tercero obras para alumbrar, extraer o disponer de aguas del subsuelo en zonas reglamentadas, de vedn o reservadas sin el permiso de "La Comisión" así como a quien hubiere ordenado la ejecución de dichas obras.*

**FRACC. XIV.-**  *Arrojar o depositar, en contravención a la ley, basura, sustancias tóxicas peligrosas y lodos provenientes de los procesos de tratamiento de aguas residuales, en ríos cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, o infiltrar materiales y sustancias que contaminen las aguas del subsuelo.*

### 1.3. LEY FEDERAL DE DERECHOS DEL AGUA

A continuación en el cuadro 1.3 se muestran los Artículos que se encuentran en la Ley Federal de Derechos del Agua, y están vinculados con los acuíferos, y aguas subterráneas, hay que mencionar que la encargada de hacer valer ésta ley es "La Comisión".

*Cuadro 1.3. Artículos de la Ley Federal de Derechos del Agua.*



**TÍTULO I**  
**DE LOS DERECHOS POR LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS**  
CAPITULO XIII  
SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA  
Sección Segunda  
Servicios Relacionados con el Agua y sus Bienes Públicos Inherentes

*Art. 192° Por la expedición de títulos de asignación o concesión, de permisos o autorizaciones que se indican, incluyendo su posterior inscripción por parte de la Comisión Nacional del Agua en el Registro Público de Derechos del Agua, se pagará el servicio de derechos relacionados con el agua, conforme a las siguientes cuotas:*

*FRACC. I.- Por la expedición de cada título de concesión o asignación para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales incluyendo su registro, en los términos correspondientes ..... S 2,054.60 \**

*FRACC. IV. Por la modificación, a petición de la parte interesada, a las características de los títulos o permisos a que se refiere la fracción anterior de éste Artículo, respecto a la extracción, derivación, explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, sustitución de usuarios, relocalización o reposición de pozos, punto o calidad de descarga o plazo .....\$1,050.31\**

*Art. 192-A Por la expedición de títulos de concesión y permisos que se indican, incluyendo su posterior inscripción por parte de la Comisión Nacional del Agua en el Registro Público de Derechos de Agua, se pagará el derecho de servicios relacionados con el agua, conforme a las siguientes cuotas:*

---

\* Montos aplicables al periodo comprendido entre el 1 de julio al 31 de diciembre del 2002, según el Artículo 1 de dicha ley que dice "Los derechos que establece la Ley se pagarán por el uso y aprovechamiento de los bienes del dominio público de la Nación", a su vez el Artículo 17-A de la ley fija que "el monto de las contribuciones se actualizará por motivos de cambios de precios en el país, haciendo uso de un factor de actualización del 1.0227"

FRACC. III. *Permiso para la construcción de obras hidráulicas destinadas a la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales o en zonas de veda y reglamentadas, para perforación de pozos para uso de aguas del subsuelo o para la construcción de obras en zona federal, por cada uno .... \$2,659.02\**

FRACC. V *Por la modificación, a petición de la parte interesada, a las características de los títulos o permisos a que se refieren las fracciones de éste Artículo, respecto a la explotación, uso o aprovechamiento, sustitución de usuario, ubicación o plazo, por cada uno ..... \$1,050.31\**

**TÍTULO II  
DE LOS DERECHOS POR EL USO O APROVECHAMIENTO  
DE LOS BIENES DEL DOMINIO PÚBLICO.**

**CAPÍTULO VIII  
A G U A**

*Art. 222º. Están obligadas al pago del derecho sobre agua, las personas físicas y las morales que usen, exploten o aprovechen aguas nacionales, bien sea de hecho o al amparo de títulos de asignación, concesión, autorización o permiso, otorgados por el Gobierno Federal, de acuerdo con la zona de disponibilidad de agua en que se efectúe su extracción de conformidad a la división territorial.*

*Art. 224º. No se pagará el derecho a que se refiere éste capítulo, en el caso siguiente:*

FRACC. I.- *Por la extracción o derivación de aguas nacionales que realicen personas físicas dedicadas a actividades agrícolas o pecuarias para satisfacer las necesidades domésticas y de abrevadero, sin desviar las aguas de su cauce natural.*

\* Montos aplicables al período comprendido entre el 1 de julio al 31 de diciembre del 2002, según el Artículo 1 de dicha ley que dice "Los derechos que establece la Ley se pagarán por el uso y aprovechamiento de los bienes del dominio público de la Nación", a su vez el Artículo 17-A de la ley fija que "el monto de las contribuciones se actualizará por motivos de cambios de precios en el país, haciendo uso de un factor de actualización del 1.0227"

#### **1.4. NORMAS OFICIALES MEXICANAS.**

Las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental, además de permitir a la autoridad establecer límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a diferentes medios, y condiciones para su verificación, desempeñan un papel fundamental en la generación de una atmósfera de certidumbre jurídica, y una no menos importante función de promover el cambio tecnológico.

En la década de los 90's empezó a cobrar importancia el desarrollo de un sistema normativo cuyo objetivo era el control de la contaminación. Este esfuerzo significó un avance muy importante, tanto en el aspecto de crear condiciones específicas de emisión de contaminantes hacia los diferentes medios como en términos de dotar a la autoridad ambiental de un mecanismo de regulación simultánea para un gran número de agentes productivos.

Surgieron inicialmente las Normas Técnicas Ecológicas (NTE) a raíz de la publicación de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. A partir de 1992, -y bajo los lineamientos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, donde la elaboración y aprobación de normas oficiales constituye un complejo mecanismo que garantiza un elevado nivel técnico, una amplia participación social en las diferentes fases de su desarrollo y un minucioso análisis de sus efectos económicos. Muchas de las NTE se han convertido en Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

El campo que más desarrollo ha alcanzado es el de actividades industriales, sin embargo, la protección de la vida silvestre presenta enormes retos y perspectivas. Las normas que se desarrollen en éste plano deberán contribuir a un aprovechamiento sostenible de la vida silvestre.

En general se debe procurar condensar, si ello es posible, en una sola norma los límites aplicables a industrias diferentes. El desarrollo de nuevas normas debe contemplar las vinculaciones con otros instrumentos regulatorios y con la normalización voluntaria, así como para incorporar los tiempos de ajuste que requieren los sectores afectados. Es necesaria una mayor coordinación entre las normas aplicables a diferentes medios y buscar que, en algunos casos al menos se avance hacia una normatividad multimedios.

Las normas deben tomar en consideración las tecnologías de proceso, control y medición disponibles y el costo de las mismas, pero bajo ninguna circunstancia es permisible que favorezcan tecnologías particulares ni que se constituyan en un obstáculo para la adopción de tecnologías que pudieran surgir.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Comisión Nacional del Agua (CNA) han expedido en forma coordinada Normas Oficiales Mexicanas para la prevención y control del agua.

**NOM-001-ECOL-1996.** Establece los *“límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”*. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997 y entró en vigor el día 7 de enero de 1997.

**NOM-002-ECOL-1996.** Establece los *“límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales en los sistemas de alcantarillado, urbano o municipal”*. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 3 de junio de 1998 y entró en vigor el día 4 de junio de 1998.

**NOM-003-ECOL-1997.** Establece los *“límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público”*. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 21 de septiembre de 1998 y entró en vigor el día 22 de septiembre de 1998.

**NOM-003-CNA-1996.** Establece "*Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir contaminación de acuíferos*", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de febrero de 1997.

**NOM-004-CNA-1996.** Establece "*Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento, rehabilitación y cierre de pozos de extracción de agua*", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1997.

Para la elaboración de las NOM en materia de protección ambiental, la SEMARNAP ha constituido el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental integrado por dependencias del sector público, industrial y académico, este Comité, para sus tareas de normalización cuenta con seis Subcomités. El Subcomité No. 5 es el que consulta la calidad del agua residual, estos Subcomités son los encargados de discutir los anteproyectos de las normas, que elabora el Instituto Nacional de Ecología (INE), que son sometidos a consideración del Comité Consultivo.

Una vez publicados como proyectos, las NOM están en consulta pública durante 60 días. En la sección de NOM en elaboración se señalan aquellas que actualmente están en esta fase, para que una observación del público sea válida deberá remitirse por escrito a la Secretaría Técnica del Comité Consultivo.

En la elaboración de cada proyecto de NOM, además de los aspectos técnicos, se evalúan los aspectos económicos, a través de un análisis de costos y beneficios, así como de otras alternativas regulatorias que podrían ser utilizadas para lograr el mismo objetivo.

Por el momento el Subcomité No. 5 tiene un anteproyecto de Norma (NOM-004-ECOL-96) que se refiere a: "*Límites máximos permisibles de contaminantes en la inyección y recarga de aguas residuales en acuíferos subterráneos*". No tiene ningún anteproyecto en fase de discusión, ni tampoco en fase de discusión definitiva.

## CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PRINCIPALES DE LOS ACUÍFEROS

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro, la composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales.

Los suelos se dividen en diversas clases según sus características generales, la clasificación se suele basar en la morfología y la composición del suelo, con énfasis en las propiedades que se pueden ver, sentir o medir como pueden ser, la profundidad, el color, la textura, la estructura y la composición química, la mayoría de los suelos tienen capas características, llamadas horizontes; la naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también es importante en la identificación y clasificación de los suelos.

#### 2.1.1. Porosidad ( $\epsilon$ ).

Ésta se puede diferenciar en cinco tipos, la porosidad total, la porosidad eficaz, la porosidad por fracturación, la porosidad irregular, y la porosidad Intergranular.

Los espacios no ocupados por material sólido pueden llenarse con agua y aire o únicamente con agua si el suelo está saturado, estos espacios se conocen como intersticios o poros, a través de ellos fluye el agua subterránea, la porosidad

total de un suelo  $\epsilon$ , es la medida de los intersticios que éste contiene, y se expresa como la relación de volumen de los vacíos  $V_v$  entre el volumen total  $V_T$ .

$$\epsilon = \left( \frac{V_v}{V_T} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.1)$$

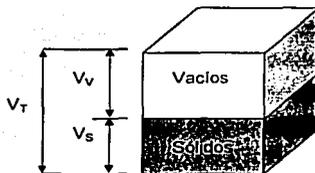
Donde:

$\epsilon$  Porosidad total

$V_v$  Volumen de vacíos

$V_T$  Volumen total

Figura. 2.1 Relación entre volumen de sólidos y de vacíos



Los huecos de una estructura pueden estar conectados entre sí o no, la cantidad de huecos interconectados se denomina *porosidad eficaz*, una estructura puede ser muy porosa, pero si los huecos no están conectados no será productiva hidráulicamente, este es el caso de las arcillas, en la figura 2.2, se muestra la porosidad en las arcillas, en donde el agua queda adherida a las moléculas y tiene dificultades para fluir libremente.

Figura. 2.2. Porosidad que se presenta en las arcillas



La porosidad depende del arreglo y forma de las partículas del suelo, así como de su distribución por tamaño y grado de compactación, de acuerdo con dichas características los intervalos de porosidad varían entre 0 y 60 por ciento para los depósitos sedimentarios, como son mostrados en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Intervalos de porosidades en suelos sedimentarios

MATERIALES	Porosidades (%)	
	de	a
Arcilla	45	55
Limo	40	50
Arena media	35	40
Arena uniforme	30	40
Arena fina a media	30	35
Grava	30	40
Grava y arena	20	35
Arenisca	10	20
Pizarra	1	10
Caliza	1	10

Para calcular la porosidad se determina la densidad real y la densidad aparente, la densidad real se determina como la relación de la masa total de las partículas sólidas con respecto a su volumen total excluyendo los espacios porosos, la masa se define después de secar la muestra a 105 °C, hasta que su peso sea constante, el volumen se calcula a partir de la masa y densidad del agua desplazada por la muestra.

La densidad aparente es la relación que existe entre la masa y el volumen de las partículas del suelo incluyendo los espacios porosos, la masa se determina por peso y el volumen corresponde al que tiene la muestra en condiciones de campo, en términos de la densidad, la porosidad se define como:

$$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s} \quad \dots\dots(2.2)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Donde:

- $\rho_s$  Densidad real del suelo [M / L<sup>3</sup>].  
 $\rho_p$  Densidad aparente del suelo [M / L<sup>3</sup>].

*Porosidad irregular*, al hablar de la porosidad se piensa en los poros de un material detrítico, pero las estructuras compactas también pueden contener cierta proporción de agua en el interior de sus fracturas. Estos planos de fracturas también son ocluidos por los minerales arcillosos resultantes de la alteración, y en otras ocasiones, al contrario la disolución hace aumentar la fractura.

Lo único parecido a los míticos "ríos subterráneos", existen en acuíferos calizos, donde la disolución hace aumentar la fractura enormemente.

En el caso de la *porosidad intergranular*, la porosidad total no depende del tamaño del grano. En cambio la porosidad eficaz si se ve afectada por el tamaño del grano, si es mas fino, la retención específica aumenta.

Tanto la porosidad eficaz como la total dependen de:

- La heterometría: los finos ocupan los poros que dejan los gruesos y la porosidad disminuye.
- La forma y disposición de los granos.
- La compactación, cementación y recristalización, que van a ir disminuyendo de porosidad.

La *porosidad por fracturación* está determinada por la historia tectónica de la zona y por la litología, es decir, según como cada tipo de roca ha respondido a los esfuerzos. En este tipo de porosidad es determinante la posible disolución de la fractura o, en sentido contrario, la colmatación por minerales arcillosos o precipitación de otros minerales.

### 2.1.2. Permeabilidad ( K ).

La permeabilidad es la propiedad de un material poroso que permite el paso o la infiltración de un fluido, como agua o aceite a través de los espacios vacíos (poros) interconectados, éste coeficiente "K" se obtiene de la ecuación de Darcy, y a su vez este coeficiente se puede determinar experimentalmente.

$$K = \frac{Q}{A \left( \frac{dh}{dl} \right)} \quad \dots\dots(2.3)$$

Con el objeto de informar a cerca de algunos valores del coeficiente de permeabilidad para suelos de diferentes texturas, en el cuadro 2.2. se presentan los grados de permeabilidad, adoptados por Terzaghi y Peck, que incluyen los suelos compuestos por varias fracciones de texturas en diferentes porciones, cabe mencionar que estos valores no pueden ser usados para el diseño.

**Cuadro 2.2. Grados de Permeabilidad en los Suelos**

Grado de Permeabilidad	Intervalo del Coeficiente de Permeabilidad K (cm/s)	Textura del Suelo Aproximada
ALTO	$> 10^{-1}$	Gravas Medias y Gruesas
MEDIO	$10^{-1}$ a $10^{-3}$	Grava Fina, arena y duna
BAJO	$10^{-3}$ a $10^{-5}$	Arena muy fina, limo arenoso, limo suelto
MUY BAJO	$10^{-5}$ a $10^{-7}$	Limo denso, arcilla-limosa, arcilla
IMPERMEABLE	$< 10^{-7}$	Arcilla homogénea

En la figura 2.3. se presenta una gráfica la cual relaciona la porosidad con la permeabilidad en un suelo, dependiendo de la granulometría del mismo

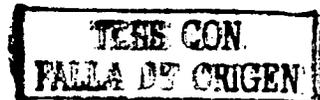
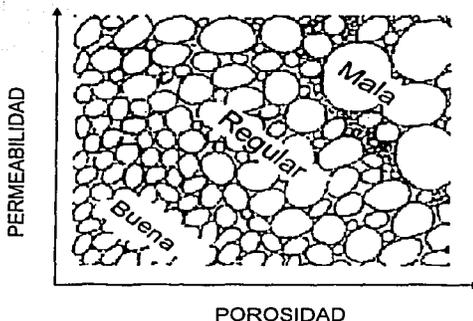


Figura. 2.3. Relación entre Porosidad y Permeabilidad y su granulometría



Es obvio que en el valor numérico de "K" se reflejan propiedades físicas del suelo y en cierta medida ese valor indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico dado, esta facilidad a su vez depende de toda una serie de propiedades físicas del suelo, y también de algunos factores, tales como temperatura y otros más.

### 2.1.3. Gradiente Hidráulico (i).

Al considerar un par de puntos A y B, ubicados a lo largo de una corriente subterránea, con sus respectivas cargas hidráulicas  $H_A$  y  $H_B$ , se dice que el gradiente hidráulico en la dirección A-B, estará representado por:

$$i = \frac{H_A - H_B}{L} \quad \dots\dots(2.4)$$

Donde L será la distancia existente entre A y B, se puede presentar un gradiente negativo, si se toma la dirección del flujo, la fuerza impulsora del flujo del agua subterránea, es el potencial o carga hidráulica, cuando el flujo tiene la misma carga en cualquier punto, no hay movimiento cuando existe una diferencia de carga, el agua fluye en la dirección en que disminuye la carga si se considera que:

$$P_1 = \rho \times g \times (h_1 - z_1) \quad \dots\dots(2.5)$$

$$h_1 = \frac{P_1}{(\rho \times g)} + z_1 \quad \dots\dots(2.6)$$

Donde:

- P Presión [ML<sup>-3</sup>].
- $\rho$  Densidad [ML<sup>-3</sup>].
- g Aceleración gravitacional [LT<sup>-2</sup>].
- $h_1$  Carga hidráulica en el punto i, dado por el nivel en piezómetro [L].
- $z_1$  Carga de posición considerando un nivel de referencia [L].

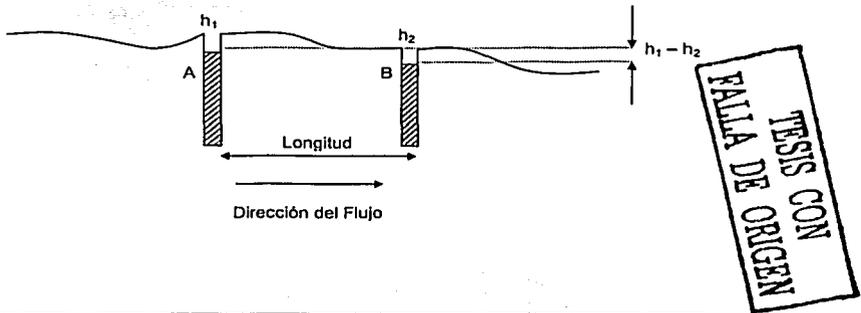
De acuerdo con la ecuación de Bernoulli, a lo largo de una línea de corriente.

$$\frac{P_1}{\rho \times g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \times g} + z_2 + \Delta h \quad \dots\dots(2.7)$$

De manera que la pérdida de carga  $\Delta h$  es igual a la diferencia de los niveles de agua  $h_1 - h_2$ .

Para la determinación de la carga hidráulica se utiliza un piezómetro abierto al flujo de agua en la parte inferior y a la atmósfera en la parte superior.

Figura. 2.4. Representación del Gradiente Hidráulico



#### 2.1.4. Contenido de Agua ( W ) y Grado de Saturación ( S ).

El *contenido de agua* de un suelo se define como la cantidad de agua que ocupan los intersticios o poros del suelo, tal contenido puede expresarse con base en la masa del agua o en su volumen. En el primer caso, se define como la relación de la masa del agua entre la masa de la fracción sólida y se denomina contenido absoluto del agua.

$$W = \left( \frac{W_w}{W_s} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.8)$$

Donde:

W    Contenido de agua [%].

$W_w$     Masa del agua contenida en los vacíos del suelo [M].

$W_s$     Masa de los sólidos [M].

El contenido de agua en fracción volumétrica se define como la relación del volumen del agua ocupado por los vacíos de una muestra del suelo  $V_w$ , entre el volumen total de la muestra  $V_t$ .

$$\theta = \left( \frac{V_w}{V_t} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.9)$$

Cuando los poros están parcialmente llenos de agua, el suelo contiene *un grado de saturación S*, que se define como la relación entre el volumen de agua  $V_w$  y el volumen de vacíos  $V_v$ .

$$S = \left( \frac{V_w}{V_v} \right) = \left( \frac{V_w}{V_a + V_w} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.10)$$

De acuerdo con lo anterior sí:

S = 1    Los poros están llenos de agua, se tiene condición de saturación y existen dos fases de suelo y agua.

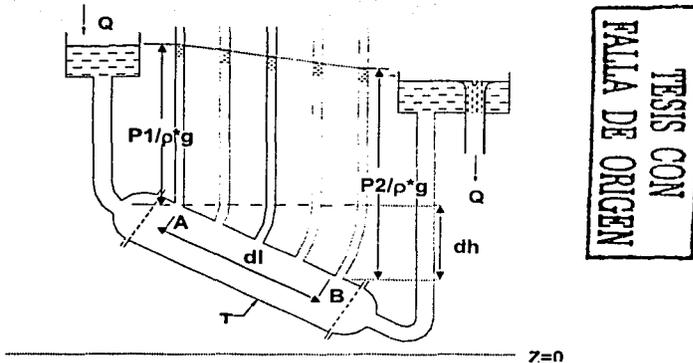
0 < S < 1    Los poros están parcialmente saturados, hay agua y aire en ellos y existen tres fases suelo, aire, y agua.

S = 0    Los poros sólo contienen aire y existe un sistema de dos fases: suelo y aire.

### 2.1.4. Ley de Darcy

Henry Darcy investigó el flujo del agua en lechos horizontales de arena y encontró que la velocidad de un flujo a través de un medio poroso es directamente proporcional a la longitud que atraviesa el flujo, a esta relación se le conoce como la Ley de Darcy, en la figura 2.5. se muestra el experimento de Darcy.

Figura 2.5. Experimento de Henry Darcy.



TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN

Henry Darcy investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos, lo cual es particularmente afortunado para la aplicación de los resultados de la investigación a la Mecánica de Suelos. Trabajando con dispositivos de diseño especial, Darcy encontró que solo para velocidades suficientemente pequeñas y dado que el caudal  $Q$  está en  $(L^3/T)$ , y el área de la sección está dada en  $(L^2)$ , además  $dh$  y  $dl$  son longitudes, se comprueba que las unidades de la permeabilidad "K" son las de una velocidad  $(L/T)$ , haciendo que la Ley de Darcy se exprese de la siguiente forma.

$$q = -K \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad \dots\dots(2.11)$$

Donde:

q Q/ área de la sección (es decir: caudal que circula por m<sup>2</sup> de sección).

K Conductividad Hidráulica (permeabilidad).

dh/dl Gradiente Hidráulico "i" expresado en incrementos infinitesimales (el signo menos se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia los Δh decrecientes; es decir, que Δh o dh es negativo y, por tanto, el caudal será positivo).

Otra forma de expresar la ecuación anterior es la siguiente:

$$Q = \left( \frac{dV}{dt} \right) = k \times A \times i \quad \dots\dots(2.12)$$

Donde A es el área total de la sección transversal del filtro e i el gradiente hidráulico del flujo (ecuación 2.4).

La ecuación de continuidad del gasto establece:

$$Q = A \times V \quad \dots\dots(2.13)$$

Siendo A el área del conducto y v la velocidad del flujo. Llevando esta expresión a la Ley de Darcy, se deduce que:

$$V = K \times i \quad \dots\dots(2.14)$$

O sea, que en el intervalo en que la ley de Darcy es aplicable, la velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto indica que, dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Darcy, el flujo en el suelo es laminar.

La Ley de Darcy se aplica a flujo laminar y no es válida cuando es flujo turbulento, como es el caso de acuíferos no consolidados con gradientes hidráulicos grandes, un flujo es laminar si las líneas de agua son paralelas, la

turbulencia o la laminaridad dependen de la resistencia que el suelo ofrece al flujo, éste a su vez depende del tipo de suelo, tamaño y forma de las partículas que lo constituyen, el grado de consolidación del suelo, (densidad, tamaño y geometría de los poros) y de la temperatura del agua (viscosidad y tensión superficial).

### 2.1.5. Zona Saturada y Zona no Saturada

En la *zona saturada* los intersticios están llenos de agua por debajo de la presión hidrostática, el límite superior de esta zona es un estrato impermeable o una superficie tope de saturación, en ausencia de dicho estrato el nivel freático constituye una frontera superior, el límite inferior es un estrato impermeable como roca o lecho arcilloso.

La saturación se extiende ligeramente sobre el nivel freático debido a las fuerzas de capilaridad, pero el agua se mantiene a una presión menor que la atmosférica, en ésta zona la porosidad es una medida del contenido de agua por unidad de volumen; sin embargo, esta agua no se puede remover totalmente por bombeo o por drenaje pues las fuerzas moleculares y de tensión superficial, mantienen una parte en contra de la gravedad, esta retención de agua se conoce como *retención específica*.

$$S_r = \left( \frac{V_{WR}}{V} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.15)$$

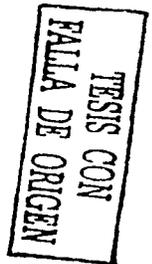
Donde:

$S_r$  Retención específica.

$V_{WR}$  Volumen de agua retenido después de la saturación.

$V$  Volumen total.

Mientras tanto el agua que si es posible bombear o drenar se denomina *rendimiento específico*  $S_y$  y se define como el volumen de agua, que después de la saturación, puede drenarse por gravedad.



$$S_y = \left( \frac{V_{wy}}{V} \right) \times 100 \quad \dots\dots(2.16)$$

Donde:

$S_y$  Rendimiento específico.

$V_{wy}$  Volumen de agua drenada después de la saturación.

$V$  Volumen total.

El rendimiento específico es una porción de la porosidad en un acuífero, su valor depende del tamaño del grano, la forma y distribución de los poros, y la compactación del estrato.

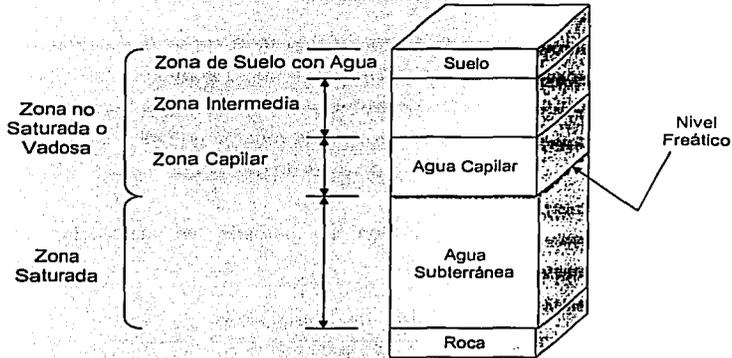
En la *zona no saturada*, los intersticios están ocupados de agua y aire, por lo general esta zona descansa sobre otra saturada y se extiende hasta la superficie del suelo, además, se ha subdividido en tres zonas; una de suelo con agua, una intermedia, y una capilar.

El agua de la zona no saturada, se denomina agua vadosa a diferencia del agua subterránea que se ubica en la zona saturada, el agua vadosa se encuentra a presión negativa o de succión, y el gradiente de esta succión constituye la fuerza de movimiento hacia donde la succión es mayor.

Dicha presión se denomina succión mátrica ya que se ocasiona por la afinidad de agua con la matriz del suelo, la cual está constituida por las partículas y los poros capilares, en la figura 2.6 se muestra una sección de suelo en donde se esquematiza la zona saturada y la zona no saturada.

La mayor fuerza de movimiento se presenta en el *frente mojado*, en donde el agua entra al suelo originalmente seco, en esta zona el gradiente de succión puede ser tan grande que constituye una fuerza de movimiento más intensa que la de gravedad, el flujo es más evidente y persistente en los suelos no saturados arcillosos, que en arenosos.

Figura 2.6 Zona Saturada y Zona no Saturada



Por esta razón una capa de arena en un perfil de textura fina puede impedir el desplazamiento del agua y ocasionar la acumulación del líquido sobre la zona arenosa hasta que la succión disminuya lo suficiente, hasta que el agua entre a los poros de la arena, en el cuadro 2.3. se muestran las principales diferencias que existen entre la zona no Saturada y la Saturada.

Cuadro 2.3. Diferencias entre zona Saturada y no Saturada

Zona Saturada	Zona no Saturada
Ocurre bajo el nivel freático.	Ocurre sobre el nivel freático y sobre la zona de capilaridad.
El contenido de agua $\theta$ , es igual a la porosidad $\eta$ .	El contenido de agua $\theta$ , es menor que la porosidad $\eta$ .
La presión del fluido $p$ es mayor que la atmosférica y la carga de presión es mayor de cero.	La presión del fluido $p$ es menor que la atmosférica y la carga de presión es menor de cero.
La carga hidráulica $h$ se mide con un piezómetro.	La carga hidráulica $h$ se mide con un tensiómetro.
La permeabilidad $K$ es constante y no es función de la carga de presión.	La permeabilidad $K$ , y el contenido de agua $\theta$ , son función de la carga de presión.

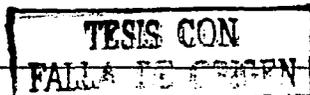
## 2. 2 TIPOS DE ACUÍFEROS.

Las formaciones rocosas o de material poroso capaces de proporcionar cantidades significativas de agua, se consideran como acuíferos, la mayoría de éstos cuentan con grande sistemas de almacenamiento de agua bajo la tierra, en los cuales el agua entra al reservorio a través de recarga natural o artificial y sale de él a través de la acción de bombeo o a través de gravedad.

Para una mejor esquematización se muestra en el cuadro 2.4 la clasificación de los acuíferos.

Cuadro 2.4. Clasificación de los Acuíferos

ACUÍFEROS		
Según el tipo de Acuífero.		Acuífero. Acultardo. Acuicierre. Acuífugus.
Según las propiedades físicas de las Rocas.		Detríticos. Fisurados o Kársticos. Mixtos.
Según las condiciones hidráulicas y posición estructural del terreno.		Libre o no Confinado. Confinado o Cautivo. Semiconfinado.
Según la zona en que se ubican.	Zona no Saturada.	Del Suelo. Pelicular. Gravitacional o Vadoso. Capilar. Colgado.
	Zona Saturada.	De movimiento libre. Confinado. Aprisionado o Congenito. Juvenil. Connato.



### 2.2.1 Según el tipo de Acuífero.

#### a) *Acuífero* (del Latín *ferre* = llevar)

Son formaciones geológicas que ocupan la zona de saturación y que son capaces de almacenar y transmitir agua en cantidades importantes, se caracterizan, por tanto, por poseer una permeabilidad significativa, una extensión y espesor considerables.

Constituyen enormes "conductos de transmisión" ya que aportan el agua procedente de la infiltración, hasta los ríos, manantiales, lagos, mares, y obras de captación, además de constituir los almacenes de enormes reservas que pueden ser utilizadas para cuando las extracciones, excedan la recarga.

#### b) *Acuífero* (del Latín *tardare* = retardar).

Son formaciones geológicas semipermeables, que el contenido de agua con el que cuentan lo transmiten muy lentamente, en determinados casos puede proporcionar al acuífero que esté en contacto con él, una recarga muy importante, las rocas que forman éstos son limos y arcillas arenosas.

#### c) *Acuífero* (del Latín *claudere* = cerrar).

Son formaciones porosas pero impermeables se encuentran en una zona geológica saturada que no es capaz de transmitir cantidades significativas de agua, bajo condiciones extraordinarias de gradiente hidráulico, se forman por arcillas, que no permiten el drenaje por gravedad ni el flujo horizontal, éstos pueden constituir los límites de los acuíferos, nivel impermeable de base y los laterales.

**d) Acuífugos (del Latín *fugure = huir*).**

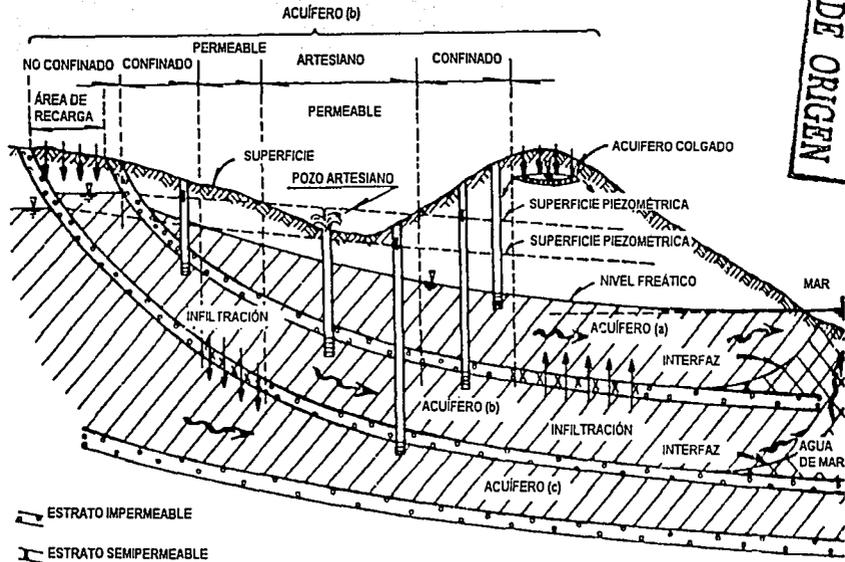
Son formaciones de rocas con porosidad nula y por tanto sin capacidad de almacenar agua ni para transmitirla, éstos también pueden constituir los límites de los acuíferos formados por granitos, y demás rocas plutónicas inalteradas.

Se pueden establecer diferentes clasificaciones de los acuíferos, en función de los criterios que se utilicen, como pueden ser, por las propiedades físicas de la roca, de acuerdo a sus condiciones hidráulicas y posición estructural del terreno, y según la zona en que se ubiquen los acuíferos.

**2.2.1. Según las Propiedades Físicas de la Roca.**

- a) **Acuíferos Detríticos.**-Son los que tienen permeabilidad debida exclusivamente a porosidad Intergranular, son todos los materiales con tamaño de grano de arena como mínimo (arenas, arcosas, areniscas, gravas, conglomerados, etc.).
- b) **Acuíferos Fisurados y/o Kársticos.**- Son los que poseen porosidad original por fractura, microfracturación y/o karstificación, se encuentran entre ellos los formados por calizas, dolomías, yesos, areniscas muy cementadas, granitos, basaltos, etc.
- c) **Acuíferos Mixtos.**- Su porosidad se debe al conjunto de todas las causas anteriores, son los formados por arenas calcáreas o calcarenitas. En general éstos acuíferos son los más homogéneos, tienen mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen que los fisurados, por lo que reaccionan con más inercia a los bombeos.

Figura 2.7 Clasificación de los Acuíferos



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fuente: "Agua Subterránea y Contaminación" Iturbe Argüelles, Silva Martínez

## **2.2.2. Según sus Condiciones Hidráulicas y Posición Estructural del Terreno.**

- a) **Acuífero Libre o no Confinado.**- Son aquellos en que el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica, el agua del acuífero está sometida exclusivamente a presión hidrostática, más que la presión atmosférica. Puesto que la densidad del agua es  $1 \text{ g/cm}^3$ , la presión de los fluidos aumentará  $1 \text{ kg/cm}^2$ , o sea que 1 bar por cada 10 metros de profundidad, el nivel de saturación del acuífero se denomina nivel freático.
- b) **Acuífero Confinado o Cautivo.**- Corresponden a formaciones geológicas permeables saturadas de agua, confinadas entre dos capas de estratos impermeables, el efecto de la capa impermeable superior sobre el acuífero es una sobrecarga que comprime tanto al edificio litológico, como al agua contenida en él. El agua del acuífero estará sometida a presión de confinamiento, que será la suma de la presión hidrostática más la presión litostática de la capa impermeable subyacente, más la presión atmosférica.

Hay que tener en cuenta que el agua tiene un módulo de elasticidad muy pequeño por lo que el volumen del agua de confinamiento (*diferencia entre el volumen de agua sometida a presión litostática y el volumen en ausencia de ésta*), será también muy pequeño.

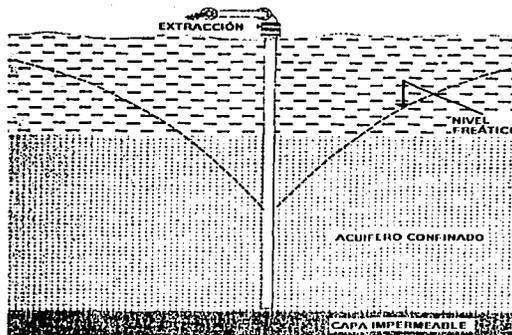
En un acuífero confinado el agua posee un nivel virtual o potencial, conocido como nivel piezométrico, que sólo se manifiesta en donde se practica una perforación.

Cuando se bombea en un medio confinado, se produce una disminución de la presión hidrostática proporcional al aumento de la presión litostática o intergranular de tal forma que la presión de confinamiento continúa igual, baja la presión de los poros, disminuye el tamaño de los mismos, cuando cesa el bombeo el acuífero retorna gradualmente a su posición original.

Si sobre un acuífero confinado se produce una explotación continua, el incremento progresivo de las presiones intergranulares producirá una subsidencia de la capa superior confinante, generalmente estas subsidencias suelen ser permanentes debido a que las formaciones litológicas no son elásticas.

En la figura 2.8 se muestra que, si por el bombeo el nivel piezométrico alcanzase el techo del acuífero y no se produjera una compensación subsidente del terreno, cesarían los efectos del confinamiento y el acuífero pasaría a ser libre.

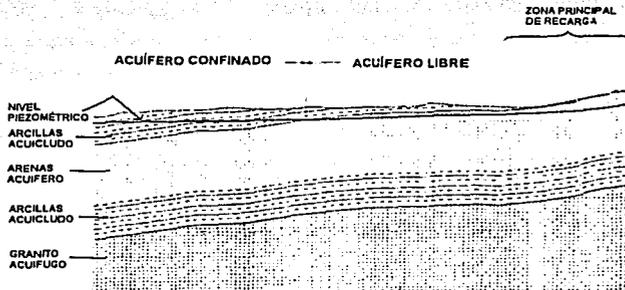
Figura 2.8 Acuífero Confinado que pasa a Libre durante un bombeo



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En rigor en la naturaleza no existen acuíferos confinados puros, ya que no existen formaciones totalmente impermeables, por otro lado, aunque muchas formaciones acuíferas permanecen cautivas en grandes extensiones, llegan a aflorar en algún sitio hacia la superficie, pasando de esta forma a ser libres, para una mejor ejemplificación se muestra en la figura 2.9 éste efecto.

Figura 2.9 Acuífero que se encuentra Confinado en algunas zonas y en otras Libre.



Un acuífero surgente o artesiano, por el que asciende agua hasta la superficie, puede generarse partiendo de un acuífero detrítico cautivo, si el agua se encuentra a una presión mayor que la hidrostática ideal (*la de una columna de agua que rellenará el sondeo*), el volumen surgente en este caso, sólo puede ser el mismo que el de confinamiento provocado por la expansión del agua cuando desaparece la fuerza litostática, de esta forma también se pueden explicar muchas surgencias de petróleo, como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 2.10 Acuífero Libre en zona de descarga con componentes de flujo ascendente

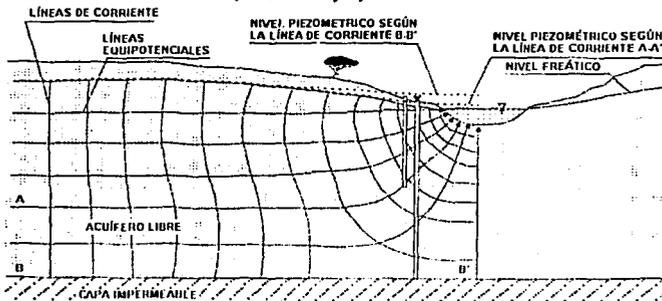


Figura 2.11 Acuífero Confinado Simple.

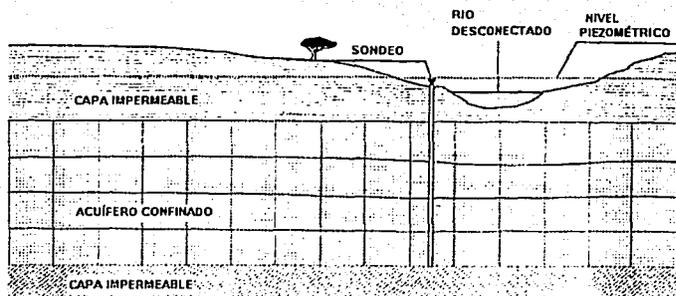
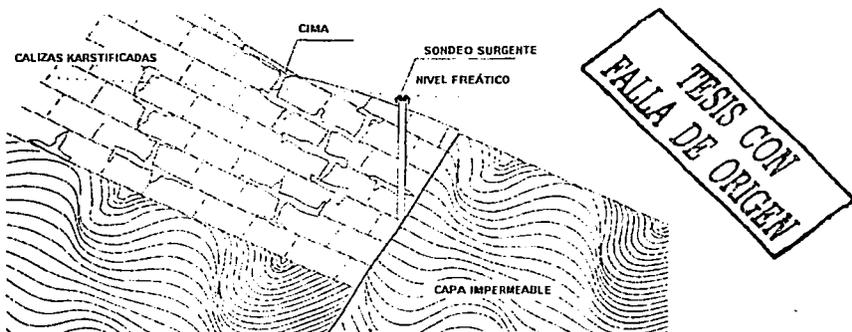


Figura 2.12 Surgencia a favor de trampa tectónica.



- c) *Acuífero Semiconfinados.*- Son acuíferos en condiciones similares a los cautivos, que pueden recibir una cierta recarga, también llamado *goteo*, a través de una capa semipermeable (acuitardo), desde otro acuífero superior o inferior.

Figura 2.13 Acuífero Semiconfinado Simple

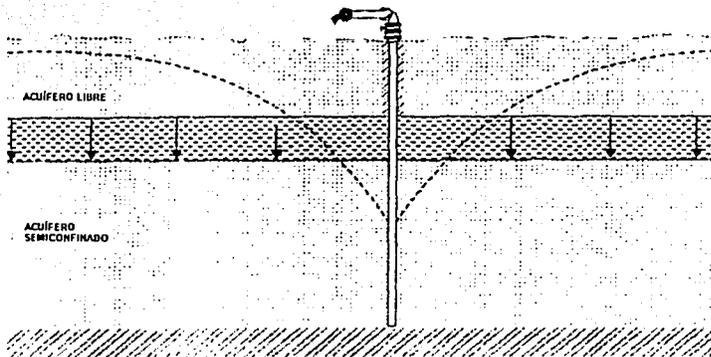
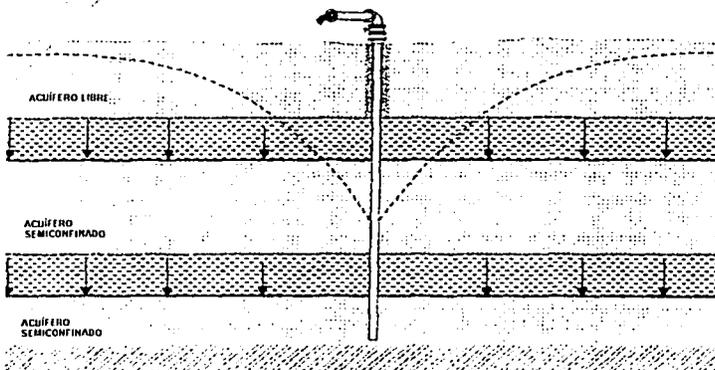


Figura 2.14 Acuífero Semiconfinado Complejo



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

### 2.2.3. Según la Zona en que se Ubican.

a) Los principales tipos de acuíferos de la zona de NO SATURACIÓN son:

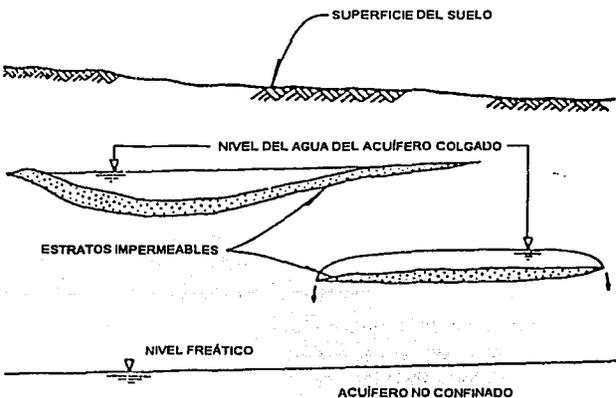
- i) *Acuífero del Suelo.* Que virtualmente se encuentra restringido al espesor de las capas hasta donde alcanzan las raíces de plantas y árboles.
- ii) *Acuífero Pelicular.* Es el agua adherida a los clastos integrantes o participantes del suelo (agua absorbida) y que no está afectada por los movimientos gravitacionales.
- iii) *Acuífero Gravitacional o Vadoso.* Es la que es afectada por la gravedad y tiende a fluir hasta niveles muy inferiores de la zona de aereación.
- iv) *Acuífero Capilar.* Es el agua que a modo de flecos se eleva desde el nivel freático o límite inferior de la zona de aereación.
- v) *Acuífero Colgado.* Es aquella agua gravitacional que en su descenso queda atrapada por un estrato impermeable, quedando virtualmente como colgada, como es mostrado en la figura 2.15.

b) Dentro de la zona de SATURACIÓN, podemos diferenciar cinco tipos de acuíferos que son:

- i) *Acuífero de Movimiento Libre.* En éste, el agua fluye libremente controlada por la pendiente del nivel freático.
- ii) *Acuífero Confinado.* Es la situada entre dos capas impermeables pero así como tiene entrada también puede contar con salida, estando su movimiento controlado por la diferencia de altura entre la entrada y la salida, o sea, su altura hidrostática.

- iii) **Acuífero Aprisionado o Congénito.** Es el agua que quedó capturada, cuando los sedimentos se formaron, como por ejemplo el agua de los yacimientos petrolíferos.
- iv) **Acuíferos Juveniles.** El contenido de agua subterránea es en parte una contribución directa de la actividad magmática o volcánica. Durante la cristalización, se desprende agua, que puede pasar a la roca adyacente y formar parte del caudal subterráneo. El agua desprendida en la cristalización de las rocas ígneas se llama agua joven.
- v) **Acuífero Connata.** Cuando se depositan sedimentos bajo los mares, parte del agua del mar es retenida en los intersticios. Al depositarse encima sedimentos impermeables, parte de esta agua puede quedar aprisionada y retenida en el sedimento, hasta que sea descubierta en forma accidental o intencionada. El agua atrapada en los sedimentos en el momento de su depósito se llama *agua connata*.

Figura 2.15 Acuífero Colgado



TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

### 2.3. PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS.

Dentro de las propiedades que clasifican a un acuífero se encuentran; Almacenamiento Específico, Coeficiente de Almacenamiento, Transmisibilidad, Permeabilidad o Conductividad Hidráulica.

#### 2.3.1. Almacenamiento Específico ( Ss ).

El almacenamiento específico de un acuífero Ss, se define como el volumen de agua que se libera de un volumen unitario bajo un decremento unitario de la carga hidráulica.

De acuerdo a *Terzaghi* el esfuerzo total  $\sigma_T$  es la suma del esfuerzo efectivo  $\sigma_e$  y la presión p, dado que:

$$d\sigma_T = d\sigma_e + d_p \quad \dots\dots(2.17)$$

Muchos de los problemas de flujo no involucran cambios en el esfuerzo total, el peso de la roca que yace sobre cada punto de un estrato de suelo, permanece prácticamente constante con el paso del tiempo y en tal caso  $d\sigma_T = 0$  implica que:

$$d\sigma_e = -d_p \quad \dots\dots(2.18)$$

En estas circunstancias si la presión del fluido se incrementa, el esfuerzo efectivo decrece en la misma magnitud, así que el esfuerzo efectivo y la deformación volumétrica resultante están controlados por la presión del fluido en cada punto.

Si se considera a  $p = \rho \times g \times h$  y que  $\psi = h - z$  sustituyendo se tiene que:

$$d\sigma_e = -\rho \times g \times d\psi = -\rho \times g \times dh \quad \dots\dots(2.19)$$

La pérdida de carga hidráulica implica un decremento en la presión del fluido y un incremento en el esfuerzo efectivo, el agua liberada del almacenamiento al decrecer  $h$  se produce por dos mecanismos:

- a) Compactación del acuífero por incremento de  $\sigma_e$ .
- b) La expansión del agua por decremento de  $p$ .

El primero se controla mediante la compresibilidad del acuífero y se denota como  $\alpha$ , el segundo mediante la compresibilidad del fluido y se denota como  $\beta$ .

En el primer caso el volumen del agua liberada del volumen unitario durante la compactación es igual a reducción del volumen unitario del acuífero, la reducción volumétrica  $dV_T$  será negativa, pero la cantidad de agua liberada  $dV_w$  es positiva de manera que:

$$dV_w = -dV_T = \alpha \times V_T \times d\sigma_e \quad \dots\dots(2.20)$$

Sustituyendo la ecuación 2.19 en la expresión anterior resulta que:

$$dV_w = -\alpha \times p \times g \times dh \quad \dots\dots(2.21)$$

Si se considera un decremento unitario  $dh = -1$  resulta que:

$$dV_w = -\alpha \times p \times g \quad \dots\dots(2.22)$$

Un incremento en la presión del fluido, significa un decremento en el volumen del agua  $V_w$  la compresibilidad del agua se define como:

$$\beta = \frac{-dV_w / V_w}{d_p} \quad \dots\dots(2.23)$$

El volumen de agua  $V_w$  en el volumen total  $V_T$  es  $n \times V_T$  si  $V_T = 1$  y  $dp = g \times p \times dh = p \times g \times dh$  a su vez considerando que  $dh = -1$  la ecuación 2.22 se transforma en:

$$dV_w = \beta \times n \times p \times g \quad \dots\dots(2.24)$$

De lo anterior podemos deducir que el almacenamiento específico es la suma de los dos términos anteriores:

$$S_s = g \times p \times [\alpha + (n \times \beta)] \quad \dots\dots(2.25)$$

### 2.3.2. Coeficiente de almacenamiento ( S ).

Es el volumen de agua liberado por una columna de base de unidad y de altura equivalente a todo el espesor del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende por una unidad. El coeficiente de almacenamiento, es como la porosidad eficaz, adimensional, y los valores que presenta son mucho más bajos en los confinados perfectos que en los semiconfinados en el siguiente cuadro 2.5. se muestran los valores medios del coeficiente de almacenamiento.

Cuadro 2.5. Valores medios del coeficiente de almacenamiento.

Tipo de Material Permeable	Forma del funcionamiento del Acuífero	Valores medio de S
Kárstico Calizas y dolomías jurásicas Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$2 \times 10^{-3}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$
Poroso Intergranular Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 3.5 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$1 \times 10^{-3}$
	Confinado	$1 \times 10^{-4}$
Kársticos y porosos Calcarenitias marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

**TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN**

### 2.3.3. Transmisibilidad (T).

El parámetro que nos indique la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica será, una combinación de la permeabilidad y del espesor saturado del acuífero, por lo que el producto de ambas es igual a la transmisibilidad.

$$T = k \times e \quad \dots\dots(2.26)$$

Donde:

T Coeficiente de Transmisibilidad.

k Permeabilidad.

e Espesor saturado.

#### a) Transmisibilidad para un Acuífero Confinado

Si se considera un acuífero con espesor  $b$ , su transmisibilidad estará dada por la siguiente expresión:

$$T = k \times b \quad \dots\dots(2.27)$$

Dado el coeficiente de almacenamiento  $S$ , se puede expresar como:

$$S = S_s \times b \quad \dots\dots(2.28)$$

Si se considera la ecuación 2.25 referida al almacenamiento específico resulta que:

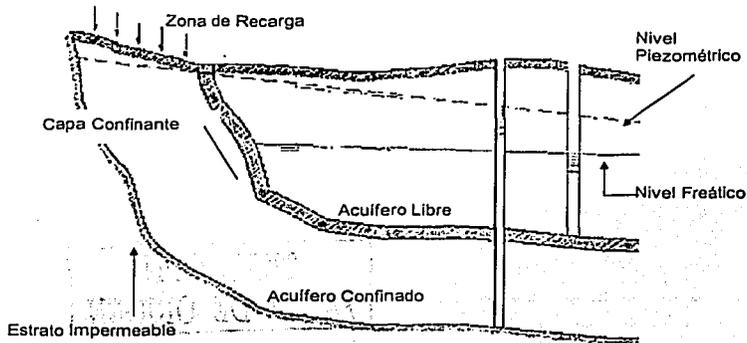
$$S = g \times b \times \rho \times [\alpha + (n \times \beta)] \quad \dots\dots(2.29)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Dado que el almacenamiento  $S$ , para un acuífero confinado se define como el volumen de agua que un acuífero libera por unidad de área superficial, y por unidad de decremento de la carga hidráulica normal a la superficie.

Se considera que una transmisibilidad mayor de  $0.015 \text{ m}^2/\text{s}$  y un intervalo de coeficiente de almacenamiento de  $0.005$  a  $0.00005$  representan un acuífero adecuado para su explotación.

Figura 2.16. Transmisibilidad de un Acuífero Confinado

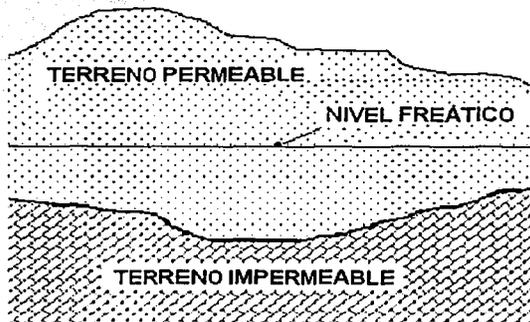


b) Transmisibilidad para un Acuífero no Confinado.

Partiendo de la misma definición de transmisibilidad pero con espesor de acuífero igual al espesor saturado, en este caso será usado el rendimiento específico  $S_y$ , que se define como el volumen de agua que un acuífero no confinado libera por unidad de área superficial, y por unidad de pérdida de carga en el nivel freático.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.17. Transmisibilidad de un Acuífero no Confinado



$$V_w = n \times A \times dh \quad \dots\dots(2.30)$$

Donde:

- n Porosidad efectiva.
- A Área superficial unitaria.
- dh Pérdida unitaria de carga.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

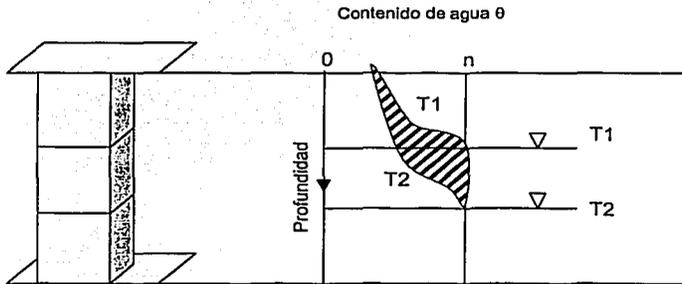
El concepto de rendimiento específico  $S_y$  puede referirse a la interacción entre la zona saturada y la no saturada, en la figura 2.18. se muestra la posición del nivel freático y el perfil vertical del contenido del agua con relación a la profundidad en dos tiempos.

El área sombreada representa el volumen de agua obtenida en una columna de área transversal unitaria. Si la disminución del nivel freático significa una unidad de carga, el área sombreada significa el rendimiento específico  $S_y$ , el rango usual de  $S_y$  va desde 0.001 a 0.3 valores mayores que los que corresponden al intervalo del coeficiente de almacenamiento para acuíferos confinados, éstos valores reflejan que la liberación del almacenamiento en un

acuífero no confinado representa el desagüe de los poros, mientras que un acuífero confinado representa sólo los efectos secundarios de la expansión del agua y de la compactación del acuífero causada por los cambios de presión del fluido.

Las propiedades de almacenamiento más favorables en los acuíferos confinados hacen que su explotación sea más eficiente, ya que se puede obtener la misma producción de agua en menores cambios de carga hidráulica.

Figura 2.18 Relación de profundidad con el contenido de agua.



TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

#### 2.3.4 Permeabilidad o Conductividad Hidráulica ( $K$ ).

En general puede decirse que la velocidad con que circula el agua subterránea es proporcional a una potencia del gradiente hidráulico, multiplicada por una constante de proporcionalidad denominada *conductividad hidráulica*, o *permeabilidad*.

La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él, por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de una velocidad ( $L/T$ ) y modernamente

se distinguen dos tipos: la conductividad hidráulica darciana o lineal  $K_D$  y la conductividad hidráulica turbulenta  $K_T$ .

Diversos experimentos han demostrado que la conductividad hidráulica darciana no sólo depende de las características del medio, sino también de las del fluido, su viscosidad y peso específico por lo que se estableció una relación entre  $K_D$ , las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él.

Esa característica se denomina (permeabilidad intrínseca o geométrica) y se representará por el símbolo  $k$ . La ecuación que relaciona  $K_D$  con  $k$  se puede expresar como:

$$K_D = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \times k = \left(\frac{g}{\nu}\right) \times k \quad \dots\dots(2.31)$$

y también:

$$k = \left(\frac{\nu}{g}\right) \times K_D \quad \dots\dots(2.32)$$

Donde:

- $\gamma$     Peso específico absoluto del fluido.
- $\mu$     Viscosidad dinámica del fluido.
- $g$     Aceleración de la gravedad.
- $\eta$     Viscosidad cinemática del fluido.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La permeabilidad intrínseca tiene las dimensiones de una longitud al cuadrado ( $L^2$ ). Por otra parte, se ha demostrado que al considerar el flujo en medios porosos en su forma más general no lineal, es necesario tomar en consideración un nuevo parámetro adimensional característico de cada medio, o

sea una nueva propiedad intrínseca, que por analogía con el flujo en tuberías denomina rugosidad equivalente, y que se representa por el símbolo C. Esta propiedad está relacionada con la conductividad hidráulica turbulenta por la expresión.

$$K = \left( \frac{g \times \sqrt{k}}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(2.33)$$

Como se puede ver, al disponer de las ecuaciones 2.31 y 2.33 es posible utilizar indistintamente para caracterizar el medio las propiedades KD y KT o en su lugar k y C.

Se ha definido como coeficiente de almacenamiento, que se representará por el símbolo S, como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección unitaria y de altura igual a su espesor saturado, cuando se produce un descenso unitario de la carga hidráulica (del nivel piezométrico o del nivel freático).

De esta definición se deduce que el coeficiente de almacenamiento es adimensional. El concepto fue introducido en la Hidráulica Subterránea en 1935 por C.V. Theis.

En el caso de los acuíferos confinados, el agua liberada procede de los efectos mecánicos de la compresión del cuerpo del acuífero y del agua. En el caso de los acuíferos libres o freáticos, ignorando los efectos relativamente pequeños que puede introducir la elasticidad del acuífero, resulta claro que el coeficiente de almacenamiento es equivalente, a la llamada porosidad efectiva, ya que en ambos casos resulta ser la cantidad de agua que puede ser extraída por gravedad de una unidad de volumen del acuífero saturado.

### **Grados de permeabilidad en acuíferos.**

- a) *Permeabilidad alta.* Los acuíferos que existen bajo esta condición son libres y su comportamiento depende de las condiciones de depósito en que se encuentran localizados. La existencia de agua está comprobada debido a que actualmente hay explotación económica.
- b) *Permeabilidad media.* Se presenta en donde hay arenas y gravas con buenas condiciones de porosidad.
- c) *Permeabilidad baja.* Se presenta debido principalmente a una intercalación de tobas ácidas, derrames basálticos y riolíticos y, en menor proporción, lutitas, esquistos, calizas y areniscas interestratificadas.

## **2.4. FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO**

### *Desarrollo Inicial*

En un acuífero virgen sin explotar, la suma de todas las descargas naturales es igual al promedio de la alimentación que recibió en un periodo anterior determinado, y como consecuencia el almacenamiento subterráneo se mantiene alrededor un valor fijo constante sin variación temporal, las descargas naturales pueden estar presentes, por ejemplo por flujo vertical u horizontal, hacia los ríos o los arroyos como descargas del flujo base, hacia la atmósfera como evaporación, cuando el nivel freático es somero con respecto al terreno, por su parte la descarga puede manifestarse también como flujo subterráneo vertical u horizontal, infiltración vertical desde la superficie del terreno a través de filtración de ríos y arroyos.

El almacenamiento subterráneo fluctúa en el tiempo a través del nivel piezométrico, que se eleva en las épocas en que la recarga es mayor que la descarga y viceversa, el valor promedio de este nivel se mantiene a una cierta profundidad del terreno a través del tiempo, por lo que en términos generales la

recarga natural siempre es menor o igual a la capacidad máxima de infiltración y la recarga horizontal y vertical presentan valores menores que el máximo, para este caso la evaporación del agua subterránea puede tener el máximo valor en la región y por lo que respecta al flujo subterráneo, las salidas también pueden ser máximas.

#### *Desarrollo Intermedio.*

La iniciarse el aprovechamiento del agua subterránea en un acuífero el nivel piezométrico medio puede no variar significativamente en el tiempo, pues la extracción trae como consecuencia una disminución de la evaporación y de las descargas naturales por flujo horizontal o vertical, por su parte la recarga puede aumentar cuando no se ha llegado a la capacidad máxima de infiltración vertical, hasta llegar a un valor tal que equilibre de nuevo las descargas del acuífero con sus entradas. Este es el caso en que se requiere abatir el nivel piezométrico del acuífero para poder explotarlo.

La evaluación de un sistema acuífero virgen por lo general subvalora la recarga, y en su etapa de desarrollo intermedio puede llegar a sobrevalorarla, al referirla en forma proporcional a la lluvia que se precipita en la superficie del terreno o a los volúmenes de riego que se aplican periódicamente en la misma, en este estado de desarrollo se puede presentar la anulación de todas las descargas naturales y la renovación del almacenamiento de agua subterránea puede tener su máxima expresión, manteniendo una calidad uniforme del agua del acuífero.

#### *Desarrollo Avanzado.*

Cuando la sobreexplotación se mantiene, tanto la descarga natural como la recarga manifiestan una disminución, la primera porque desaparece la evaporación del agua subterránea al abatirse el nivel freático y las descargas por flujo subterráneo se eliminan al invertirse los niveles piezométricos sobre todo cuando los conos de depresión alcanzan las zonas de salida.

Por su parte, la recarga llega a su valor máximo, a menos que las condiciones piezométricas propicien el drenaje de almacenamientos laterales de agua subterránea en cuyo caso se estabilizan los gradientes piezométricos en los bordes, iniciándose un reacomodo de las partículas del acuífero para disminuir progresivamente su permeabilidad y porosidad con lo que consecuentemente se llega a reducir la capacidad de infiltración vertical.

En este estado los niveles piezométricos continúan descendiendo y aumentan los gradientes hidráulicos, por lo que la humedad de los suelos y de las zonas no saturadas o parcialmente saturadas, se drena a través del tiempo. Cuando esto sucede se fractura el terreno natural, y en el peor de los casos se presentan hundimientos, lo que además de aumentar el costo de la extracción instalada propicia vías directas de contaminación hacia los acuíferos, a través de las cuales se manifiesta una contaminación desde la superficie.

## **CAPÍTULO III**

### **TÉCNICAS DE RECARGA DE MANTOS ACUÍFEROS**

#### **3.1. PROBLEMÁTICA NACIONAL DEL USO Y MANEJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

México cuenta con 97.4 millones de habitantes, una superficie de casi dos millones de kilómetros cuadrados y una precipitación media anual de 777 milímetros, lo cual equivale a una disponibilidad per-cápita promedio de 4,750 metros cúbicos por año, cantidad suficiente de acuerdo a los estándares internacionales, pero su desigual distribución en espacio y tiempo así como la escasez de agua con la calidad requerida para los diferentes usos, derivan en frecuentes conflictos entre usuarios y regiones, su escurrimiento medio anual es de 417 km<sup>3</sup> (el 1% del escurrimiento mundial); y la disponibilidad media anual por habitante es de 5,125 m<sup>3</sup>, aproximadamente el doble del promedio de disponibilidad per-cápita a nivel mundial; sin embargo, insuficiente para considerarse un país con disponibilidad natural de agua extraordinaria.

Además, dicha disponibilidad se distribuye espacial y temporalmente en forma irregular, con relación a la localización de los principales asentamientos de los grandes centros urbanos e industriales; por ejemplo, en conjunto las Zonas Metropolitanas como son la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, que utilizan más del 50% del agua disponible para uso urbano e industrial. Por otra parte, las demandas se incrementan en general al ritmo del crecimiento de la población y de las actividades productivas, mientras que la oferta del recurso se mantiene relativamente estable, ejerciéndose fuertes presiones tanto a la capacidad natural como a la infraestructura existente y a la disponibilidad de los recursos financieros para mantenerla y aumentarla. Adicionalmente, aunque hay avances, se siguen presentando patrones ineficientes en las prácticas de uso, aprovechamiento y descarga de agua, lo que ha ocasionado perjuicios que en algunos casos no tienen fácil solución, tales como intrusión salina y hundimiento de terrenos por sobreexplotación de acuíferos; pérdida de la cantidad y calidad de

cuerpos de agua superficiales y contaminación excesiva en las principales cuencas del país, lo que afecta negativamente el equilibrio ecológico de diversas regiones.

*Problemática fundamental de acuerdo a los usos que se destine.*

Uso Público, Urbano.- Hay niveles elevados de rezago en la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado en el medio rural (36% sin agua potable y 68% sin drenaje). Además, las tarifas por la prestación del servicio son bajas y no incluyen el costo de saneamiento del agua. Finalmente, hay una escasa cultura de pago por la prestación de los servicios.

Uso Agrícola.- El sector agrícola es el mayor consumidor de agua en el país, y el que presenta menor eficiencia en su uso. Adicionalmente, se requiere intensificar la modernización y rehabilitación de la infraestructura agrícola, y consolidar la infraestructura de riego y temporal tecnificado.

Uso Industrial.- El problema principal es la contaminación de cuencas y acuíferos por las descargas de aguas residuales industriales.

*3.1.1. La escasez de agua en México*

*Escasa captación del agua en época de lluvias.*

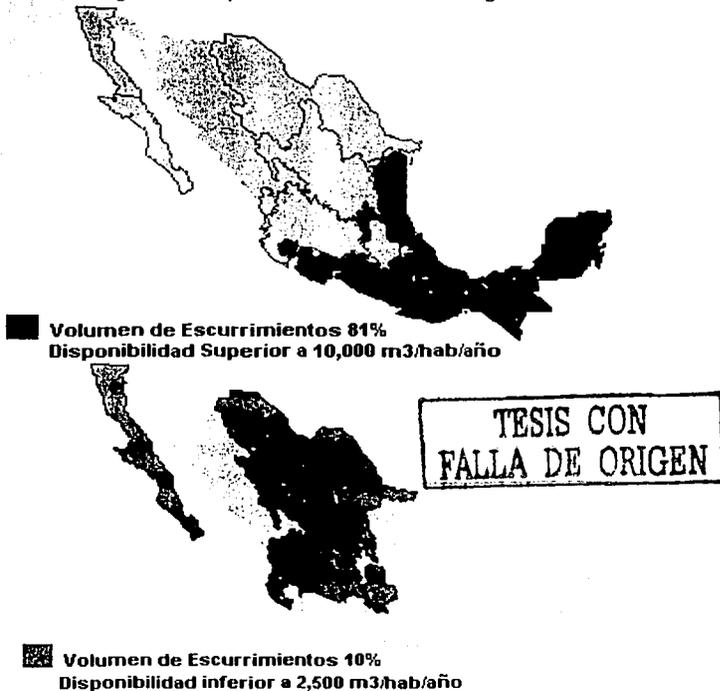
En nuestro país, la duración de la época de lluvias es muy corta ya que comprende únicamente cuatro meses, tiempo insuficiente para lograr una buena captación del recurso y poder abastecer a toda la gran población.

Como muestra de esta particularidad, del total de agua captada por lluvias, el 70% se evapora. Además, el escurrimiento del agua es mínimo en relación con el extenso territorio del país.

*Diferencias Territoriales.*

En el Norte del país, es sólo 4% la captación de agua por escurrimiento, mientras que en el Sureste y las zonas costeras se logra un 50%. En la región Norte, por su naturaleza desértica, su problema es mucho mayor debido a que sólo se abastece por medio del almacenamiento de agua en presas. El uso del agua en esa región es para la actividad agrícola, y en épocas de sequía los efectos suelen ser devastadores para la propia vida de muchas personas.

Figura 3.1 Desequilibrio en la distribución del agua.



### Uso desmedido del agua en el sector agrícola.

Como es sabido el sector agrícola es que el más absorbe agua en todo el mundo, en México el uso ha sido mucho mayor. Desde 1940, se han destinado grandes recursos a proyectos de riego, a esto hay que sumarle que el 76% del total de agua disponible se aprovecha en este sector, de esta forma el problema de fondo radica en que los sistemas de riego son obsoletos.

Figura 3.2 Distribución de la extracción total Nacional.



### Sobrepoblación.

El país presenta un desequilibrio estructural por las condiciones naturales, y por la concentración de su población y de sus actividades económicas, de acuerdo al censo de INEGI la población en 1995 era de 91.2 millones de habitantes, en donde el 73% se concentraba en comunidades urbanas (22% en el Valle de México), la dinámica del crecimiento demográfico ha tenido un cambio importante a partir de la década de los 70, debido principalmente a los programas de planificación familiar, así la tasa de crecimiento descendió del 3.4% en 1970 a 2.5% en 1980, hasta llegar a 1.5% a finales de 1990.

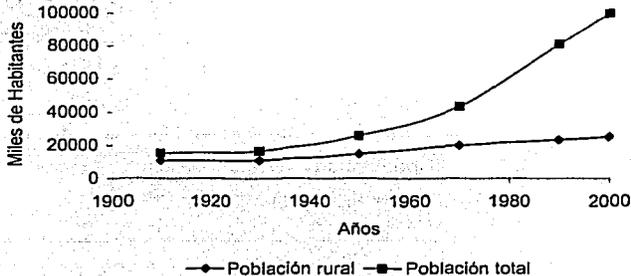
Según las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) la tasa de crecimiento seguirá disminuyendo paulatinamente en las próximas décadas hasta alcanzar un valor negativo en el año 2044, se estima que la

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

población en el año 2010 será del orden de 110 millones mientras que para el 2025 será de 124 millones de habitantes

Sobre la Ciudad de México, ocurre una situación muy especial. La sobrepoblación que día con día hace que la Zona Metropolitana se extienda provoca que el agua de lluvia difícilmente se filtre al subsuelo, dado que al transcurso de los años las zonas arboladas han ido desapareciendo para dar paso a la construcción de viviendas.

Figura 3.3 Tendencia del crecimiento poblacional en México.



#### *Problemas que se enfrentan para satisfacer las demandas crecientes.*

El abastecimiento del agua al ritmo de la demanda creciente, en las regiones donde se localiza el mayor volumen de extracción y de mayor dinámica por la actividad económica y crecimiento poblacional, cada vez es más complejo y costoso. Los costos promedio de extracción, suministro, potabilización y tratamiento se incrementan obviamente en los sitios de escasez relativa y donde existe contaminación. Se estima que la inversión requerida para agregar un m<sup>3</sup> de suministro anual durante el período de 1976-1996 fue, en promedio 2.5 veces mayor que la que se necesitó en el período de 1950-1975 (a precios constantes de 1996).

Los subsidios en el país son todavía muy altos, tanto a la inversión como a la operación y mantenimiento, incluso al gasto corriente de los sistemas hidráulicos federales o municipales. Los esquemas de subsidios como se han planteado son regresivos porque producen un efecto contrario al beneficiar a los que más tienen.

En los últimos años, el problema de la sobreexplotación de los recursos naturales y la necesidad inaplazable de proteger el medio ambiente ante el incremento de los niveles de contaminación, han adquirido relevancia internacional, inducidos por la creciente evidencia de su carácter irreversible.

En relación con el agua existe una disponibilidad natural de 1,500 millones de km<sup>3</sup> a nivel mundial, esta cifra pareciera garantizar el abasto del recurso con suficiencia; sin embargo, cuando se observa que el volumen total renovable sólo alcanza una tercera parte de esa cantidad y que los escurrimientos naturales, tanto superficiales como subterráneos, llegan a una mínima cifra de 40,000 km<sup>3</sup> al año, es claro que la disponibilidad real del líquido presenta evidentes características de escasez natural, acentuada por una distribución regional desigual.

El problema de la disponibilidad efectiva del agua es aún mayor por los desequilibrios hidráulicos que ocasiona el constante crecimiento de la demanda, la ineficiencia de su uso y el aumento de los niveles de contaminación ocasionados por prácticas inadecuadas en esquemas de producción y consumo.

#### *La problemática económica del recurso agua.*

La explotación, el manejo y la administración integral efectiva de los recursos hidráulicos, se han convertido en una necesidad prioritaria para todos aquellos sectores socio-económicos, que dependen críticamente del agua, para continuar su ritmo y nivel de desarrollo. En general, una asignación y uso racional

de los recursos, evita conflictos distributivos, productivos y socio-políticos, y fortalece el desarrollo económico y social de los países.

Una administración eficiente y equitativa de la oferta y demanda del recurso, permite a los sectores usuarios desarrollar sus actividades productivas eficazmente y obtener ahorros a mediano y largo plazo. Asimismo, la eficiencia estimula el uso y desarrollo de tecnología que aumenta la productividad, reduce los costos de producción y confiere altos niveles de competitividad industrial al país.

Por estas razones entre otras, las actividades socioeconómicas incluyendo la urbanización, la producción industrial, los servicios y la agricultura, han llegado actualmente a una etapa en que los problemas relacionados con el agua se han convertido en un factor limitante para su desarrollo y evolución sustentable.

También por esas razones, es importante reconocer la importancia que para la economía de un país tiene el uso eficiente del agua y la protección del medio ambiente, y hacer esfuerzos para que su uso o aprovechamiento tienda a considerar criterios de eficiencia, racionalidad económica y sustentabilidad.

Resulta importante destacar el hecho de que el agua, anteriormente considerada por muchos como un bien público "libre" y de muy bajo o nulo costo, si bien propiedad de la Nación, se ha ido transformando con el tiempo, en un bien económico y, ante todo social. Lo anterior, deja de manifiesto que dicho recurso ha alcanzado hoy en día, un alarmante nivel de escasez relativa que amenaza con limitar fuertemente su distribución entre los diferentes usos alternativos.

Sin embargo, la fijación de un precio al agua no es un problema de fácil solución, (existen muy diversas metodologías para calcularlo y; sin embargo, muy poca información relevante y condiciones en nuestros países para lograrlo), es importante destacar que su solución forma parte estratégica en el diseño y uso de los instrumentos de política económica del sector hidráulico.

### 3.1.2. Agua Subterránea.

Procedente de la lluvia, el agua al caer al suelo puede tomar varias rutas, pudiendo correr por la superficie del suelo y desembocar en ríos y lagos, un porcentaje será usado por las plantas y árboles, y otro porcentaje se evaporará, el resto se infiltrará al subsuelo, de ahí el agua que empapa el material de tierra subterránea se le llama agua subterránea, se mueve lentamente, por lo general en centímetros por año, las aguas subterráneas constituyen el 95% del agua dulce de nuestro planeta, y apenas el 5% es constituido por ríos, lagos y otros, es por ésta razón que las aguas subterráneas tienen gran importancia, su uso ha ido creciendo en los últimos años debido a su vez por la degradación de las aguas superficiales como consecuencia del crecimiento poblacional y grandes desarrollos industriales, en el cuadro 3.1 se muestran los cuerpos de agua existentes en México.

Cuadro 3.1 Disponibilidad de agua subterránea en México.

CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA	
Número de Acuíferos	649
Recarga media de acuíferos [Km <sup>3</sup> /año]	68
Recarga natural media	53
Recarga inducida media	15
Número de acuíferos sobreexplotados	96
Volumen promedio de agua no renovable extraído de acuíferos sobreexplotados [Km <sup>3</sup> /año]	8
Número de acuíferos con problemas de intrusión salina.	18
<i>Fuente: Comisión Nacional del Agua, Compendio Básico del Agua en México, CNA, México, 2001.</i>	

El agua subterránea llega a la superficie de forma natural por medio de manantiales, lagos y arroyos, o se puede extraer a través de un pozo que se conecta al acuífero.

Las aguas subterráneas se constituyen de dos componentes principales, el volumen renovable (recarga estacional del acuífero) y volumen no renovable

(almacenamiento del acuífero), el manejo de ambos depende en gran medida del potencial de que tenga cada uno de ellos, y demás de la existencia de alternativas que permitan realizar el uso conjunto de los recursos hidráulicos.

### 3.1.3. Contaminación del Agua Subterránea.

Para tener un uso adecuado del agua subterránea, deberá tenerse en cuenta un conocimiento muy firme de sus características naturales y de posibles contaminantes, derivados de la actividad del hombre, la calidad del agua subterránea queda definida por su composición, y del conocimiento de los efectos que ésta puede causar debido a uno o varios de los componentes que ésta contenga.

Existe un gran número de posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos, entre ellos se encuentran principalmente las siguientes:

*Las actividades domésticas.*- La contaminación es esencialmente carga orgánica y biológica nacida de las fosas sépticas, pozos negros, fugas en los sistemas de alcantarillado, así como la contaminación en el uso de productos químicos como los detergentes.

*Labores de la Agricultura.*- Esta contaminación es principalmente por abonos de estiércol, el cual contamina con la aportación de nitratos, aumentando la alcalinidad de infiltración profunda, así como en la utilización de pesticidas.

*Aguas Salinas.*- Este tipo de contaminación es generado por el movimiento lateral o verticales de aguas salobres o saladas naturales que tienen filtraciones a través de medios porosos.

*Efecto de Aguas Superficiales.*- La contaminación se genera cuando las aguas superficiales producen una recarga de acuíferos y contaminan las aguas subterráneas.

**Actividades Industriales.-** Aquí dependerá del tipo de Industria y desecho que produzca por lo general es una contaminación de aguas de aspecto insalubre y nocivas procedentes de la industria con actividades como la metalurgia, minería y de alimentación.

**Pozos mal contruidos o abandonados.-** La contaminación de los pozos en abandono o por su mal construcción se manifiesta cuando los pozos presentan entubaciones rotas o corroídas en niveles de agua de mala calidad y que permiten el acceso de las aguas superficiales contaminadas.

**Vertido de Basura.-** Es una contaminación orgánica, biológica, e inorgánica producida por el entierro de basura en forma inadecuada en material permeable o que esté en contacto con el nivel freático.

**Actividades Nucleares.-** Además de aportar componentes orgánicos e inorgánicos de contaminación, también producen combustibles nucleares irradiados.

La calidad del agua se determina a partir de los análisis químicos, físicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde un análisis sencillo hasta uno más complejo.

**a) Índice de Calidad del Agua.**

El Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento; en tanto que, el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100%.

El ICA fue desarrollado de acuerdo con las siguientes etapas: La primera etapa consistió en crear una escala de calificación de acuerdo con los diferentes usos del agua. La segunda involucró el desarrollo de una escala de calificación

para cada parámetro de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación. Después de que fueron preparadas estas escalas, se formularon los modelos matemáticos para cada parámetro, los cuales convierten los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro ( $I_i$ ). Debido a que ciertos parámetros son más significativos que otros en su influencia en la calidad del agua, este hecho se modeló introduciendo pesos o factores de ponderación ( $W_i$ ) según su orden de importancia respectivo. Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua.

Cuadro 3.2 Parámetros del ICA, según su importancia relativa.

Parámetro	Peso ( $W_i$ )	Parámetro	Peso ( $W_i$ )
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	5.0	Nitrógeno en nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales ( $\text{PO}_4^{3-}$ )	2.0	Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ )	2.0	Turbiedad	0.5

### Técnica del ICA.

Se obtiene a través de la siguiente forma:

$$\text{ICA} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Donde el subíndice  $i$  identifica a cada uno de los 18 parámetros antes presentados, por lo que  $i = 1, 2, \dots, 18$ , y  $n = 18$ .

Donde:

ICA Índice de Calidad General.

$I_i$  Índice de calidad del parámetro considerado.

$W_i$  Valor de la importancia relativa de parámetro considerado.

El coeficiente  $W_i$  que se propone, se asigna arbitrariamente conforme a la importancia del parámetro.

Técnica del ICA (Dinios), modificada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM

Se obtiene de la siguiente forma:

$$ICA = \prod_{i=1}^n Q_i W_i$$

Donde:

$Q_i$  Calidad del parámetro

$W_i$  Importancia que se asigna arbitrariamente.

ICA Índice de Calidad General.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En la cuadro 3.3 se muestra, el Índice de Calidad de las aguas subterráneas de algunas Entidades Federativas.

Cuadro 3.3 Calidad de Aguas Subterráneas en México.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA EN ESTACIONES DE MEDICIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA POR ENTIDAD FEDERATIVA, 1998												
Entidad Federativa	Excelente		Aceptable		Levemente contaminada		Contaminada		Fuertemente contaminada		Excesivamente contaminada	
	%	Media	%	Media	%	Media	%	Media	%	Media	%	Media
Baja California	0	na	0	na	100	73.01	0	na	0	na	0	na
Baja California Sur	0	na	0	na	0	na	0	na	0	na	100	31.64
Campeche	0	na	0	na	0	na	0	na	100	44.08	0	na
Colima	0	na	0	na	0	na	100	58.26	0	na	0	na
Comarca Lagunera	0	na	0	na	0	na	5.3	62.92	94.7	49.7	0	na
Durango	0	na	3.7	81.57	33.3	75.66	28.6	57.74	33.33	46.74	0	na
Guanajuato	0	na	0	na	14.3	76.06	85.7	60.34	0	na	0	na
Morelos	0	na	0	na	75	74.5	25	62.22	0	na	0	na
Nayarit	0	na	0	na	0	na	100	65.82	0	na	0	na
Quintana Roo	0	na	0	na	0	na	0	na	0	na	100	25.58
San Luis Potosí	0	na	0	na	0	na	42.8	54.24	57.2	45.88	0	na
Yucatán	0	na	0	na	0	na	50	59.29	50	49.69	0	na
Zacatecas	0	na	0	na	0	na	14.3	52.6	85.71	46.3	0	na

<sup>1</sup> Porcentaje del número de estaciones de medición que se ubican en cada una de las categorías de calidad del agua del ICA.

<sup>2</sup> Promedio del ICA de las estaciones de medición consideradas en cada categoría de calidad del agua.

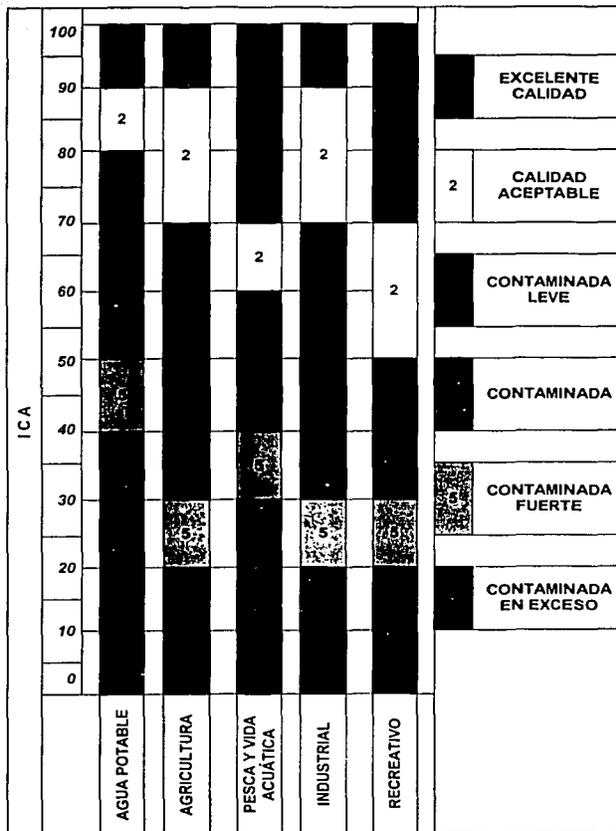
na: No aplica.

Nota: La red de medición de calidad de aguas subterráneas cuenta con estaciones sólo en doce entidades federativas y en la Comarca Lagunera. La red consta de 228 estaciones en 24 acuíferos, se presentan sólo éstos Estados por falta de información de los restantes.

Fuente: Semarnap, Comisión Nacional del Agua, 1999.

En la cuadro 3.4, se muestra la calidad adecuada para cada uso; de acuerdo, a las técnicas mencionadas anteriormente.

Cuadro 3.4 Índice de Calidad según el Uso del Agua.



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La problemática de las aguas subterráneas en México, ha tomado importancia en los últimos años debido a que anteriormente no se tomaba en cuenta la calidad de las aguas subterráneas, solo importaba que fuera suficiente para abastecer la demanda requerida, de ahí que no se tenga mucha información acerca de la calidad, a partir de los años noventas, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se dio a la tarea de estudiar las condiciones de los acuíferos mexicanos, dando a conocer las características de explotación, así como las corrientes subterráneas y dirección de flujo de las mismas, plasmando toda esta información en 11 cartas hidrológicas, o de manera digital, compiladas en 122 hojas que abarcan el territorio nacional en un disco compacto, las cuales pone a disposición del público en cualquiera de sus dependencias.

El territorio nacional ha sido cubierto en éstas 11 cartas hidrológicas (Chihuahua, Durango, Guadalajara, Hermosillo, La Paz, Mérida, Mexicali, México, Monterrey, San Luis Potosí y Villahermosa), en el cuadro 3.5, se muestra un resumen de las características principales de dichas cartas, abarcando algunos poblados de los 32 Estados de la República Mexicana.

*Cuadro 3.5 Condiciones de Explotación Acuífera*

<i>Región Chihuahua.</i>		
<b>Estado</b>	<b>Poblado</b>	<b>Condición de Explotación Acuífera</b>
Chihuahua	Cd. Juárez	Subexplotado
	Valle de Juárez	En Equilibrio
	Laguna de Patos	Subexplotado
	El Sauz	Subexplotado
	Cuauhtémoc	Sobreexplotado
	Guerrero	Subexplotado
	Delicias	En Equilibrio
Coahuila	Cerro Colorado	En Equilibrio
	Sierra Mojada	Subexplotado

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<b>Región Durango.</b>		
<b>Estado</b>	<b>Poblado</b>	<b>Condición de Explotación Acuífera</b>
Sinaloa	Cullacán	En Equilibrio
	M.I. del Río	Subexplotado
	San Lorenzo	Subexplotado
Durango	Aguanaval	Subexplotado
	La Laguna	Sobreexplotado
	Gómez Palacio	Sobreexplotado
Coahuila	Torreón	Sobreexplotado
	Valle del Hundido	Subexplotado
	Laguna del Rey	Subexplotado
	Laguna del Coyote	Subexplotado
	Cuatro Ciénegas	Sobreexplotado
	Saltillo	En Equilibrio

<b>Región Guadalajara.</b>		
<b>Estado</b>	<b>Poblado</b>	<b>Condición de Explotación Acuífera</b>
Jalisco	Jalisco	En Equilibrio
	Sahuayo	Subexplotado
	San Juan de los Lagos	Subexplotado
	Puerto Vallarta	Subexplotado
	Tequila	Subexplotado
	San Martín Hidalgo	Subexplotado
Colima	Colima	Subexplotado
	Tecoapan	Subexplotado
	Manzanillo	Subexplotado
Michoacán	Apatzingán	Subexplotado
	Lázaro Cárdenas	Subexplotado
	Uruapan	Subexplotado
	Zamora	Subexplotado
Nayarit	Tepic	Subexplotado
	Santiago Ixcuintla	Subexplotado
	Tuxpan	Subexplotado
Sinaloa	Mazatlán	Subexplotado
Zacatecas	Guadalupe	Sobreexplotado
	Zacatecas	Sobreexplotado

**TESIS CON  
FALTA DE COPIEN**

Zacatecas	Fresnillo	Sobreexplotado
	Río Grande	Subexplotado
Aguascalientes	Aguascalientes	Sobreexplotado
	Calvillo	Sobreexplotado
	Rincón de Romas	Sobreexplotado

**Región Hermosillo.**

Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuífera
Sonora	Sonoyta	Sobreexplotado
	Caborca I	Sobreexplotado con Intrusión Salina
	Caborca II	En Equilibrio
	Río Magdalena I	Sobreexplotado
	Río Magdalena II	En Equilibrio
	San Ignacio	Sobreexplotado
	Cananea	Sobreexplotado
	Agua Prieta	Subexplotado
	Río Moctezuma	En Equilibrio
	Costa de Hermosillo	Sobreexplotado
	Guaymas	Sobreexplotado
	Sahuaral	Sobreexplotado
	Agua Caliente	Sobreexplotado
Chihuahua	Ascención-Janos	Sobreexplotado
	Casa Grande I	Sobreexplotado
	Casa Grande II	Sobreexplotado

**Región La Paz.**

Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuífera
Baja California Sur	Cabo San Lucas	Subexplotado
	San José del Cabo	Subexplotado
	San Juan de los Planes	Sobreexplotado con Intrusión Salina
	Puerto San Carlos	Sobreexplotado con Intrusión Salina
	Desierto de Vizcaína	Sobreexplotado
	Guerrero Negro	Sobreexplotado con Intrusión Salina
Sinaloa	Guamuchil	Subexplotado
	Guasave	Subexplotado
Sonora	Guaymas	Sobreexplotado

<i>Región Mérida.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuifera
Yucatán	Mérida	Subexplotado
	Valladolid	Subexplotado
	Tizimín	Subexplotado
Quintana Roo	Cancún	Subexplotado
	Isla Mujeres	Subexplotado
	Tulum	Subexplotado
	Cozumel	Subexplotado
Campeche	Felipe Carrillo Puerto	Subexplotado
	Campeche	Subexplotado
	Escarcega	Subexplotado
	Chamotón	Subexplotado

<i>Región Mexicali.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuifera
Baja California Norte	Valle de San Quintín	Sobreexplotado con Intrusión Salina
	Ensenada	Sobreexplotado
	Mexicali	Sobreexplotado
	San Felipe	Subexplotado
	San Pedro Mártir	Subexplotado

<i>Región México.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuifera
Guerrero	Acapulco	Subexplotado
	Petalán	Subexplotado
	Zihuatanejo	Subexplotado
	Chilpancingo	Subexplotado
	Iguala	Subexplotado
Oaxaca	Santiago Nacional	En Equilibrio
	Puerto Escondido	En Equilibrio
	Oaxaca	Subexplotado
	Huapan de León	Subexplotado
Veracruz	Santiago inxtlanca	En Equilibrio
	Veracruz	Subexplotado
	Los Naranjos	Subexplotado

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Veracruz	Córdoba	En Equilibrio
	Orizaba	En Equilibrio
Puebla	Puebla	Sobreexplotado
	Tehuacan	En Equilibrio
	Cholula	Subexplotado
	Perote	Subexplotado
	Atlixco	En Equilibrio
Tlaxcala	Tlaxcala	Subexplotado
	Hamantla	Subexplotado
Hidalgo	Cd Sahagún	Sobreexplotado
	Tizayuca	Sobreexplotado
Cd de México	Cd de México	Sobreexplotado
Estado de México	Toluca	Sobreexplotado
Morelos	Cuernavaca	Subexplotado
	Cuautla	Subexplotado
	Puente de Ixtla	Subexplotado
	Temixco	Subexplotado
Michoacán	Morelia	Subexplotado
	Maravatio	Subexplotado
	Pátzcuaro	Subexplotado

<i>Región Monterrey.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuifera
Coahuila	Piedras Negras	En Equilibrio
	Palestina	Subexplotado
	Monclova	Sobreexplotado
	Cd Sabines	En Equilibrio
Nuevo León	Cd Anahúac	Subexplotado
	Parás	En Equilibrio
	Aguaaleguas	Subexplotado
	El Durazno	En Equilibrio
	Citricola Norte	En Equilibrio
	China General Bravo	Subexplotado
Tamaulipas	San Fernando	Subexplotado
	Hidalgo Villagrán	Subexplotado
	Bravo Zona Norte	Subexplotado

<i>Región San Luis Potosí.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuífera
Veracruz	Poza Rica	Subexplotado
	Martín de la Torre	En Equilibrio
	Tecoluitla	Subexplotado
Tamaulipas	Cd. Madero	Subexplotado
	Cd. Victoria	Subexplotado
	Soto la Marina	Subexplotado
	Gómez Farías	Subexplotado
	Cd. Mante	Subexplotado
	Cd. Valles	Subexplotado
Hidalgo	Tulancingo	En Equilibrio
	Pachuca	Sobreexplotado
	Valle del Mezquital	Subexplotado
	Ixmiquilpan	Sobreexplotado
Querétaro	Zimapán	Sobreexplotado
	Querétaro	Sobreexplotado
	San Juan del Río	Sobreexplotado
	Buenavista	En Equilibrio
Guanajuato	Tequisquiapan	Sobreexplotado
	Celaya	Sobreexplotado
	Moroleón	Sobreexplotado
	Acámbaro	Sobreexplotado
	Guanajuato	Sobreexplotado
Jalisco	León	Sobreexplotado
	Lagos de Moreno	Sobreexplotado
Zacatecas	Villa Hidalgo	En Equilibrio
	San Luis Potosí	Sobreexplotado
San Luis Potosí	Río Verde	Sobreexplotado
	Buenavista	Subexplotado
	Salinas Hidalgo	Sobreexplotado

INSTITUTO  
 NACIONAL DE  
 ESTADÍSTICA Y  
 CENSOS  
 PATA DE ORIGEN

<i>Región Villa Hermosa.</i>		
Estado	Poblado	Condición de Explotación Acuífera
Veracruz	Alvarado	Subexplotado
	Catemaco	Subexplotado

Veracruz	Coatzacoalcos	En Equilibrio
	Minatitlán	En Equilibrio
	Papaloapan	Subexplotado
Oaxaca	San Francisco del Mar	Subexplotado
	Juchitán de Zaragoza	Subexplotado
	Salina Cruz	Subexplotado
Chiapas	Tonalá	Subexplotado
	Tapachula	Subexplotado
	Emiliano Zapata	Subexplotado
	Palenque	Subexplotado
Tabasco	Frontera	Subexplotado
	Las Choapas	Subexplotado
	Chontala	Subexplotado
	Sña María Conduacan	Subexplotado

Fuente: Cartas Hidrológicas de Aguas Subterráneas

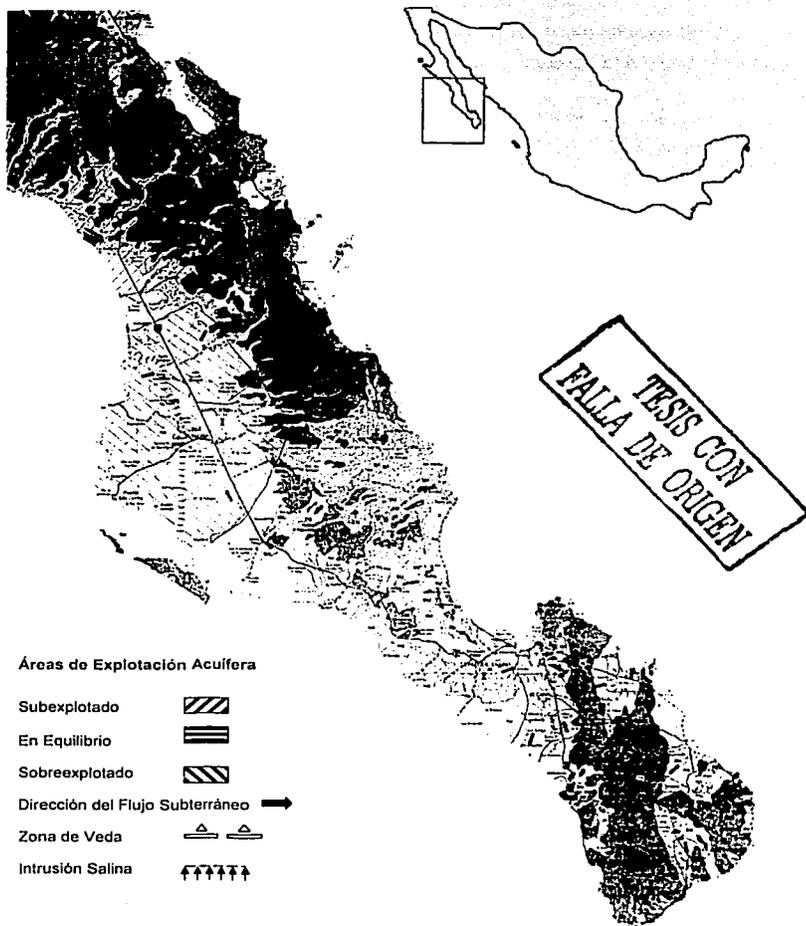
Escala 1: 1,000, 000 INEGI 1996.

Dichas cartas hidrológicas han sido realizadas por INEGI en el año de 1991, pero actualizadas en 1996, y en lo que respecta a la calidad del agua, la misma dependencia ha realizado un gran número de estudios de acuíferos mexicanos, lamentablemente no se tiene un panorama general a nivel nacional de dichos estudios, solamente se cuenta con estudios puntuales de ciertos acuíferos, realizados por empresas particulares, las cuales se encargan de estudiar la factibilidad de éstos acuíferos.

A su vez en la figura 3.4 se muestra únicamente la región comprendida por el Estado de Baja California Sur, donde se observan las características de explotación de algunos acuíferos, además de zonas con problemas de intrusión salina, cabe mencionar que se presenta una sección del Estado, ya que para una consulta más detallada INEGI cuenta con cartas e información digital para consulta pública.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.4 Carta Hidrológica de Baja California Sur.



### 3.1.4. Prevención y Corrección de la Contaminación.

La *prevención* contemplará aquellas medidas que tengan por objeto evitar que se produzca la contaminación, como puede ser el caso de:

- a) *Estudios de vulnerabilidad de los acuíferos.*- Será la definición de las conexiones con aguas superficiales, infiltración, conexiones laterales, esquemas de flujos, capacidad autodepurante, etc.
- b) *Ordenamiento legal de los suelos.*- En función de la vulnerabilidad existente, se establecerán perímetros de protección, normatividad de vertidos, de construcción y abandono de sondeos, etc.
- c) *Recopilación de Datos.*- Referido a inventarios, localización y caracterización de posibles focos de contaminación, fugas de conducciones sanitarias, escapes industriales, vertederos, etc. Así como el estudio del nivel de contaminantes de tipo difuso (compuestos nitrogenados, pesticidas, etc).
- d) *Redes de vigilancia y control.*- Para de esta forma satisfacer la calidad del agua.
- e) *Campañas informativas.*- Poner a disposición del público en general información necesaria acerca de la vulnerabilidad de los acuíferos y sus efectos.

La *corrección* serán aquellas medidas que intentarán recuperar la calidad de las aguas subterráneas, hasta hacerlas de nuevo aptas para el uso a que estén destinadas, podríamos destacar las siguientes:

- a) *Identificación del origen de la contaminación.*- Detectando los focos de contaminación existente, estudiando los posibles focos de contaminación difusa.

- b) *Evaluación.*- Realizar los estudios necesarios para conocer y determinar el alcance del problema.
- c) *Eliminación.*- Una vez identificado el causante de la contaminación lo siguiente sería la eliminación del mismo, realizando la limpieza necesaria.

### **3.2. REGIONALIZACIÓN**

El Gobierno de México, a fin de modernizar y hacer más eficaz su intervención y cumplir los mandatos y facultades que la Constitución y la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento le otorgan en materia de aguas, ha emprendido la implantación de una estrategia de largo plazo muy amplia y general que tiende a la reforma profunda del sector hidráulico federal y al cambio de sus formas convencionales de actuación la cual contempla, las siguientes acciones:

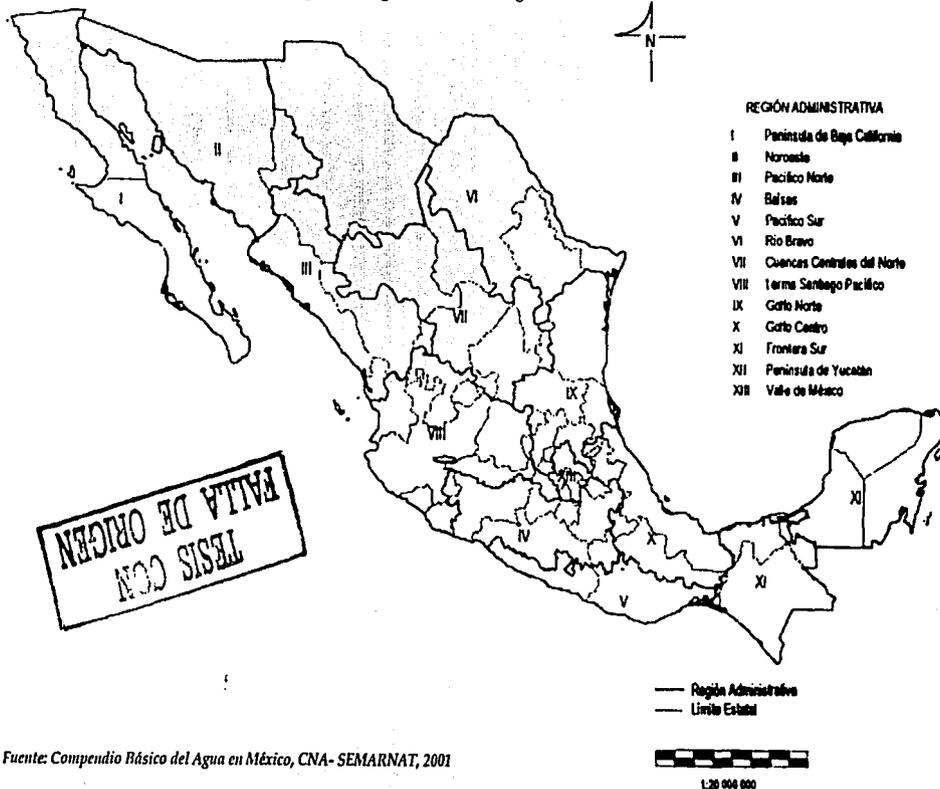
#### *Regionalización Administrativa.*

Esta regionalización contempla la creación y consolidación de 13 Gerencias mostradas en la figura 3.5, en donde se desconcentrarán las tareas, funciones y facultades a cargo de la Comisión Nacional del Agua y en donde se atenderán todos los asuntos de competencia federal en el ámbito de sus respectivos territorios, mismos que corresponden con grandes macro cuencas o con grupos de cuencas más pequeñas.

A nivel estatal, la organización regional de la CNA, se complementará con oficinas más pequeñas que servirán de enlace con los gobiernos estatales y llevarán los trámites de administración de las aguas nacionales.

La descentralización de funciones, programas y recursos que hasta los últimos años venían siendo ejercidos o ejecutados de manera centralizada, en el futuro estarán cada vez más en poder de las instancias gubernamentales estatales

Figura 3.5 Regionalización del Agua a nivel Nacional.



Fuente: Compendio Básico del Agua en México, CNA- SEMARNAT, 2001

y municipales y directamente en manos de los usuarios del agua, como es el caso de la administración, mantenimiento y operación de los distritos de riego.

La creación y desarrollo de Consejos, Comisiones y Comités en las principales cuencas hidrográficas y acuíferos en que se divide el territorio del país, como organizaciones colegiadas para la participación de los usuarios y de la sociedad en los asuntos del agua. La reforma institucional del sector hidráulico federal que incluye, tanto la incorporación de las más modernas tecnologías para el manejo y proceso de información relacionada con la cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo bases de datos y sistemas cartográficos.

Así como la capacitación y actualización profesional en gran escala del personal en servicio, y el cambio de los perfiles convencionales de los trabajadores del sector hidráulico para que haya mayor correspondencia entre funciones y formación profesional, en el cuadro 3.6 se muestra la disponibilidad del agua según las regiones administrativas.

Cuadro 3.6 Número de acuíferos por regiones Administrativas.

Región Administrativa	Número de Acuíferos	Cantidad de Recarga hm <sup>3</sup>
Península de Baja California	87	1394
Noroeste	62	2767
Pacífico Norte	23	1392
Balsas	40	3351
Pacífico Sur	34	1726
Frontera Norte	92	5321
Cuencas Centrales del Norte	71	1662
Lerma-Santiago Pacífico	130	7113
Golfo Norte	41	1207
Golfo Centro	22	2349
Frontera Sur	20	6220
Península Yucatán	14	31053
Valle de México	13	2070

Fuente: "Regiones Administrativas" Comisión Nacional del Agua

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### *Consejos de Cuenca*

La planeación hidráulica toma como unidades geográficas las trece regiones hidrológicas que constituyen las regiones administrativas definidas por la CNA. Cada región esta formada por una o varias cuencas de esta manera se garantiza que la cuenca hidrológica sea la base para la administración del agua.

Para garantizar la congruencia en las estrategias nacionales que se persiguen en las cinco mesorregiones definidas por la Oficina de la Presidencia, se agrupan las regiones hidrológicas conforme a su regionalización.

### *Mesorregiones*

Sur-Sureste: Incluye a las Regiones Hidrológico-Administrativas: XII Península de Yucatán, XI Frontera Sur, V Pacífico Sur, la mayor parte de la región X Golfo Centro y una porción de las regiones IV Balsas y IX Golfo Norte

Centro-Occidente: Incluye a la Región VIII Lerma-Santiago Pacífico, porciones de las Regiones VII Cuencas Centrales del Norte, IX Golfo Norte, IV Balsas y una pequeña porción de la Región III Pacífico Norte.

Centro: Incluye a la Región XIII Valle de México, una porción de las Regiones IV Balsas, IX Golfo Norte y X Golfo Centro y una pequeña porción de la Región VIII Lerma- Santiago-Pacífico.

Norte: Incluye a la Región VI Río Bravo, partes de las Regiones IX Golfo Norte, VII Cuencas Centrales del Norte y III Pacífico Norte, y una pequeña porción de la Región II Noroeste.

Noroeste: Incluye a la Región I Península de Baja California y la mayor parte de las Regiones II Noroeste y III Pacífico Norte.

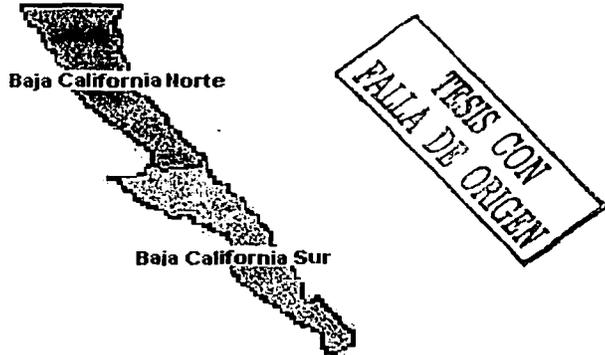
### 3.2.1. Regionalización en México.

#### a) REGIÓN I PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA

La Región I Península de Baja California se ubica en el Noroeste de México, tiene una superficie de 149,000 km<sup>2</sup> (2.8% del territorio nacional), incluyendo la superficie insular. Comprende la totalidad de Baja California Norte y Baja California Sur, con cinco municipios cada uno, la región se divide en dos subregiones: Baja California Norte con 70,000 km<sup>2</sup> y Baja California Sur en su totalidad.

La región depende en gran medida de sus recursos de aguas subterráneas. La recarga de los acuíferos es de unos 1,850 Mm<sup>3</sup> por año, cuando las extracciones ya superan esa cantidad. Sus principales usos son el agrícola y público urbano.

Figura 3.6 Región I "Península de Baja California".



La problemática de la región reside por una parte en su cuadro natural de clima casi desértico con la consiguiente escasez de agua y su reciente explosión socioeconómica y demográfica que concentra las demandas público-urbanas en la zona Norte, la figura 3.7 muestra la distribución del agua en la Región I.

Figura 3.7 Porcentaje de distribución de agua en la Región I.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Las demandas de agua por parte de los sectores usuarios, principalmente el uso agrícola y público urbano están llegando al límite de los recursos, incluso se está rebasando la disponibilidad en ciertas zonas, existe el problema de contaminación por intrusión salina en los acuíferos costeros provocada por la sobreexplotación.

De acuerdo con las proyecciones, la población de la región alcanzará en el 2025, los 4.4 millones de habitantes, de los cuales alrededor de 90% se concentrarán en las ciudades de la franja fronteriza, con una fuerte presión adicional sobre los recursos hidráulicos para dotarlos de los servicios.

De mantener los patrones de consumo actuales, se prevé que se incrementaría el grado de sobreexplotación y degradación de la calidad del agua de los principales acuíferos, lo que propiciaría una disminución de la disponibilidad, y ocasionaría una fuerte competencia por el uso del recurso entre los distintos usos.

#### b) REGIÓN II NOROESTE

La Región II Noroeste tiene una superficie de 216,000 km<sup>2</sup>, (10.8 % del territorio nacional). Cerca de 90% de dicha superficie corresponde al estado de Sonora con 72 municipios y el resto al de Chihuahua con siete.

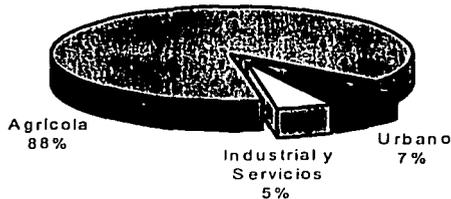
Figura 3.8 Región II "Noroeste".



La región tiene un escurrimiento virgen de  $5,400 \text{ Mm}^3$  por año, y una clara zonificación: en las subregiones Sonoyta y Concepción, mientras que en las subregiones Sonora, Yaqui y Mayo. Los climas predominantes son de carácter seco y semiseco, presente en la mayor parte del territorio sonorense, y los subhúmedos y templado, que se manifiestan a lo largo del límite oriental, en la porción alta de la sierra.

La recarga media en los 13 acuíferos asciende a  $1,150 \text{ Mm}^3$  por año, y las extracciones alcanzan  $1,720 \text{ Mm}^3$  por año. El agua que se extrae de las fuentes subterráneas en la región se distribuye según se muestra en la figura 3.9.

Figura. 3.9 Distribución del agua en la Región II.



Este problema ha provocado un descenso continuo de los niveles de bombeo y consecuentemente el aumento de los costos de operación, el avance de la interfase salina, la salinización de la tierra, y finalmente el abandono de las tierras que alguna vez fueron productivas para la agricultura.

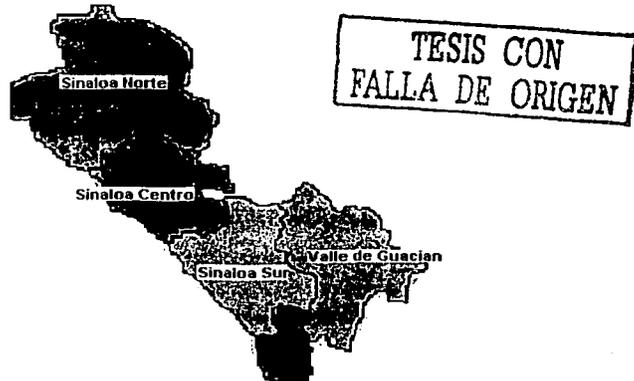
Un descenso significativo de los niveles de agua, agravado por la presencia de la intrusión de agua de mar a lo largo de su porción costera, ha propiciado el que una superficie de 9,700 Ha de uso agrícola hayan quedado inhabilitadas; en la porción más difícil los abatimientos alcanzan ya los 60 metros bajo el nivel del mar. Existen en la región 47 sistemas acuíferos: 19 se encuentran en equilibrio, 15 subexplotados y 13 en condiciones de sobreexplotación. La región presenta características de zonas áridas y semiáridas.

### c) REGIÓN III PACÍFICO NORTE.

La región III Pacífico Norte se ubica en el Noroeste de México, presenta a lo largo de su territorio notables diferencias en su desarrollo hidráulico y, por consecuencia, en la problemática de éste sector, dadas sus condiciones tan áridas es necesario un mayor consumo de agua, generándose problemas de intrusión salina.

La superficie de la región es de alrededor de 150,000 km<sup>2</sup> (aproximadamente 8% de la superficie nacional), se muestra en la figura 3.10, incluye la totalidad del estado de Sinaloa y porciones de los estados de Durango, Chihuahua, Nayarit y Zacatecas; se agrupan en cinco subregiones: Norte, Centro Norte, Centro Sur, Tuxpan y Guadiana.

Figura 3.10 Región III "Pacífico Norte".



Tiene un escurrimiento virgen de 23,950 Mm<sup>3</sup> por año, Del total de agua extraída, del orden de 10,000 Mm<sup>3</sup> por año, en la figura 3.11 se muestra la distribución de aguas:

Figura. 3.11 Distribución del agua en la Región III.



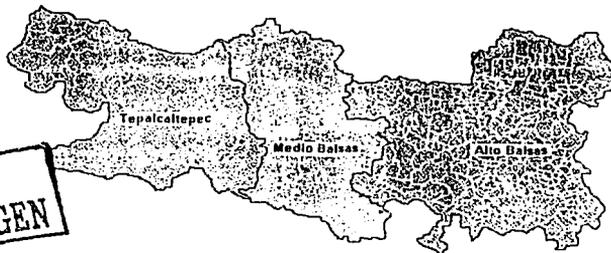
En relación con las aguas subterráneas existen 23 acuíferos en la región con una recarga media de poco más o menos 1,500 m<sup>3</sup> por año. La degradación de la calidad del agua subterránea perjudica principalmente las subregiones

Guadiana y Centro-Sur; para el primer caso se presenta contaminación natural por presencia de flúor y arsénico, mayor a lo deseable en los acuíferos que abastecen a la ciudad de Durango; la subregión Centro-Sur, el acuífero Presidio, fuente principal de abastecimiento de la Ciudad de Mazatlán, presenta contenidos de hierro y manganeso por encima de la norma.

#### d) REGIÓN IV BALSAS.

La Región IV Balsas está conformada por dos grandes provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Abarca 119,000 km<sup>2</sup> (6% del territorio nacional), e incluye completamente al estado de Morelos y parcialmente a los estados de Tlaxcala, Puebla, México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco con un total de 421 municipios. Para efectos de planeación, se delimitó en tres subregiones: Alto Balsas, con 52,000 km<sup>2</sup>, Medio Balsas, 31,000 km<sup>2</sup>, y Tepalcatepec 36,000 km<sup>2</sup>.

*Figura 3.12 Región IV "Balsas".*

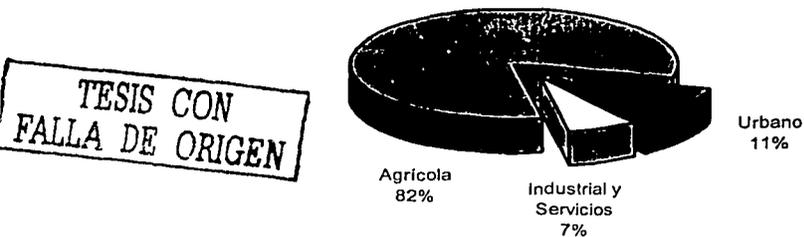


A nivel regional, las actividades económicas predominantes son la agricultura, con el cultivo de maíz, caña de azúcar, hortalizas, frijol y arroz; la acuacultura, con el cultivo de tilapia y bagre; la recreación y turismo con múltiples centros vacacionales y balnearios en Morelos, sitios prehispánicos y coloniales en Puebla y Guerrero, y de competencia acuática en la desembocadura del río

Balsas. Existe un notable desarrollo industrial concentrado en las zonas adyacentes a los principales núcleos urbanos (Puebla, Cuernavaca y Tlaxcala).

Los 7,700 Mm<sup>3</sup> por año son destinados para usos consuntivos que se aprovechan en la región. En la figura 3.13 se muestra la distribución de agua según los principales usos a que se destina en la región.

Fig. 3.13 Distribución del agua en la Región IV.



Alta contaminación de las aguas subterráneas en las cuencas Alto Atoyac, Nexapa y Amacuzac. Existe contaminación puntual por los efluentes urbanos e industriales no tratados o con tratamiento deficiente en las principales zonas urbanas como Tlaxcala, Apizaco, Zacatelco y Santa Ana Chiautempan en el estado de Tlaxcala; la Ciudad de Puebla, San Martín Texmelucan, Cuautlancingo, San Pedro Cholula, Huejotzingo, Tepeaca, Atlixco e Izúcar de Matamoros en Puebla así como el corredor Zacatepec-Cuautlla-Yautepec y la Ciudad de Cuernavaca en Morelos, pertenecientes a la subregión Alto Balsas. Así, se contaminan rápidamente las corrientes superficiales y existe un riesgo potencial para los acuíferos que sirven de fuente de abastecimiento de agua potable de las ciudades.

Sobreexplotación de los acuíferos Tecamachalco, Tepalcingo-Axochiapan y Alto Atoyac. Durante las últimas décadas se ha registrado un descenso continuo de los niveles de bombeo con el consecuente encarecimiento de los costos de

explotación, situación que representa una amenaza para la preservación de dichas fuentes de abastecimiento y en consecuencia, para el desarrollo socioeconómico que depende de ellas principalmente en la subregión Alto Balsas.

#### e) REGIÓN V PACÍFICO SUR.

La Región Pacífico Sur tiene una superficie de 80,000 km<sup>2</sup>, se integra con 357 municipios de los estados de Oaxaca y Guerrero que abarcan 65 y 35% de la superficie regional. Comprende seis subregiones de planeación: Costa Grande, Costa Chica, Río Verde, Costa de Oaxaca, Tehuantepec y Complejo Lagunar, las cuales agrupan a 23 cuencas. Sus escurrimientos se producen desde el parteaguas definido por las Sierras Madre Occidental y Norte de Oaxaca, hasta las costas de dichos estados en el Océano Pacífico.

*Figura 3.14 Región V "Pacífico Sur".*



De los más de 1,500 Mm<sup>3</sup> por año que son destinados para usos consuntivos y que se aprovechan en la región, son distribuidos en diversos usos los cuales se muestran en la figura 3.15.

Figura. 3.15 Distribución del agua en la Región V.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

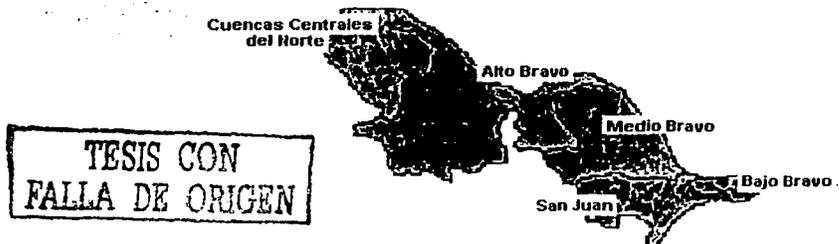
Ocupa el tercer lugar con escurrimientos superficiales con  $35,000 \text{ Mm}^3$  por año, solo superado por la región IX y X. Existen en la región 33 acuíferos los cuales reciben una recarga media anual de alrededor de  $1,820 \text{ Mm}^3$  por año. Los sistemas acuíferos de los Valles Centrales se encuentran en condiciones de equilibrio, esto es vital ya que de ellos depende el abasto de agua para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados en los cuales se asienta una población que asciende a cerca de 600,000 habitantes a la fecha.

#### f) REGIÓN VI RÍO BRAVO.

Con una superficie aproximada de  $377,000 \text{ km}^2$  (19% del territorio nacional). Comprende seis subregiones de planeación: Cuencas Cerradas del Norte, Conchos, Alto Bravo, Medio Bravo, San Juan y Bajo Bravo. Se encuentra al Norte del Trópico de Cáncer y se sitúa en su totalidad en la franja de las grandes zonas áridas y semiáridas. La precipitación media anual es de 402 mm.

La principal corriente es el Río Bravo, el cual sirve de límite entre México y Estados Unidos. El escurrimiento medio anual en la cuenca del Río Bravo en el territorio mexicano asciende a  $7,650 \text{ Mm}^3$ .

Figura 3.16 Región VI "Río Bravo".



En la Región existen 71 acuíferos en explotación, cuya recarga media anual se estima en 4,800 Mm<sup>3</sup>, y su extracción anual se eleva a 5,000 Mm<sup>3</sup>, de éstos 20 están sobreexplotados, 12 en equilibrio y el resto subexplotados.

Con respecto a la extracción total anual para uso consuntivo, en la figura 3.17, se muestra la distribución del agua en la región.

Figura.3.17 Distribución del agua Región VI.



La sobreexplotación de los acuíferos es de condición inaceptable de extracción de una reserva no renovable. Los 700 Mm<sup>3</sup> por año de sobreexplotación se concentran en gran parte de los 7 acuíferos siguientes: Jiménez-Camarga, Villa Ahuamada-Flores Magón, Valle de Juárez, Chihuahua-

Sacramento y Cuahutémoc en el Estado de Chihuahua y Saltillo Ramos Arizpe y Monclova en Coahuila.

g) REGIÓN VII CUENCAS CENTRALES DEL NORTE.

La Región Cuencas Centrales del Norte, se ubica en el antiplano de la República Mexicana. Se caracteriza por una gran diversidad fisiográfica y una extensión aproximada de 206,000 km<sup>2</sup> (el 10% del territorio nacional). Se conforma por 83 municipios pertenecientes a los Estados de Durango, Zacatecas, Coahuila, San Luis Potosí, Nuevo León y Tamaulipas. Para fines de planeación fue dividida en 5 subregiones: Mapimí, Nazas, Aguanaval, Comarca Lagunera-Parras y El Salado.

Figura 3.18 Región VII "Cuencas Centrales del Norte".



Una vasta infraestructura hidráulica hizo posible que la agricultura, la minería y en menor grado la industria, constituyeran los ejes alrededor de los cuales girará el desarrollo económico. El Producto Interno Bruto de la región representa el 3.3% del PIB Nacional.

El volumen total extraído al año es de 4,410 Mm<sup>3</sup> de los cuales un volumen anual de 2,530 Mm<sup>3</sup> (57%) proviene de las aguas del subsuelo y 1,880 Mm<sup>3</sup> (43%) de agua superficial. En la figura 3.19, se muestra la distribución del volumen total del agua en la región.

Figura. 3.19 Distribución del agua en la Región VII.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Se tienen 64 acuíferos cuya extracción es de 2,530 Mm<sup>3</sup> por año. La sobreexplotación se concentra en pocos acuíferos. De los 720 Mm<sup>3</sup> por año de sobreexplotación, 500 Mm<sup>3</sup> se extraen anualmente de los acuíferos denominados El Principal (Comarca Lagunera), Cevallos y San Luis Potosí.

#### h) REGIÓN VIII LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO.

La Región Lerma-Santiago-Pacífico se ubica en el Centro-Poniente de la República Mexicana. Está conformada por los Estados de Colima, Aguascalientes, Nayarit, Querétaro, México, Jalisco, Guanajuato, Michoacán, y Zacatecas que en conjunto incluyen 326 municipios con jurisdicción política en la región. La región comprende las cuencas del Río Lerma y Santiago, así como una porción importante de las costas del Océano Pacífico correspondientes a los Estados de Jalisco y Michoacán. La superficie aproximada de la región es de 192,000 Km<sup>2</sup> (10% del territorio nacional).

Figura 3.20 Región VIII "Lerma Santiago-Pacífico".



El clima predominante en la cuenca del Lerma es templado-húmedo, seco estepario en la de Santiago y semicálido-subhúmedo en las costas de Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán. La lluvia promedio anual de la región es de 809 mm y ocurre principalmente en verano. Para fines de planeación hidráulica, la región se divide en 6 subregiones: Alto, Medio y Bajo Lerma; Alto y Bajo Santiago, Costas de Jalisco y Michoacán.

La región aporta el 16% del Producto Interno Bruto nacional. La Población Económicamente Activa (PEA) representa el 14% del total nacional; 5 de cada 10 trabajadores laboran en el sector terciario, 3 de cada 10 en el secundario y 2 de cada 10 en el primario.

Se extraen 15,200 Mm<sup>3</sup> por año para usos consuntivos de los cuales el 55% proviene de fuentes superficiales y 45% de aguas subterráneas. En la figura 3.21 se muestra los porcentajes destinados a los usos consuntivos.

Figura. 3.21 Distribución del agua en la Región VIII.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



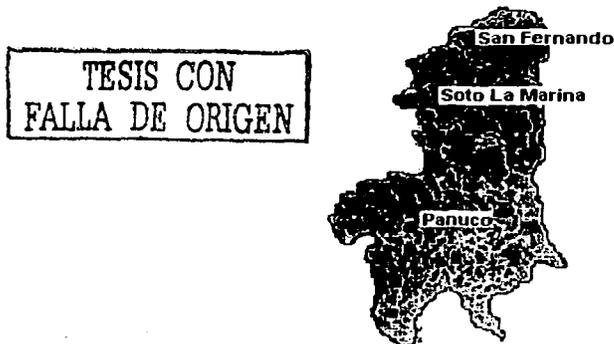
A efecto de complementar los volúmenes de aguas superficiales y con el objeto de satisfacer las demandas de agua de los diferentes usos en cada subregión, se ha venido dando la sobreexplotación intensiva del agua subterránea. La explotación descontrolada ha provocado una dramática sobreexplotación que esta poniendo en peligro la sustentabilidad del recurso.

Esta situación se acentúa en las subregiones del Alto Lerma, en los acuíferos del Valle de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca; en la subregión Medio Lerma, en los acuíferos de Querétaro, Celaya, León, Turbio y Pénjamo-Abasolo, así como en la totalidad de los acuíferos de la subregión Alto Santiago y los del Estado de Aguascalientes.

#### i) REGIÓN IX GOLFO NORTE.

La Región se localiza en la vertiente del Golfo de México, se caracteriza por un relieve que varía desde las zonas planas y de lomerío suave en la planicie costera, hasta las cerranías de la gran altitud y pendiente abrupta de la Sierra Madre Oriental. Abarca una superficie aproximada de 127,000 Km<sup>2</sup> (6% del territorio nacional) y está conformada por 154 municipios de ocho entidades federativas: 40 del Estado de Hidalgo, 36 de San Luis Potosí, 30 de Tamaulipas, 23 de Veracruz, 14 de Querétaro, 5 de Guanajuato, 5 del Estado de México y 1 de Nuevo León.

Figura 3.22 Región IX "Golfo Norte".



Se tienen identificados 36 sistemas de acuíferos en la región, los cuales tienen una recarga media anual en conjunto de  $1,500 \text{ Mm}^3$ ; de ellos se extraen  $1,320 \text{ Mm}^3$  para usos consuntivos, localmente existen acuíferos sobreexplotados.

De los  $5,470 \text{ Mm}^3$  de agua extraídos, en la figura. 3.23, se muestra la repartición del agua que se destina en la Región.

Figura. 3.23 Distribución del agua en la Región IX.



Los acuíferos márgenes del Río Purificación en Tamaulipas, San Juan del Río y Tequisquiapan en Querétaro, y Valle de Tulancingo en Hidalgo, presentan

diferentes grados de sobreexplotación. La extracción anual en conjunto supera en 200 Mm<sup>3</sup> a la recarga

#### j) REGIÓN X GOLFO CENTRO.

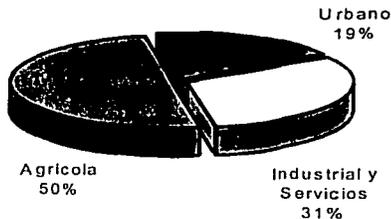
La región Golfo Centro constituye una gran parte de la vertiente mexicana del Golfo de México, posee un escurrimiento virgen medio de 100,000 Mm<sup>3</sup> al año, cubre una extensión aproximada de 105,000 km<sup>2</sup> (5% del territorio nacional), se integra por 443 municipios, 187 de Veracruz, 161 de Oaxaca, 90 de Puebla y 5 de Hidalgo.

Figura 3.24 Región X "Golfo Centro".



En la región se extraen para usos consuntivos 4,300 Mm<sup>3</sup>, mostrados en la figura 3.25.

Figura. 3.25. Distribución del agua en la Región X.



## k) REGIÓN XI FRONTERA SUR.

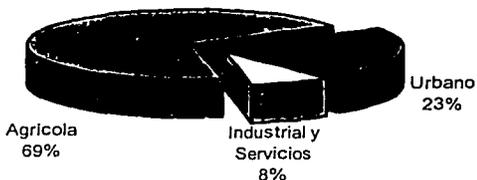
La Región está conformada por la totalidad de los Estados de Chiapas y Tabasco, así como por áreas pequeñas de los Estados de Campeche y Oaxaca, cuenta con una superficie del orden de 102,000 km<sup>2</sup> (5% del territorio nacional), un clima predominantemente cálido-húmedo, con una temperatura media anual de 24° C y precipitaciones anuales del orden de 2,300 mm, llegando a rebasar los 4,000 mm en la sierra de Chiapas, siendo las más altas del país.

Figura 3.26 Región XI "Frontera Sur".



Tiene un escurrimiento de 150,000 Mm<sup>3</sup> siendo la región que presenta mayores escurrimientos en el país (30% del total). Incluye 48,800 Mm<sup>3</sup> del agua al año proveniente de la República de Guatemala, del escurrimiento total regional se aprovecha del orden de 1,300 Mm<sup>3</sup> por año y en la figura 3.27 se muestra su distribución.

Figura. 3.27 Distribución de agua en la Región XI.



Existe bajo aprovechamiento y manejo eficiente del agua superficial, se cuenta con una vasta superficie de más de 1.7 millones de hectáreas; sin embargo, un 98% están destinadas a cultivos de temporal, existen 4 distritos de riego con eficiencias inferiores al 40% en promedio, otro de los problemas que presenta es la vulnerabilidad ante inundaciones que se presentan en casi toda la región, destacando la costa de Chiapas, en donde se tiene una frecuencia de una inundación cada tres años.

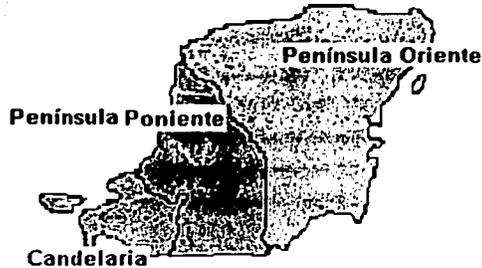
La situación específica de la zona con respecto al resto de país se caracteriza por ser una de las zonas con mayores rezagos, sus niveles de cobertura de los servicios básicos son muy bajos y existe una degradación acelerada del medio ambiente y vulnerabilidad ante fenómenos meteorológicos.

#### 1) REGIÓN XII PENÍNSULA DE YUCATÁN.

La Región se ubica dentro de la franja donde prevalece el clima cálido con una temperatura media de 25°C, la precipitación tiene un valor medio de 1,196 mm anuales, 50% superior a la media nacional.

En la región no existen montañas ni grandes elevaciones de terreno, en donde su punto mas elevado corresponde a la Sierra Ticul, ubicada a 250 msnm, la reducida pendiente del terreno, la elevada precipitación y la alta permeabilidad de los suelos de la península favorecen la renovación del agua subterránea, la región abarca una superficie de 140,000 km<sup>2</sup> (7% del territorio nacional).

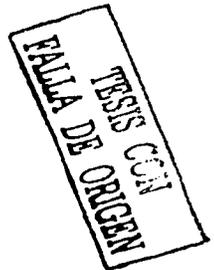
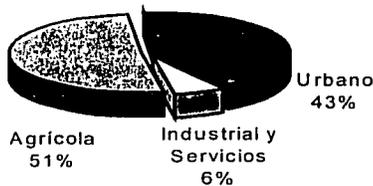
Figura 3.28 Región XII "Península de Yucatán".



En los 830 km de costas de la región existen un gran número de lagunas costeras y humedales en los cuales habitan una gran diversidad de especies, prácticamente toda la península está ocupada por formaciones calizas y dolomitas altamente permeables, cuya recarga es del orden de 31,000 Mm<sup>3</sup> por año, de los cuales se aprovechan únicamente 1,300 Mm<sup>3</sup> por año.

En la región se emplean casi 1,300 Mm<sup>3</sup> de agua al año, en diversos usos consuntivos, que se muestran en la figura 3.29, cabe mencionar que el 97% del agua empleada es proveniente de los acuíferos.

Figura 3.29 Distribución de agua en la Región XII.



El abastecimiento actual y futuro depende esencialmente de los recursos de agua subterránea los cuales son altamente vulnerables a todo tipo de

contaminación, principalmente antropogénica, y exigen una extracción cuidadosa para evitar su salinización.

Existen problemas en la región como son la contaminación del acuífero por descargas de aguas residuales, sin tratamiento, ya que la falta de drenaje sanitario apropiado ha propiciado la infiltración de las descargas, además de la degradación de la calidad del agua, por mal manejo de la extracción ya que en las zonas costeras se concentran la mayor cantidad de demanda, esto lleva consigo la extracción de grandes volúmenes de agua principalmente del manto acuífero.

Una sobreexplotación desmedida de los acuíferos existentes en la zona y una falta de control en la explotación puede llevar consigo con problemas relacionados con la intrusión salina, siendo éste un problema principalmente en las zonas costeras de Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

#### m) REGIÓN XIII VALLE DE MÉXICO.

En la Región del Valle de México existe una problemática muy singular con el manejo de los recursos hidráulicos, tanto en el contexto nacional como internacional, ya que la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es una de las mayores concentraciones urbanas a nivel mundial, dada su ubicación geográfica 2,240 msnm y con fuentes superficiales agotadas prácticamente en su totalidad, representa un claro ejemplo de la vulnerabilidad del equilibrio ecológico ante el desordenado crecimiento y excesiva demanda.

Ésta Región se ubica en la cuenca alta del Río Panuco y para fines de planeación esta formada por dos subregiones, Valle de México y Tula, la superficie aproximada de la región es de 16,000 km<sup>2</sup> e incluye el Distrito Federal y los 56 municipios del Estado de México, 39 de Hidalgo y 4 de Tlaxcala, (menos del 1% del territorio nacional).

Figura 3.30 Región XIII "Valle de México".



El escurrimiento medio anual de la región Valle de México es 1,067 Mm<sup>3</sup> y la región de Tula es de 1,227 Mm<sup>3</sup> (incluyendo ambas cantidades importadas de otras cuencas)

El primer uso del agua es el uso público que utiliza el 64% de la disponibilidad, y representa el 41% de la demanda total, con respecto al aprovechamiento de agua para fines agrícolas, en la Región existen casi 140 mil hectáreas bajo riego, correspondientes a 5 distritos de riego, el 63% de sus requerimientos se satisface de agua residual, siendo el 34% de la superficie de riego de temporal. Referente al uso industrial, se estima que el 80% de los usuarios de la Región se autoabastecen, y el 90% de los usuarios se concentran en la ZMVM

La demanda total de los usos consuntivos regionales es de 5,200 Mm<sup>3</sup> cubriéndose de la siguiente manera, agua superficial de la región 800 Mm<sup>3</sup> por año (36% de la demanda) de los cuales 900 Mm<sup>3</sup> corresponden a sobreexplotación, importación de Cutzamala y Lerma 600 Mm<sup>3</sup> por año (11% de la

demanda), reúso de agua residual no tratada 1,900 Mm<sup>3</sup> por año (38% de la demanda).

Existen problemas en la región, como son la contaminación de las fuentes de agua superficial y subterránea, la cuenca del río Tula es la más afectada por ser receptora de las aguas residuales provenientes del ZMVM, de las cuales aproximadamente 58% es agua residual cruda, y el restante es de origen pluvial.

La condición de sobreexplotación especialmente en la subregión del Valle de México se presenta en forma global con una extracción que excede en un 130% la recarga, como consecuencia de la extracción excesiva se producen fuertes asentamientos de los terrenos en algunas zonas de la ZMVM, estos hundimientos producen agrietamientos del terreno y daños a la infraestructura urbana difícil de cuantificar.

### *3.2.2 Regionalización en el Valle de México.*

a) **Sistema Lerma.**- Se ubica en el Estado de México, en la parte alta del Río Lerma, su funcionamiento es proveer agua al Valle de México, comenzó en 1951 con un caudal de 4.5 m<sup>3</sup>/s provenientes de manantiales y de 47 pozos, en 1969 se concluyó la segunda etapa que aumentó el caudal a 6 m<sup>3</sup>/s a través de casi 200 pozos actualmente cuenta con una extensión de 2.2 km<sup>2</sup> y con 234 pozos destinados al abasto de la Ciudad de México, en la región Sur se presentan niveles estáticos y dinámicos de 25 y 30 m. Alcanzando profundidades máximas de 40 a 93 m.

b) **Sistema Sur.**- Se localiza al Sureste del Distrito Federal y fue el primer sistema de abastecimiento de agua potable para la Ciudad en el siglo, inició operaciones en 1913, con 2.4 m<sup>3</sup>/s provenientes de manantiales, cuenta con profundidades promedio de 200 m y diámetros de los pozos de 45 cms, los niveles estáticos y dinámicos varían entre 15 a 100 m y 20 a 120 m respectivamente algunos pozos

descargan directamente a la red secundaria y el resto lo hace a caudales de las plantas de bombeo.

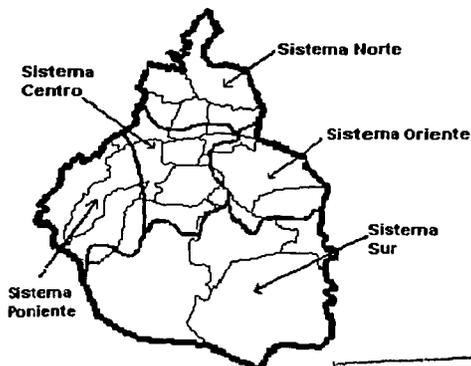
c) **Sistema Norte.**- Está formado por 62 pozos profundos, de los cuales 38 se localizan en el Estado de México cubriendo una extensión de 80 km<sup>2</sup>, los 24 restantes se encuentran ubicados en la Delegación Azcapotzalco, entregando sus caudales directamente a la red secundaria, la explotación de parte del sistema Chiconautla ha venido siendo estable desde los inicios, contribuyendo con un caudal de 2.5 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, actualmente los niveles estático y dinámico se han abatido por la interferencia del sistema de extracción.

d) **Sistema Poniente.**- Se ubica en la parte Poniente del Distrito Federal, la cual no cuenta con recursos hidráulicos propios importantes, no obstante, es en donde se regulan los caudales provenientes de Lerma y Cutzamala, en ésta zona se localizan 18 pozos y algunos manantiales en las zonas altas, cuenta con profundidades de 120 a 325 m aporta aproximadamente 100 l/s, mientras que los manantiales aportan sus caudales a las comunidades en las partes altas, dentro de los más importantes se encuentra Santa Fe, San Bartolo Ameyalco, Ajolotes.

e) **Sistema Oriente.**- Cuenta con 41 pozos, que aportan 1,700 l/s, pero este caudal no cubre la demanda solicitada, los niveles estáticos se localizan entre 20 y 35 m por lo que los pozos no son de gran desarrollo dadas las condiciones geológicas, la calidad del agua no es óptima, para ello es necesario contar con tratamientos de potabilidad.

f) **Sistema Centro.**- Esta formado por 96 pozos, aportando un caudal de 3.4 m<sup>3</sup>/s, que es empleado para cubrir una gran parte de la demanda de las delegaciones Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Iztacalco, Venustiano Carranza, Coyoacán, éstos pozos presentan niveles estáticos muy variados que van de 20 a 120 m, de profundidad.

Figura 3.31 Regionalización del Valle de México.



### 3.3. USOS DEL AGUA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En los últimos años se emplearon en el país 79.3 km<sup>3</sup> de agua para los diversos usos consultivos, de los cuales 65% fueron de origen superficial, y 35% de origen subterráneo, este volumen representa el 18% de la disponibilidad natural media nacional (escurrimiento superficial virgen y recarga de los acuíferos), sin embargo, en las zonas Norte y Noreste del país alcanza un valor del 49%, lo que convierte al agua en un sujeto a alta presión y limitante del desarrollo.

El uso del agua predominante en el país es el agrícola, ya que representa el 76% de la extracción, seguido del uso público con el 18%, otra forma de suministro de aguas es la relativa a la utilización de las aguas residuales en actividades que no requieren de calidad potable.

### **3.3.1 Uso de Consumo.**

En México existen 201,138 comunidades de las cuales el 98.6% son rurales (menos de 2,500 hab.) y solo el 1.4% son urbanas (más de 2,500 hab.), el artículo 115 de la Constitución Política establece que el suministro de los servicios del agua potable corresponde a los municipios, cabe mencionar que cada vez se hace más énfasis en el tratamiento y disposición de las aguas residuales.

En coordinación con la Secretaría de Salud y los gobiernos municipales se realizan operativos preventivos y emergentes de saneamiento básico y desinfección del agua, en suma para el año 1999, el número total de habitantes con servicio de agua potable era de 84.5 millones de habitantes, y cerca de 13 millones carecen de agua potable, siendo en las áreas rurales las que cuentan con 65% de cobertura de agua potable.

### **3.3.2. Uso Agrícola**

La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de 18 a 22 millones de hectáreas por año. La superficie del país ha aumentado considerablemente de 750 mil hectáreas en 1926 a 6.3 millones de hectáreas actualmente, lo que coloca al país en el séptimo lugar mundial en superficie en infraestructura de riego, el 54% de la superficie bajo riego y el 46% restante poco mas de 39 mil unidades de riego.

La agricultura de riego utiliza 76% del agua extraída en el país. Los métodos aplicados son tradicionales en más del 80% de la superficie bajo riego, y la eficiencia promedio del uso del agua se estima en el 46%. Para inducir y garantizar el uso sustentable y económicamente eficiente del agua, el Gobierno Federal consideró necesario corresponsabilizar a los usuarios, transfiriéndoles la infraestructura de los distritos de riego, hasta junio del 2000 se han transferido una superficie de 3.2 millones de hectáreas de riego, a 482 mil usuarios organizados

en 431 asociaciones civiles y 10 sociedades de sociedades de responsabilidad limitada. Es importante señalar que en condiciones de escasez, los usuarios tienden a ser más eficientes al establecer los cultivos de baja demanda evapotranspirativa, así como los operativos de emergencia para el cuidado de agua.

### *3.3.3. Uso Industrial.*

La extracción de agua para uso industrial a pesar de su volumen relativamente pequeño, se ha convertido en un factor importante debido a la gran competencia con otros usuarios por el abastecimiento del agua. También reviste importancia el uso industrial por la gran cantidad y diversidad de contaminantes que descargan algunas industrias.

El uso de la industria es del orden de  $6 \text{ km}^3$  de agua al año ( $190 \text{ m}^3/\text{s}$ ), de éste volumen, se estima que el 70% corresponde a la industria que se autoabastece a través de pozos o fuentes superficiales, y el 30% restante a la que obtiene el agua de las redes municipales. El 86% de las extracciones la realizan 7 ramas, que incluyen a la industria azucarera, química, petróleo y petroquímica, celulosa y papel, hierro y acero, textil y alimentos y bebidas. La industria en su conjunto descarga  $5.36 \text{ km}^3$  ( $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de aguas residuales al año, que se traducen en más de 6 millones de toneladas de DBO, cantidad que sobrepasa en un 140% la carga contaminante generada por toda la población del país.

Existen 1,371 plantas de tratamiento industriales de las cuales operan 1,351 son tratadas el 15% ( $22 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de aguas generadas, la industria azucarera es la que más descarga con  $46 \text{ m}^3/\text{s}$  equivalente al 27% del volumen descargado por el sector industrial. Se estima que  $20 \text{ m}^3$  por tonelada son usados en la industria azucarera, contribuyendo a su vez con una gran cantidad de contaminantes, en la industria petrolera el mayor consumo de agua es usado en el enfriamiento, en donde cada uno de los procesos son fuentes de contaminación, mientras que en la industria de la celulosa y papel que está compuesta por 64 medianas y grandes

empresas, en éstas industrias no se presenta gran contaminación, ya que se enfocan en su mayoría al control de las cantidades de materia orgánica, y sólidos suspendidos, entre las industrias con grandes consumos de agua se encuentra la industria del hierro y acero para fines de enfriamiento por contacto directo o indirecto.

### *3.3.4. Uso en la Generación de Energía Eléctrica.*

En México se recurre a diversas fuentes de energía para generar electricidad, combustibles fósiles, hidráulica, geotermia, eólica y nuclear, destacando tanto el nivel de producción como la capacidad instalada, la utilización de las centrales que aprovechan gas, petróleo y carbón y en segundo lugar la hidroelectricidad.

La utilización del agua en la generación de electricidad se considera de dos tipos: el uso de agua en el enfriamiento de termoeléctricas y el aprovechamiento de la energía que produce el agua mediante la construcción de presas de almacenamiento o derivación para centrales hidroeléctricas.

El primer uso es consuntivo, el agua se "pierde" por evaporación y la retoma el medio natural normalmente, contiene compuestos orgánicos en solución, en éstas plantas la mayor cantidad de agua es consumida al evaporarse durante el proceso de enfriamiento.

Por otra parte en la generación hidroeléctrica se requieren grandes volúmenes de agua, pero prácticamente sin consumo alguno, salvo la evaporación de los embalses, los cuales invariablemente tiene la función de control de avenidas y frecuentemente otros como la irrigación o el suministro de agua a poblaciones, en total se estima que la cantidad de agua que se emplea para el enfriamiento de centrales térmicas asciende a 0.2 km<sup>3</sup> por año, cifra relativamente pequeña si se considera que solamente presenta el 3% del uso industrial total, actualmente el 72% de las termoeléctricas utilizan agua del mar, éstas

representan el 32% de la capacidad instalada y el 29% de la generación por termoeléctricas.

### *3.3.5. Acuicultura y Pesca.*

En México existe una superficie de cuerpos de agua de 3.8 millones de hectáreas, de las cuales 2.9 corresponden a agua salada en litorales, y 0.9 a agua dulce. El país cuenta con 11,600 km de litorales existen 1.5 millones de hectáreas de lagunas costeras y 2.9 millones de hectáreas de cuerpos de agua interiores.

En agua salada-salobre el potencial para acuicultura se estima en poco más de 2 millones de hectáreas, de éstas hay 450 mil propicias para el cultivo del camarón, y 1.6 millones para otras especies. Actualmente se aprovechan 16 mil hectáreas en camarón y 30 mil en otras especies.

En agua dulce el potencial es de 900 mil hectáreas y se utilizan 754 mil con alcances muy limitados, estimándose una demanda de ésta actividad de 1,100 millones de m<sup>3</sup> anuales. El potencial acuícola se ha reducido en diferentes cuerpos de agua dulce y salada como consecuencia de lo contaminación, que produce la industria agrícola y las actividades urbanas, como ejemplo de ello tenemos los Lagos de Pátzcuaro, Chapala, Cuitzeo, en agua salada-salobre se encuentra la Laguna de Alvarado, Términos, Chantuto, Panzola y del Mar Muerto, y los estuarios de los Ríos Pánuco, y Coatzacoalcos.

### *3.3.6. Turismo y Navegación.*

Un uso que representa un potencial importante en nuestro país es el relativo a las actividades de contacto directo con las aguas, como son el baño recreativo, natación, buceo, descanso, y contemplación del paisaje. En éste uso no se incluye el suministro de agua a los hoteles ni a actividades comerciales, ya que éste se considera un uso consuntivo.

### **3.4 SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.**

La sobreexplotación acuífera, es el estado hidrológico de un acuífero cuando su almacenamiento hidráulico se encuentra disminuido por una extracción en continuo exceso de la recarga y que produce efectos posiblemente no reversibles, por lo tanto, ésta sobreexplotación se puede producir en un rango, bastante amplio, varios grados de afectación a un acuífero, los que podrán ser diferentes para materiales granulares o para rocas fracturadas, así como para diferentes condiciones climáticas dependiendo de la región en que se encuentre.

El término de sobreexplotación siempre está relacionado con los abatimientos de los niveles piezométricos, y esto es una causa suficiente para recomendar la suspensión de nuevas autorizaciones de extracción de agua subterránea.

Entre los efectos que puede producir se encuentra una gran variedad, que afecta tanto a la calidad como cantidad de agua subterránea, la estructura de la matriz porosa, la economía de la región, su desarrollo tecnológico, la infraestructura construida sobre el, así como a la salud y al medio ambiente.

Es común que en un acuífero sobreexplotado se muestre un aumento de la concentración de sales en el agua, y se requieran niveles de bombeo cada vez más profundos, que exista una disminución del almacenamiento subterráneo, la reducción de la permeabilidad del acuífero y de su zona no saturada sobre éste, así como de la porosidad efectiva, además del fracturamiento del terreno y hundimiento del mismo, por lo general éste tipo de problemas se presenta en regiones donde los recursos hidráulicos superficiales son más escasos que los subterráneos, y en mayor parte de las veces se propician los daños.

En la zona Centro del País, que abarca Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, las escasas fuentes de aguas superficiales se destinan básicamente a la agricultura y la demanda del agua subterránea

supera más del 70% de la recarga de los acuíferos, por lo tanto el decremento del nivel de los mismos resulta alarmante.

En Yucatán, las características del suelo han propiciado problemas de contaminación severa por infiltración a los mantos freáticos y de intrusión salina en las zonas costeras.

En Baja California Sur, no se cuenta con cuerpos de agua superficiales, y las lluvias son muy escasas, es por ello, el acuífero constituye la única fuente de abastecimiento, dada ésta situación, el crecimiento de las zonas turísticas han producido un problema muy severo de la intrusión salina debido al exceso de bombeo.

En la región Noreste del País, hay altas concentraciones de minerales en las aguas subterráneas debido a las existencia de zonas mineras, (Chihuahua, Nuevo León, Durango), este problema aunque no es originado por actividades humanas se acentúa por la sobreexplotación, que provoca mayor concentración de los elementos existentes.

En el mejor de los casos se decreta una disminución en la extracción de la cuenca donde se encuentra el área afectada; sin embargo, en algunos de los casos éste efecto es temporal por la concentración de los aprovechamientos y si en ésta etapa se realiza una evaluación hidrogeológica de los recursos del agua subterránea, se le puede restar oportunidad a una región cuando es subvaluada o bien se le perjudica cuando esta sobrevaluada.

En el cuadro 3.7 se muestran todos los acuíferos que presentan problemas de sobreexplotación clasificados de acuerdo a las regiones administrativas, así como aquellos que presentan problemas de intrusión salina.

Cuadro 3.7 Acuíferos Sobreexplotados y con Intrusión Salina.

Región Administrativa	Acuíferos Sobreexplotados y con Intrusión Salina*	
I Península de Baja California	San José del Cabo Ojos Negros Ensenada* Meneadero* Vicente Guerrero*	San Quintín* Santo Domingo* Mulaga* Camalu*
II Noroeste	Valle de San Luis Río Colorado Puerto Peñasco Los Chirríones Costa de Hermosillo Sahuaral Río Sanjón* Caborca*	La Victoria Río San Miguel Valle de Guaymas* Río Sonora San José de Guaymas* Coyotillo Valle El Mayo
III Pacífico Norte	Valle de Canatlán	
IV Balsas	Valle de Tecamachalco	Tepolcingo-Axochiapan
VI Frontera Norte	Buenaventura Cañón del Derrumbadero Paradín	Saltillo Ramos Arizpe Asunción Jiménez Camargo Aldama
VII Cuencas Centrales del Norte	Principal Región Lagunera Vicente Suárez Navidad Potosí Raíces Canteros El Barril Salinas de Hidalgo	Aguanaval La Blanca Guadalupe Puerto Madero Villa Hidalgo Benito Juárez Laredo
VIII Lerma-Santiago Pacífico	Valle de Aguascalientes Valle de Chicalota El Llano Valle de Calvillo Laguna Seca San Miguel de Allende Cuenca Alta del Río Laja	Valle del León Río Turbio Valle de Celaya Valle de La Guayita Valle de Acámbaro Salvatierra-Acámbaro Morelia-Querétaro Chapala Valle de Querétaro
IX Golfo Norte	Valle de San Juan Del Río Huichapan	Valle de Tequisquiapan Valle de Tulancingo
XIII Valle de México	Zona Metropolitana del Valle de México Chalco	Texcoco Cuatliltan-Pachuca
<i>Las regiones V, X, XI, XII, no presentan problemas de sobreexplotación de acuíferos</i>		
<i>* Acuíferos con problemas de sobreexplotación y de intrusión marina</i>		
<i>Fuente: Comisión Nacional del Agua datos para el año 2000</i>		

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.32 Acuíferos con Problemas en la República Mexicana



Fuente: Subdirección General Técnica CNA

### **3.4.1 Grados de Sobreexplotación.**

#### ***Primer Grado "Benéfico".***

Durante la etapa del desarrollo intermedio de un acuífero (funcionamiento del acuífero) se puede presentar un grado benéfico de sobreexplotación de los acuíferos, siendo éste cuando se extrae un volumen mayor que la recarga inicial a que estuvo sujeto, pues además de que ésta se puede aumentar hasta lograr la capacidad máxima de infiltración y flujo horizontal en sus bordes, se aprovecha la evaporación que existía en los niveles someros y se modifica el flujo base del río mediante una disminución, así como también las salidas subterráneas del acuífero fuera de la región.

#### ***Segundo Grado "Necesario".***

En las etapas del desarrollo intermedio y avanzado de un acuífero se estará en un segundo grado o de sobreexplotación necesaria, cuando empiezan a descender de manera constante los niveles piezométricos, mientras el acuífero funciona hidráulicamente dentro de un régimen elástico y no se modifican de manera sustancial las características físicas del mismo, en éste caso la recarga se encuentra en un máximo valor y existe una renovación del almacenamiento del agua subterránea manteniéndose una calidad óptima del recurso, la descarga natural desaparece, si la extracción esta distribuida en el tiempo y en el espacio, y el aprovechamiento del agua subterránea también es óptimo.

En este caso la disminución del almacenamiento no afecta mucho el costo de la extracción de agua subterránea, y por tanto, el desarrollo de una región se puede fincar en el aprovechamiento de un curso que puede ser renovado, éste se logra si se propicia la restitución parcial o total del almacenamiento a través de la recarga.

### *Tercer Grado "Dañino".*

Durante la etapa del desarrollo avanzado se inicia un proceso de disminución de la permeabilidad y porosidad del acuífero, sin alterar significativamente el acuífero. La recarga comienza a disminuir, la retención del agua superficial también baja dentro de la cuenca, y aunque los niveles piezométricos continúen con un descenso uniforme, la calidad del agua extraída es cada vez peor, la renovación del almacenamiento del agua subterránea disminuye a través del tiempo, los escurrimientos superficiales de agua, pueden lavar los suelos y disminuir, por lo tanto la vegetación, lo que como consecuencia produce una desaparición de los flujos base de los ríos y arroyos, en éste grado de sobreexplotación, aparecen daños al acuífero y al terreno.

Para restituir la disminución del almacenamiento de agua subterránea se requieren de obras de infiltración artificial cada vez más costosas, además de que el costo de extracción de agua subterránea, va en continuo crecimiento en las zonas costeras, la intrusión salina invade franjas cada vez mayores, con lo que se reducen las áreas de extracción de agua.

### *Cuarto Grado "Destructivo".*

Cuando la etapa del desarrollo de un acuífero es muy avanzada, sobre todo cuando existe una franca sobreexplotación del almacenamiento subterráneo, los efectos son altamente perjudiciales y en ocasiones destructivos, con lo que se presentan daños irreversibles, éste grado se caracteriza porque la recarga del acuífero llega hasta un valor mínimo quizá menor que el que tenía en su etapa en estado virgen, los suelos desaparecen en la mayor parte de la superficie del terreno, y la retención del agua es mínima, lo que además de causar desastres superficiales perjudica permanentemente la estructura del acuífero.

El abatimiento continuo del nivel piezométrico, además de afectar económicamente al usuario del acuífero, produce fracturas y hundimientos del

terreno, en cuyos bordes se infiltra el agua contaminada por escurrimientos superficiales, por rotura de drenajes, o por la penetración de lixiviados en depósitos de mala calidad.

En los acuíferos costeros se acentúa la invasión de agua salada y la calidad del agua que se extrae se deteriora, éste grado se caracteriza por el deterioro de la infraestructura urbana, hidráulica, de comunicación, y de servicios, lo que además constituye un costo adicional varias veces mayor que el correspondiente a la extracción de agua subterránea.

### *3.4.2 Efectos de la Sobreexplotación*

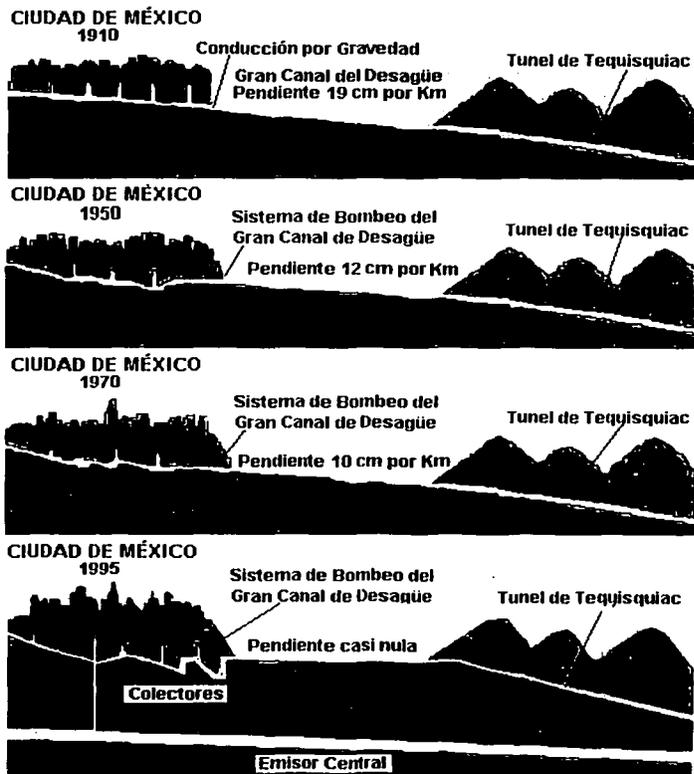
#### *a) Hundimientos en la Ciudad de México.*

Antiguamente existían problemas de inundaciones en el centro del País, de ahí surge la necesidad de crear salidas artificiales de la cuenca para desaguarla y evitar dichos problemas, lo primero que se hace es el Tajo de Nochistongo, en el que se abre una rebanada entre cerros al Norponiente de la cuenca, a la que no se consideró darle ningún mantenimiento, por lo que en poco tiempo se azolvó, posteriormente se retoma ésta obra, pero ahora con mejores maniobras y se crea un socavón, además proyectan varias obras como el desagüe de Tequisquiac, al Nororienté de la cuenca, con el fin de desaguar las inundaciones causadas en el centro de la ciudad, por los desniveles de la cuenca, que comprende el hoy Centro histórico y parte de Iztapalapa, Iztacalco, Benito Juárez e inclusive Coyoacán.

Los problemas hidráulicos se complicaron por la creación de pozos, y dado que la finalidad era la de desaguar por medio de gravedad, comenzaron a presentarse hundimientos, hasta quedar casi inhabilitado el canal de Tequisquiac para después venir a ser substituido por el Gran Canal con gran éxito hasta posteriores hundimientos, por lo que comienza la construcción del drenaje profundo, y sus diferentes conectores, interceptores y sistemas de bombeo que

ahora si logran desaguar la cuenca, en la figura 3.33 se muestra la evolución de los hundimientos en el Valle de México, y su influencia en los canales de desagüe.

Figura 3.33 Evolución de los hundimientos de la Ciudad de México.



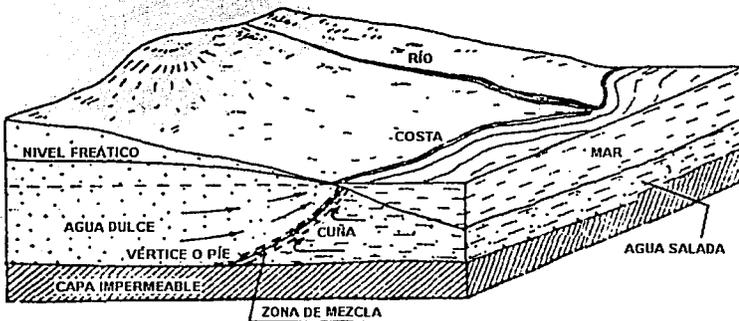
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fuente: "Drenaje Profundo de la Ciudad de México": D. G. C. O. H., 1997

b) *Intrusión Salina.*

Se llamará *cuña de agua salada* o *salina* a una masa de agua salada de gran longitud, en la figura 3.34 se muestra una sección en forma de *cuña* apoyada en la base del acuífero o con el vértice o pie hacia tierra adentro, siendo la forma normal de las masas de agua salada a lo larga de una costa.

Figura 3.34 *Cuña de Agua Salada en un Acuífero Costero.*



Se llamará *cono o domo de agua salada* a toda protuberancia vertical de las masas de agua salada; se produce como consecuencia de bombeos o drenajes locales, en una zona en la que hay agua dulce sobre agua salada como se muestra en la figura 3.35.

Si la zona de drenajes es alargada se puede originar una *cresta salina*. Los drenajes (ríos, lagunas, litorales, etc.) y/o bombeos próximos a la costa pueden provocar una *lengua o dedo de agua salada* que no es más que un avance anormal de *cuña de agua salada* mostrado en la figura 3.36.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.35 Conos de Agua Salada debajo de Extracciones.

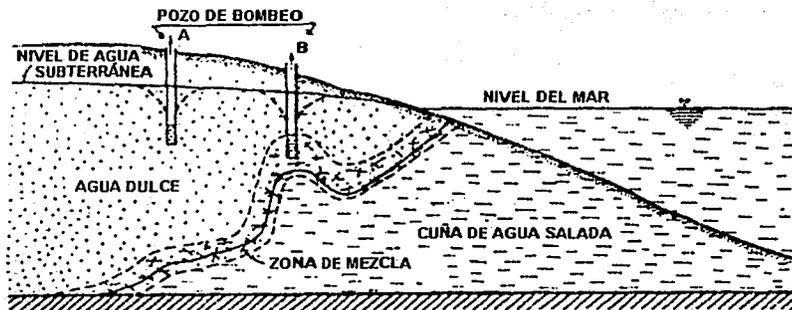
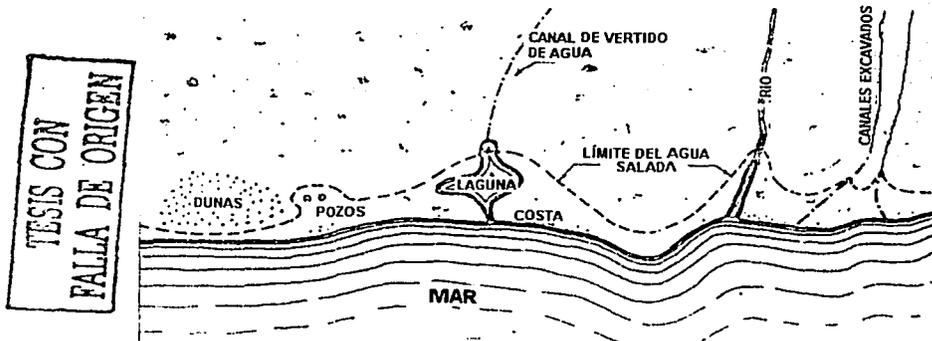


Figura 3.36 Representación Esquemática de la Cuña de Agua Salada

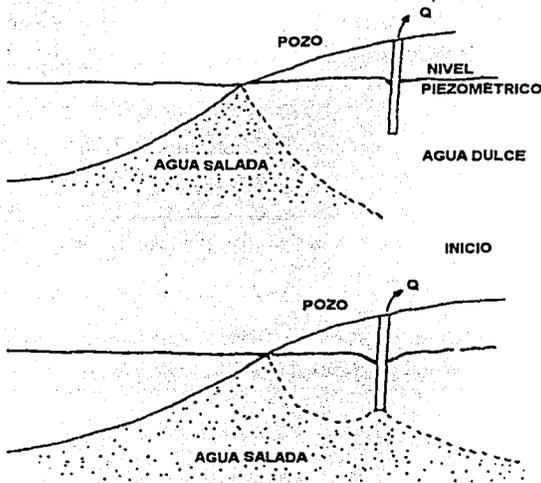


Se llamará intrusión salina, al movimiento del agua del océano hacia el continente dentro de los acuíferos costeros confinados o no confinados, y que produce el desplazamiento de agua dulce de esas formaciones y la inutilización del recurso.

Dentro de la gran cantidad de acuíferos con problemas de intrusión salina, los encontramos en los Estados de Baja California Norte y Sur, Colima, Sonora, Veracruz, y dadas las condiciones de ubicación geográfica es de suma importancia el conocimiento de las relaciones agua dulce - agua salada, por la posibilidad de un cambio en el agua dulce del acuífero costero.

Cuando el agua es bombeada fuera del acuífero, el nivel freático cae y la frontera se mueve hacia adentro. Como se detalla en la figura 3.37 un pozo de agua dulce costero, podría tener que ser abandonado después de un tiempo, debido a esta intrusión salina.

Figura 3.37 Desarrollo de un Pozo Costero al paso del Tiempo.



TESIS CON  
FOLIA DE COTIGEN

El equilibrio del agua dulce - agua salada en el acuífero costero es función del caudal de agua dulce que fluye hacia el mar, ya sea a través del curso de agua

superficial o bien subterránea, el flujo de agua subterránea mantiene en cierta posición a la zona de mezcla agua dulce – salada, cualquier cambio ya sea extracción por bombeo o reducción del flujo de la recarga, puede provocar una mayor penetración de la cuña marina hasta que se logre nuevamente el equilibrio.

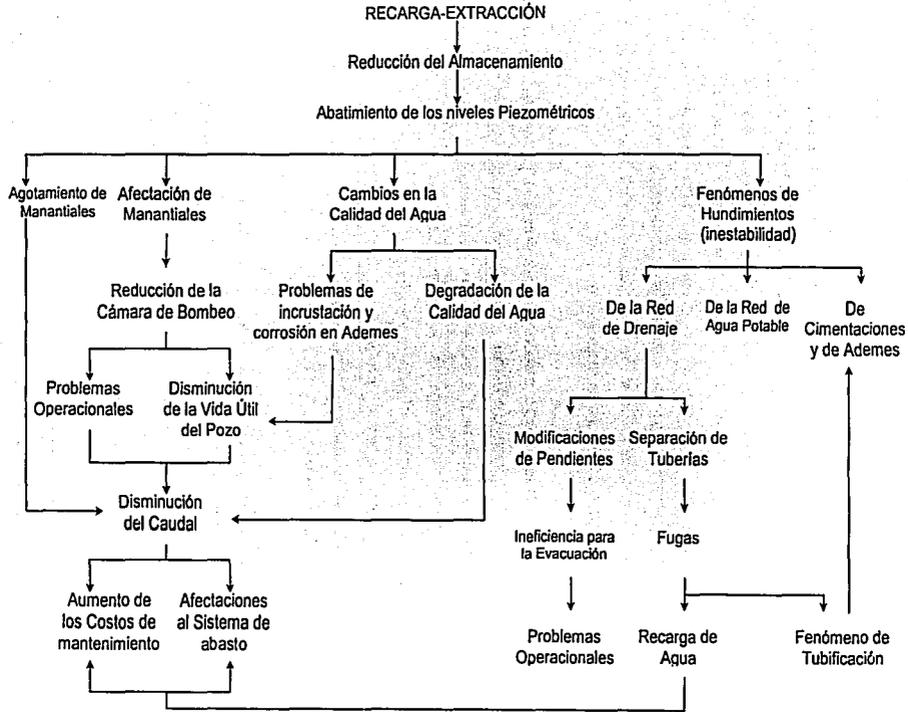
Sin embargo, no es éste el único modo de salinización ya que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce sobre el agua salada puede producirse una ascensión de sal formando un cono. Otras veces ésta contaminación puede provenir de infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, bien por goteo o bien por deficiencias en el pozo.

También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo esta en una llanura costera de muy baja cota, o debido a la mayor penetración del agua del mar en ríos y lagunas costeras durante las mismas, incluso por las lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales o por tifones.

Como medidas de prevención del problema de la intrusión salina se ha planeado la modificación de los patrones de bombeo, lográndose la reducción de las extracciones, de manera que se eleven los niveles de agua subterránea, con un gradiente hidráulico hacia el mar, manteniéndose de ésta forma alejada la posibilidad de la generación del problema.

En el cuadro 3.8 se muestran tan sólo algunos de los problemas que son provocados por una excesiva explotación del almacenamiento de los acuíferos.

Cuadro 3.8 Efectos colaterales de la sobreexplotación de Acuíferos.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### **3.5 TIPOS DE RECARGA**

#### **3.5.1. Recarga Natural.**

Las aguas subterráneas no son más que una de las fases o etapas del ciclo hidrológico, se considera a ésta fase como recarga natural de los acuíferos, de tal manera que el agua subterránea se reabastece o recarga con la lluvia, nieve derretida, arroyos y otra agua superficial que se trasmite hacia la tierra, el agua subterránea se recarga de acuerdo al agua que se filtre hacia el subsuelo en donde se llenan los espacios entre las partículas existentes entre rocas y tierra, la parte superior de esta zona se le conoce como capa freática, y ésta puede estar a unos centímetros o unos metros de la superficie.

Tan obvio es que las aguas subterráneas forman parte del ciclo que en ocasiones se explotan las aguas de una región como si nada tuvieran que ver con la precipitación o con la escorrentía superficial, con resultados indeseables. En ocasiones existen surgencias de aguas que proceden del interior de la Tierra y nunca han estado en la superficie ni han formado parte del Ciclo Hidrológico, éstas son consideradas como *aguas juveniles* y son casos extremadamente excepcionales, las aguas termales, sulfúricas etc, se ha demostrado que son aguas meteóricas en la mayoría de los casos.

Las aguas fósiles o congénitas son aquellas que quedaron atrapadas en la formación de un sedimento, otras aguas subterráneas que aparecen como ajenas al Ciclo Hidrológico son las aguas en regiones desérticas. Éstas aguas se almacenaron hace miles de millones de años cuando esas regiones aun no eran desérticas, de ahí que se les considere ajenas, dado que permanecen apartadas del ciclo mismo.

Dentro de las fases del Ciclo Hidrológico nos enfocaremos a la escorrentía subterránea en donde una vez que el agua ha llegado a la zona saturada, circulará por el acuífero siguiendo los gradientes hidráulicos regionales, hasta que salga al

exterior o sea extraída. Su recorrido puede ser de algunos metros o de varios kilómetros, y puede durar durante unos meses o tal vez miles de años. El agua subterránea puede encontrar salida hacia el exterior mediante pozos o sondeos, o a través de manantiales, de igual manera cuando se encuentra con un río o lago, o inclusive en su recorrido final al llegar a los océanos, y así comenzando nuevamente el Ciclo Hidrológico.

Una vez conocida la geología del lugar y con una idea aproximada de la permeabilidad superficial y subterránea, se procede a estudiar mediante observaciones periódicas las condiciones que son susceptibles de medirse en menor grado de exactitud como precipitación pluvial, el grado de escurrimientos superficiales, los caudales de agua extraídos del subsuelo, y los caudales que afloran en forma de manantiales, el régimen piezométrico (o sea el conocimiento de la evolución piezométrica del subsuelo, el flujo de agua subterránea, las oscilaciones del nivel freático, al variar el volumen almacenado, así como la evapotranspiración con un grado de aproximación mucho menor que los anteriores).

Todo lo anterior permite fijar el coeficiente de infiltración cuyo producto con el volumen de agua precipitada, da por resultado la recarga natural de los acuíferos.

### *3.5.2. Recarga Inducida o Accidental.*

Ésta es originada por las actividades humanas que directa o indirectamente, modifican el régimen hidrológico de una cuenca, como es el caso de las zonas de riego de aguas superficiales la infiltración, los vasos de presas, pérdidas en las redes de conducción y distribución, y la infiltración de excedentes de riego, producen una cuantiosa recarga adicional que puede ser mucho mayor que la natural especialmente en zonas áridas por bombeo, generalmente hay un excedente que retorna al subsuelo aunque éste no se trata de una recirculación parcial del agua, que en la contabilidad hidráulica es equivalente a una

alimentación inducida, se estima que del 20 al 50% del caudal proporcionado a la Ciudad de México se pierde en las redes hidráulicas.

La Recarga Inducida consiste en crear situaciones favorables a la infiltración natural. Sus métodos pueden consistir en preparar superficies de forma adecuada, como creación de terrazas, plantaciones adecuadas, etc., o bien la sobreexplotación adecuada de los puntos favorables a la infiltración, para lograr una penetración de mayor volumen de agua en el acuífero.

### 3.5.3 Recarga Artificial.

"La recarga artificial, podría definirse como el conjunto de técnicas que cuyo objetivo principal es la de permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y la creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua"<sup>1</sup>

La problemática de los acuíferos en el país es diversa, pues depende de las características hidrogeológicas de las zonas, del uso de los acuíferos, y de las aportaciones que éstos reciben.

Con el transcurso del tiempo, y debido a la gran sobreexplotación existente en los acuíferos, es razonable que la calidad del agua subterránea se haya deteriorado debido a actividades humanas, las infiltraciones al subsuelo ocasionadas por excedentes de riego agrícola, descargas de aguas residuales, y rellenos sanitarios aportan gran cantidad de sales y diversos tipos de contaminantes orgánicos e inorgánicos generados en los efluentes de las áreas urbanas e industriales.

Actualmente el 70% del agua que abastece al área metropolitana, proviene de los acuíferos, en el Valle de México se requieren 56 m<sup>3</sup>/s, para satisfacer ésta

---

<sup>1</sup> Custodio, E. y Llamas, M.R. "Hidrología subterránea" 2ª edición, Editorial Omega. S. A. Barcelona (1983).

demanda, se extraen 40 m<sup>3</sup>/s del acuífero, de los cuales se pierden 17 m<sup>3</sup>/s por infiltraciones, para completar el caudal se obtienen cerca de 3 m<sup>3</sup>/s de agua que corre superficialmente, 2 m<sup>3</sup>/s de agua residual tratada, y el resto proveniente de las aguas superficiales externas.

*Los principales objetivos de la recarga artificial.<sup>2</sup>*

- Restaurar un acuífero excesivamente explotado, quizá prolongando su vida, útil, hasta que se disponga de otro modo de abastecimiento.
- Mantener los recursos y regularizarlos, en especial, de cara a los estiajes.
- Almacenar agua local o importada.
- Depurar el agua que se recarga por estancia prolongada en el acuífero.
- Combatir la intrusión marina y la contaminación, creando barreras hidráulicas apropiadas.
- Utilizar el acuífero como conducto de distribución de nuevas aguas, cuando existe una red apropiada de pozos.
- Evacuar ciertas aguas residuales, principalmente aguas de refrigeración.
- Diluir las aguas existentes en el acuífero y ayudar a mantener un apropiado balance de las sales, principalmente en las zonas agrícolas.
- Reducir la subsidencia por efecto de bombeo (no restituye los niveles iniciales, solo los detiene o frena).

Al recargar artificialmente el acuífero de la Ciudad de México, puede presentar condiciones favorables para la disminución de la subsidencia del terreno, para el control del flujo subterráneo, para un mejor manejo del acuífero y para el almacenamiento del agua para su uso futuro, con lo que a largo plazo podría reducirse la importación de aguas de cuencas externas, para poder efectuar la recarga es necesario que se cumplan las siguientes condiciones.

---

<sup>2</sup> Custodio et al.

- a) Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero. Dichos puntos se pueden alcanzar por medio de pozos, estanques y galerías filtrantes.

Los estanques de infiltración y galerías, requieren de una gran superficie de terreno, conviene hacer notar que las condiciones geológicas de la cuenca, impidan la infiltración, por otra parte el método de recarga a través de pozos no requiere de grandes extensiones de terreno, además de que éstos atraviesan la capa de arcilla.

- b) Disponibilidad de agua para la recarga, debido a los problemas existentes con el agua disponible en la Ciudad de México, es necesario conocer que tan factible es poder contar con ésta, en la ciudad es posible contar con volúmenes de agua residual tratada, actualmente una pequeña parte es aprovechada y reusada en riego de áreas industriales y llenado de canales de Xochimilco, existe un remanente de agua residual destinada a la recarga artificial, además de volúmenes adicionales provenientes de nuevas plantas y ampliaciones a las actuales, otra posible fuente de recarga es el agua de la lluvia, captada antes de integrarse al sistema de drenaje de la ciudad.

### **3.6. TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL**

Una de las formas utilizadas para lograr la explotación racional de un acuífero, es la recarga artificial. Ésta consiste en la intervención en los procesos de recarga de un acuífero, en los puntos y periodos más convenientes a su régimen de explotación.

La recarga artificial requiere que el terreno tenga zonas porosas y vacías que no se drenen rápidamente al exterior y que el almacenen convenientemente el agua. En cambio, en acuíferos explotados, se puede producir descensos de nivel que dejan un volumen vacío para ser recargado; en este caso la existencia de un bombeo apropiado a la recarga, y debe realizarse de modo que no se impida o

disminuya la recarga natural o lo que pudiera inducirse de aguas superficiales o de otros acuíferos a menos que sea este el efecto que se pretende producir.

En la recarga artificial pueden distinguirse los siguientes sistemas:

- Sistemas de recarga en superficie.
- Sistemas de recarga en profundidad.
- Sistemas mixtos o compuestos por elementos de los dos sistemas.

Aunque en un principio fue más común la recarga en superficie, actualmente domina la recarga en pozos, en especial en zonas densamente pobladas y próximas a poblaciones.

#### *3.6.1. Métodos Superficiales Directos.*

Consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Es útil en caso de acuíferos libres, sin la existencia de niveles poco permeables próximos a la superficie. Los métodos más usuales serían:

##### *a) Zanjas y Surcos.*

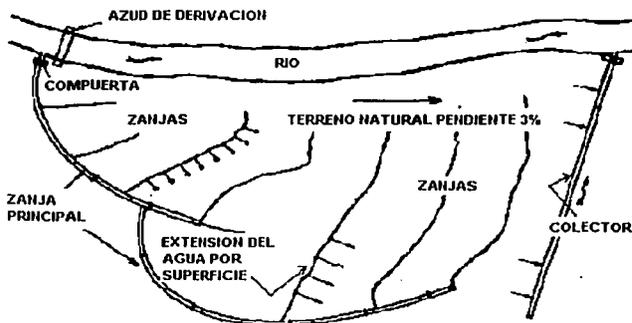
Consiste en hacer circular el agua por surcos de 0.3 a 1.8 m de ancho, realizados con los elementos utilizados para labores de terrenos agrícolas. El inconveniente que presenta es el de necesitar gran superficie, pues el terreno inundado alcanza sólo entre el 10% y el 20% del total necesario, lo que exige que aquel sea barato.

Los surcos pueden seguir las curvas de nivel del terreno, e irse ramificando (simulando las ramas de un árbol) o consistir en una zanja principal y una serie de surcos laterales; la velocidad de circulación debe ser suficientemente alta para evitar que se depositen los materiales finos en suspensión, pero no tan alta que

erosione el terreno. Es conveniente que la superficie primitiva del terreno tenga entre el 1% y el 2% de pendiente.

En la figura 3.38 se muestra la recarga a través de zanjas, considerando en el terreno una pendiente determinada, a demás de la existencia de canales colectores y canales principales.

Figura. 3.38 Recarga por Zanjas.

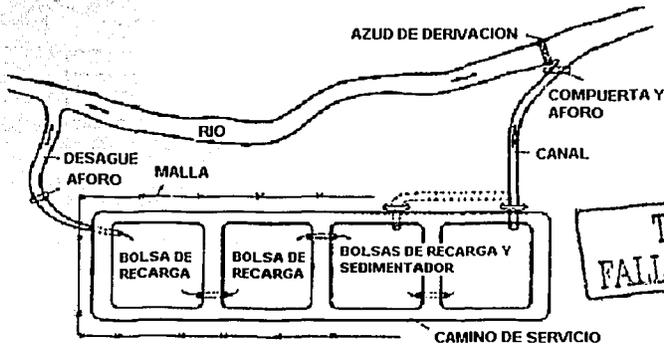


b) Balsas.

Es un sistema que utiliza unas balsas excavadas en el terreno que almacenan el agua para dejarla infiltrar lentamente. Su volumen oscila entre 0.5 y 5 hm<sup>3</sup> y son poco profundas. Se aconseja una profundidad de alrededor de 1.20 m, ya que una menor profundidad da lugar a poca carga de agua y reduce la infiltración, mientras que una mayor profundidad produce un efecto de compactación del terreno que provoca el mismo efecto. La longitud varía entre 270 540 m y la anchura entre 14 y 24 m. La disposición de una varias balsas en línea o en forma alargada tiene como objetivo disminuir las interferencias hidráulicas que se producirían si estuvieran agrupadas, al mismo tiempo que facilita la extracción de agua mediante líneas de pozos y drenes paralelos, asegurando un tiempo mínimo y un cierto recorrido en el terreno.

Las paredes pueden tener una inclinación entre 0.5 y 1.0 m (vertical) a 1.0 m (horizontal), con un ancho mínimo en la parte alta de 0.3 a 1.0 m, en la figura 3.39 se muestra el funcionamiento de la técnica de recarga por Balsas.

Figura 3.39 Recarga por Balsas.

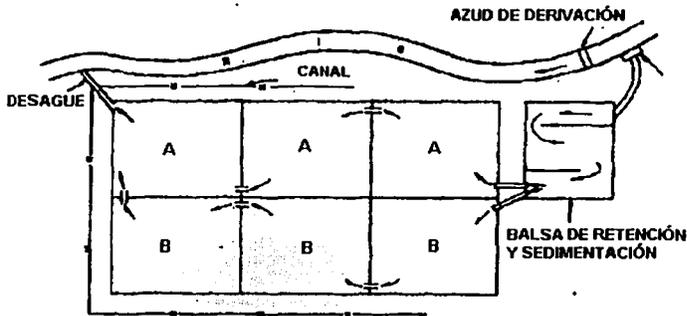


El principal trabajo de mantenimiento consiste en desecar y limpiar los limos que se van depositando en los fondos. Ésta limpieza puede hacerse con maquinaria de movimiento de tierras, de forma que se puedan retirar los limos depositados en la superficie sin provocar su penetración en el terreno permeable del acuífero, pues provocaría a la larga una colmatación irreversible. Si los caudales específicos de infiltración son muy altos, se puede producir una colmatación profunda, puesto que las aguas turbias arrastran los limos hasta profundidades en que la descolmatación se haga imposible.

A fin de mantener una continuidad en la recarga se puede disponer de un doble sistema de balsas en la figura 3.40 se muestra que, pueden aislarse unas de otras a fin de proceder al mantenimiento sin dejar fuera de funcionamiento a otras. Una forma de lucha contra la colmatación de las balsas es producir previamente una decantación. La retención y sedimentación puede realizarse en una balsa de infiltración disponiendo en ésta una primera sección para ello, seguida de una

segunda sección para la infiltración más profunda y separada por un pequeño resalte.

Figura. 3.40 Recarga con Doble Sistema de Balsas.



### 3.6.2. Métodos Subsuperficiales Directos.

#### a) Fosas.

Cuando el acuífero tiene mucho espesor de materiales sueltos y permeables y su nivel freático está profundo es posible excavar grandes fosas, en las cuales se conduce el agua que se va emplear para la recarga.

La profundidad suele ser de unos pocos metros, aunque a veces puede ser de 10 a 20 m; su principal ventaja consiste en la posibilidad de almacenar el agua de avenidas e infiltrarla lentamente.

Las paredes laterales deben tener un talud que mantenga la estabilidad y que deberá estudiarse en función de los materiales que las forman y de los ciclos de llenado y vaciado de la fosa, para tener en cuenta el efecto de la circulación del agua en su estabilidad. En muchos casos se coloca un filtro de grava y arena en su fondo de 0.2 a 2 m de espesor que se limpia o se renueva periódicamente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**b) Otros sistemas de Recarga Artificial en la Superficie.**

En el caso de barrancos sometidos a rápidas e intensas avenidas, y si existe terreno suficiente en las zonas llanas de su tramo inferior, se puede proceder a la inundación de áreas extensas. También puede procederse a construir presas en tramos permeables de los ríos, incluso quitando los posibles recubrimientos impermeables de los ríos, que pueden existir.

Los sistemas de recarga en profundidad son esencialmente los pozos verticales, aunque también se emplean pozos de drenes radiales y en algunos casos galerías de infiltración.

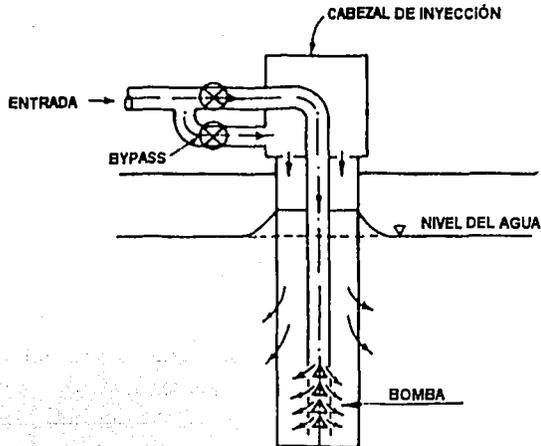
Una ventaja de la recarga por pozos, es que la ocupación del terreno es pequeña en comparación a la recarga por extensión. Ésto hace que los pozos de recarga puedan tener instalada la bomba que se utiliza para extracción, en cuyo caso la inyección se realiza a través de la bomba y de la misma conducción utilizada para el bombeo.

Para evitar pérdidas, a través de las bombas se puede utilizar un cabezal de inyección como se muestra en la figura 3.41 que permite inyectar a través del conducto de bombeo, entre la bomba y las paredes del pozo, o una tubería especialmente dispuesta como se muestra en la figura 3.42, además de poder alternar el bombeo y la inyección, sin perder tiempo en el cambio.

Como normas generales en el proyecto de pozos de recarga es conveniente considerar los siguientes criterios, de carácter local:

El diámetro de perforación debe ser suficientemente grande para que en acuífero de arena permita colocar un macizo de grava que sea de espesor suficiente para evitar que los finos en suspensión colmaten el acuífero. El espesor recomendable puede ser del orden de 30 cm.

Figura 3.41 Dispositivo de Recarga con Bomba Instalada.

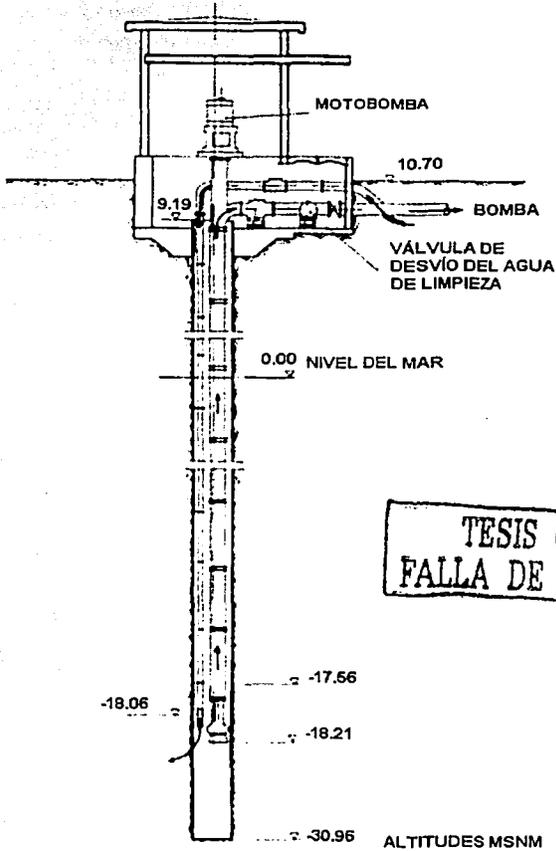


El diámetro de la entubación interior debe ser lo suficientemente grande para poder introducir o dejar instalada una bomba de gran caudal para poder realizar los sucesivos desarrollos, a menos que se disponga de otros métodos de limpieza. La rejilla debe abarcar el máximo espesor del acuífero posible para reducir la velocidad de entrada del agua, evitando con ello la colmatación profunda.

Es conveniente cementar la parte superior de los pozos de recarga en materiales sueltos para evitar que se colapse el terreno. Debe preverse el modo de evacuación de las aguas sucias que se extraerán durante los sucesivos desarrollos. El conducto de inyección debe penetrar por debajo del nivel del agua en el pozo.

TESIS CON  
PLAN DE ORIGEN

Figura 3.42 Esquema de los Pozos de Recarga



### 3.6.3. Métodos por Combinación Subsuperficial-Superficial.

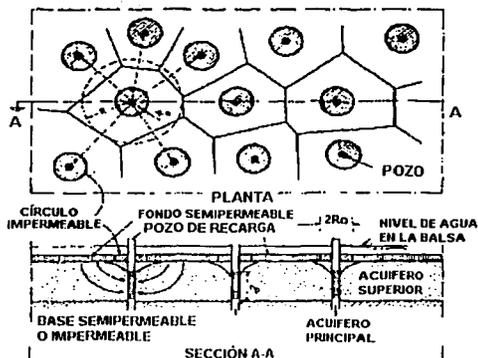
Es necesario señalar que el mayor problema que tienen los pozos de recarga es la turbidez, mientras que el problema de la recarga por extensión, es la de los niveles impermeables existentes en muchos acuíferos, es por esto que surge la necesidad de crear técnicas combinadas.

#### a) Combinación de Balsas y Pozos de Recarga.

Las balsas de recarga del acuífero superior y de los pozos recogen esta agua en el acuífero inferior. Alrededor de cada pozo se dispone un círculo de radio  $R_0$  de material impermeable a fin de tener un recorrido mínimo en el acuífero que garantice una depuración y mezcla apropiada del agua que alcanza el pozo.  $R$  es el radio equivalente de la porción de balsa asociada a cada pozo.

La figura 3.43 se muestra un sistema mixto que utiliza dos acuíferos. El primer acuífero actúa como filtro y el segundo como nivel de recarga final. Las zonas impermeables colocadas en el primer acuífero tienden a lograr un mayor recorrido del agua antes de alcanzar el pozo que la conducirá al acuífero más profundo.

Figura 3.43 Combinación de Balsas y Pozos de Recarga.



TESIS CON  
PLA DE CRIGEN

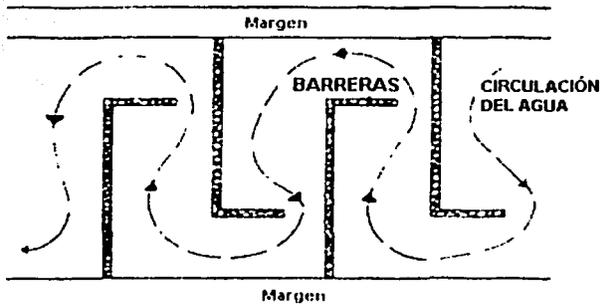
### 3.6.4. Métodos Indirectos.

#### a) Acondicionamiento de Cauces y Ríos.

Cuando no se dispone de terreno adecuado y accesible para realizar balsas, o cuando no se precise de una capacidad adicional de almacenamiento de agua se puede hacer la recarga en el mismo lecho del río, ensanchándolo aplanándolo y escarificándolo, levantando motas y canalizaciones a todo el ancho del cauce de avenidas, a fin de aumentar la superficie y tiempo de contacto. Estas motas, realizadas con los propios materiales del cauce, serán destruidas por las avenidas, pero ello no es un inconveniente grave si se considera que en la práctica se deberá tener una máquina trabajando en la limpieza de los limos que se depositan.

En la Figura 3.44 se presenta la preparación del cauce de un río para aumentar la infiltración, y el recorrido del río, mientras que en la figura 3.45 se muestra la preparación del cauce inundándolo a lo ancho.

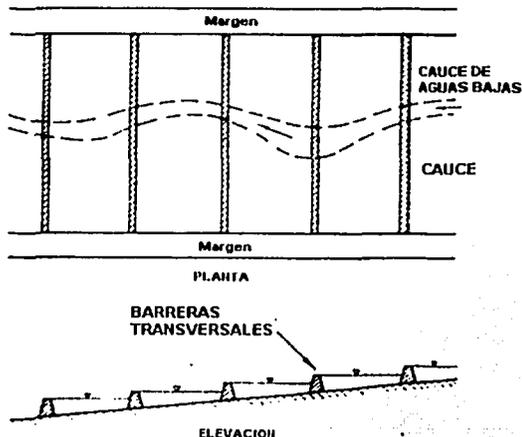
Figura 3.44 Preparación del cauce aumentando el recorrido del Río.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.45 Preparación del Cauce, inundándolo a lo Ancho.

FALLA DE ORIGEN



#### b) Presa de Infiltración.

Una presa de infiltración es una estructura que forma una pequeña cuenca de retención temporal de agua, parte de la cual es infiltrada al subsuelo a través de las fracturas del mismo o mediante pozos de inyección conectados a la presa. Es una presa de pequeñas dimensiones aquella con embalse menor a 10 hectáreas, la cual no presentaría grandes superficies de inundación.

La acumulación de agua se logra a un nivel subterráneo somero controlado. Esto es, el vaso se rellena con material granular seleccionado (tezontle), que produzca la máxima porosidad, esto equivale al máximo volumen de líquido acumulado. Sobre tal material granular se dispone una capa de suelo (el mismo que estaba en el sitio antes de la construcción), el cual podrá utilizarse como zona de riego.

Las presas de infiltración servirán para incrementar el contenido de agua no solo subterráneo, sino dentro del sitio mismo de la presa. La superficie de suelo se incrementará al aprovechar los materiales de las trampas de sedimentación, serán suelos muy fértiles por los desechos orgánicos de los estanques, y actividades agrícolas. La erosión será mínima y los problemas de azolve también.

### *3.6.5. Fases de la Recarga.*

La recarga artificial comprende un proceso de la formación de una elevación de agua, de un régimen estable y de un proceso de desaparición de la elevación del agua al terminar la infiltración.

En la Figura 3.46 Se muestran las cuatro fases de la recarga artificial las cuales serán detalladas a continuación.

#### **FASE UNO. Crecimiento de la cresta de agua.**

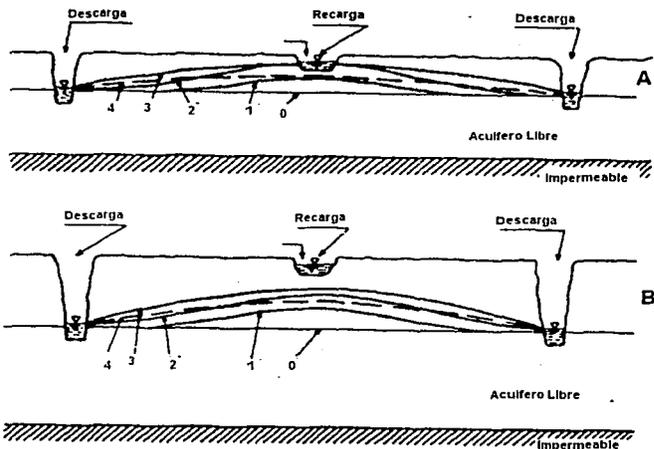
Toda el agua introducida se almacena formando una cresta de agua en aumento. El crecimiento continúa hasta que se alcanza un límite que impide la expansión, ya sea reduciendo la recarga o iniciando un proceso de drenaje. En la figura 3.46A, la cresta aumenta hasta que alcanza la base de la zanja de recarga (control vertical), en cuyo momento el crecimiento de altura cesa pero no el crecimiento en extensión, el cual prosigue hasta que alcanza un lugar de drenaje momento en el que cesa la extensión en sentido horizontal. En la figura 3.46B, la cresta alcanza el control lateral sin haber alcanzado el control vertical.

**FASE DOS. Evolución hacia el régimen estable después de haber alcanzado el control lateral.**

El volumen de agua almacenada aumenta a ritmo decreciente hasta alcanzarse el régimen estacionario. La extensión superficial de la cresta de agua

se mantiene limitada y el agua sólo se produce si no se había alcanzado el control vertical.

Figura 3.46 Las Fases de la Recarga Artificial.



7-518 C  
FALLA DE ...

Crecimiento, estabilización, desaparición de la cresta de agua con un control lateral y un posible control superior.

0 = Nivel inicial.

1 = Crecimiento de la cresta de agua.

2 = La cresta alcanza un límite de potencial.

a = Crecimiento vertical limitado.

b = Crecimiento horizontal limitado.

3 = Régimen estacionario.

4 = La cresta de agua desaparece al cesar la recarga.

### FASE TRES. Régimen estacionario.

El volumen de agua no varía manteniéndose constante y entra tanta agua como sea posible siendo proporcional a la descarga.

### FASE CUATRO. Desaparición de la cresta de agua al cesar la recarga.

La cresta de agua se drena hacia los controles laterales hasta desaparecer. El agua descargada por el control lateral crece durante la fase 2, alcanza un máximo durante la fase 3 y vuelve a decrecer durante la fase 4. El agua puesta en almacenamiento por encima del nivel freático se mantiene ahí temporalmente; al cesar la recarga se incorpora a la masa general desplazando un volumen equivalente hacia los lugares de drenaje.

Cuando se alcanza el control vertical, o sea cuando el nivel freático alcanza el fondo del dispositivo de recarga, el caudal aportado por unidad de superficie decrece.

## 3.7 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RECARGA.

### 3.7.1 Estudios Preliminares.

Para seleccionar un lugar de recarga y obtener los resultados que se pretenden, hay dos elementos fundamentales, las características del medio receptor, o sea el acuífero y las de las aguas que serán introducidas en él, en todo proyecto de recarga a parte de los aspectos económicos es necesario tener en cuenta un conjunto de factores que condicionen realmente la recarga entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

*Hidrológicos.*- Es necesario analizar todas las fuentes de agua posible y definir que caudal son capaces de suministrar, cuando y durante cuanto tiempo, así como la mejor manera de dirigir las al sitio de la recarga.

**Topográficos.-** La topografía y las pendientes del terreno son importantes, en la posibilidad de infiltración de las aguas que se acumulan en la superficie, esto es importante en proyectos de recarga que se basan en aguas sobre la superficie y dejarlas infiltrar a través del terreno. Se considera que la pendiente más favorable es de 1 a 2%.

**Edafológicos.-** Las características de la superficie del terreno y del suelo son importantes a considerar, mientras más gruesa es la estructura del terreno más elevada es la tasa de infiltración.

**Geológicos.-** Es necesario el estudio geológico para delimitar los lugares adecuados para el proyecto, siendo necesaria la exploración geofísica y los sondeos adecuados.

**Hidrogeológicos.-** Deberán evaluarse todas las condiciones hidrogeológicas del terreno, así como las variaciones especiales.

**Hidrodinámicos.-** La introducción del agua a un medio, se traduce en un aumento de carga, que implica la creación de un campo de velocidades que afecta en teoría, en conjunto a todo el acuífero

### **3.7.2 Calidad del Agua de Recarga.**

No existen especificaciones rígidas sobre la calidad del agua para la recarga, puesto que ello depende de las condiciones locales, del método empleado y de consideraciones económicas que pueden conducir a un tratamiento previo a la infiltración, o por el contrario, a unos cuidados mayores de las instalaciones de recarga sin tratamiento previo del agua.

Uno de los principales puntos a considerar es la posibilidad de la colmatación del filtro por diversas causas, como pueden ser la materia en suspensión, colmatación biológica y colmatación química.

La materia en suspensión puede colmatar una cierta profundidad del acuífero y formar una película de lodo en la parte exterior del mismo. Ambos hechos logran reducir la capacidad del acuífero.

La determinación de la cantidad admisible de materia en suspensión depende del sistema de recarga empleado, de la granulometría del filtro y de la capacidad de infiltración.

Otros dos aspectos son la colmatación biológica y química. La colmatación biológica ocurre en primer lugar por existencia de algas en el agua de recarga, en particular por formación de las mismas en las balsas de recarga. Esto lleva consigo el crecimiento de una flora bacteriana cuya actividad decrece con la profundidad. El tratamiento con alguicidas conduce a un precipitado de materia orgánica que colabora a la colmatación por lodos, produciendo a veces malos olores y mal sabor en el agua si se originan condiciones anaerobias. La mejor forma de combatir la formación de algas y colonias bacterianas es mediante ciclos de llenado y vaciado que mantengan el sistema en condiciones aerobias.

La colmatación química puede ocurrir en forma lenta y a largo plazo por iteración entre el agua de recarga y la del acuífero. Los motivos pueden ser:

- Precipitación de carbonato de calcio.
- Precipitación de las sales de calcio.
- Precipitación de hidróxidos de hierro y manganeso por mezcla de aguas reductoras y oxidantes.
- Cuando el agua es sódica, puede producir el hinchamiento de las partículas de arcilla por cambio iónico o su dispersión. Conviene que el agua de recarga mantenga una proporción mínima de Ca y Mg.

La calidad del agua para recarga, depende:

- Del método de recarga.

- Del uso a que vaya destinada el agua resultante.
- De la naturaleza terreno que deba atravesar y de su capacidad de intercambio iónico.

En caso de efectuar un tratamiento previo, éste debe tender a eliminar toda materia en suspensión, eliminar algas y prevenir su crecimiento durante el proceso de recarga, y eliminar la materia orgánica que no puede ser oxidada durante el proceso de recarga por la cantidad disponible de oxígeno disuelto.

### *3.7.2 Colmatación.*

La reducción progresiva de permeabilidad o colmatación es debida a la deposición de sólidos, a la aparición de lodos orgánicos creados por microorganismos o a incrustación química. En un río, canal, zanja, campo de extensión o surco, la sedimentación de sólidos es función de la velocidad de circulación del agua, de la capacidad de infiltración, de la cantidad y del tipo de materia en suspensión que arrastra el agua. Conforme el agua se va infiltrando, el caudal va disminuyendo y por lo tanto, para evitar la sedimentación de partículas se debe tener en cuenta éste hecho.

Si se desea infiltrar una fracción importante de agua, se produce sedimentación por una parte o por todos los sólidos en suspensión. Esto lleva a una colmatación progresiva de fondo, aunque no necesariamente de las paredes si éstas tienen pendiente suficiente. La mayor o menor penetración de las partículas en el terreno dependen de la granulometría de éste, de las partículas en suspensión, de la velocidad de infiltración y de las condiciones de sedimentación.

Si el terreno no es finamente poroso y existen partículas demasiado grandes en suspensión, primero éstas se sedimentarán y cuando cubran la superficie de infiltración actuarán como nueva superficie filtrante; si el agua está quieta o en lento movimiento, se van formando sucesivas capas de materiales cada vez más finos que van reduciendo la capacidad de infiltración. Cuando no

existen partículas suficientemente gruesas en suspensión, las finas penetran en el terreno y se alojan en los poros reduciendo la permeabilidad; la penetración depende del tipo de terreno, siendo mayor cuando más uniforme es la granulometría.

En un terreno de granulometría grande y bien clasificado se tienen elevadas capacidades de infiltración y se colmatan lentamente con aguas que tienen en suspensión solo arcillas y partículas finas, pero las partículas pueden penetrar profundamente y será mayor mientras aumente la velocidad de entrada.

Las algas y otros microorganismos que transporta el agua o que se forman en las balsas de infiltración también contribuyen a la colmatación; por otro lado, en el medio poroso se pueden crear lodos de microorganismos que limitan la permeabilidad, pero al mismo tiempo limitan la penetración de otras partículas.

Cuando el agua recargada es químicamente inestable o es incompatible con el agua del medio saturado o no saturado, pueden dar origen a precipitados que también reducen la permeabilidad; tales como los hidróxidos y óxidos de Fe.

#### *Disminución del Ritmo de Colmatación.*

Para reducir el ritmo de la colmatación conviene quitar partículas en suspensión del agua mediante una decantación previa, seguida o no de una filtración, aunque con ello la penetración es mayor; por ello no conviene forzar el ritmo de la recarga. Cuando se realiza la filtración y esta económicamente justificada, suele hacerse en filtros lentos de arena y grava, aunque también se emplean filtros rápidos de arena con ciclos programados de limpieza y para recarga de aguas residuales tratadas en pozos, se llegan a usar filtros especiales.

La descolmatación se realiza renovando o lavando la capa de arena y la grava. En principio se trabaja de modo que las partículas finas en suspensión no alcancen el medio natural, pero permitiendo cierta penetración en el filtro, a fin de

no reducir demasiado la capacidad filtrante. Se puede aprovechar esta filtración para provocar fenómenos químicos y bioquímicos favorables a la depuración. Durante la decantación se pueden añadir sustancias que aceleren la clarificación. Al igual que para la filtración, el proceso es caro y debe estar económicamente justificado.

#### *Descolmatación y Mantenimiento de la Capacidad de Infiltración.*

En cauces naturales la colmatación se reproduce en aguas altas, durante las cuales se renueva el fondo y se ponen de nuevo en suspensión los finos que colmataban, si éstos no habían penetrado en el terreno. En los desbordamientos se depositan finos, que una vez secos son perforados por la vegetación, creándose grietas de retracción o que el viento remueve, con lo que se restablece cierta permeabilidad, preparando esas áreas para infiltrar agua en el próximo desbordamiento.

En obras artificiales de recarga en superficie es preciso proceder a una descolmatación periódica, o al abandono de las mismas y sustitución por otras nuevas; claro que esta sustitución sistemática lleva a una colmatación progresiva de la superficie disponible, que solo se justifica si la recarga artificial es una medida temporal mientras se gestiona una nueva fuente de abastecimiento.

En el caso de campos de extensión, el propio secado restituye parte de la permeabilidad y, si se deja crecer la vegetación, las raíces perforan y rompen los limos, facilitando el paso del agua. En ocasiones se procede a retirar la vegetación antes del nuevo ciclo de recarga, y otras se dejan que mueran ahí, aunque en ocasiones pueden aparecer problemas del medio reductor por exceso de materia orgánica en el fondo de la instalación durante el siguiente período de inundación.

En el caso de fosas y balsas se procede a retirar una parte del material del fondo, reemplazado por una capa artificial de arenas y/o gravas apropiadas. La frecuencia de descolmatación es muy variada, como podría ser después de cada

inundación, hasta una vez en varios años. Es frecuente tenerlo que hacer 2 ó 3 veces por año o por temporada de recarga.

Si se trata de pozos, el método más usual de restablecimiento de la capacidad de infiltración es el bombeo intenso, con un caudal superior al de la recarga. Si la colmatación ha penetrado poco, se suele conseguir la restitución de la permeabilidad inicial; está es más difícil si el medio no es uniforme, si existen partículas finas, y se ha dejado que la colmatación progrese excesivamente.

El proceso de descolmatación, no es raro que se realice diario, si existe una bomba instalada, por lo menos con el carácter preventivo, aunque lo normal es hacerlo semanal o mensualmente, y en ocasiones se realiza anualmente.

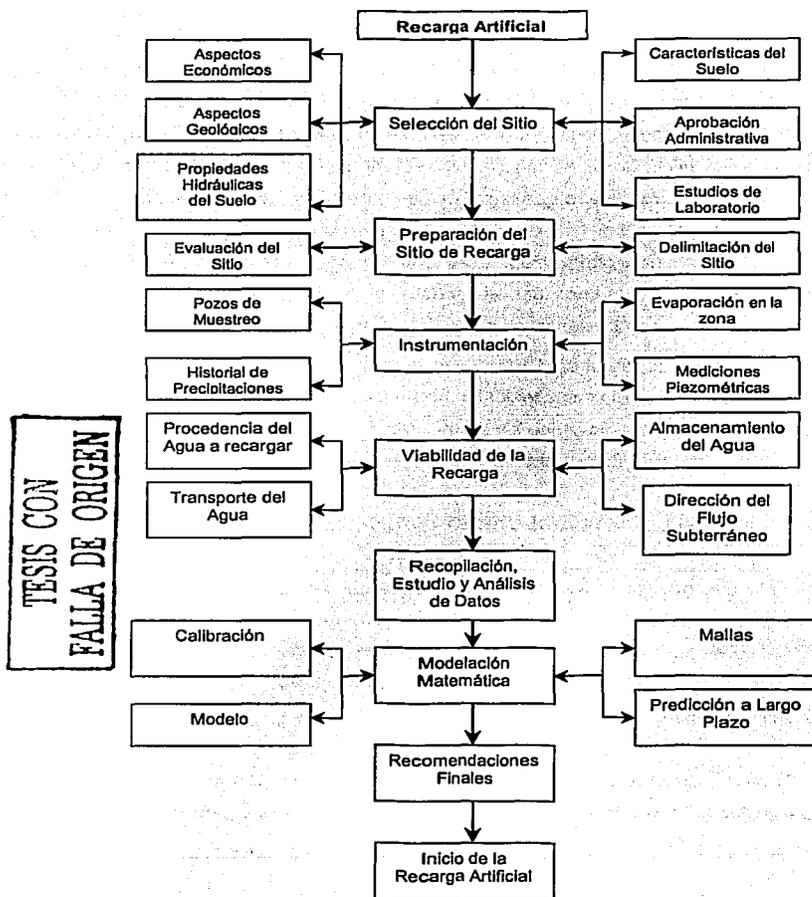
La evolución de la colmatación de los pozos se puede conocer observando la evolución de los niveles o presiones de inyección; además es conveniente disponer de un tubo piezométrico en el macizo de gravas, de existir, o entre el tubo del pozo y la pared de perforación.

### **3.8 METODOLOGÍA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL**

En toda actividad referente a la recarga artificial, es necesario el conocimiento de ciertos aspectos previos, para la determinación de la técnica de recarga, actualmente en México ha tomado mayor auge la recarga artificial, sea para prevenir o corregir la intrusión salina, en las zonas costeras, o como actividad de almacenamiento de agua.

En el cuadro 3.9 se muestra el diagrama de flujo de la metodología de la recarga artificial, y a partir de dicho diagrama se describirán a continuación dichos pasos.

Cuadro 3.9 Metodología para la Recarga Artificial.



### *Selección del sitio de recarga*

Es necesario tener el máximo de información para su correcta evaluación, es aquí en donde intervienen una serie de consideraciones tales como las características geológicas, tipo de suelo y espesor de los estratos, las propiedades hidráulicas, uno de los estudios de gran importancia es el balance hidrológico, el cual nos proporcionará el grado de explotación de ese acuífero y los aspectos económicos y administrativos que intervienen en la designación del sitio, así como los estudios de laboratorio necesarios.

### *Preparación del Sitio.*

Una vez compilados los datos de laboratorio y campo se procede a realizar una evaluación general de la viabilidad del sitio, de tal manera que permita la adecuada aplicación de la técnica, de igual manera se delimitará la zona de estudio y de recarga, así como de las alternativas existentes, para la disposición del agua de recarga, ya que éste es uno de los aspectos más relevantes debido a que es necesario contar con una fuente cercana de abastecimiento del agua, como podría ser el caso de agua residual tratada, procedente de alguna planta de tratamiento cercana o agua pluvial, siendo necesario para éste último caso contar con depósitos colectores, donde la calidad del agua de recarga comienza a ser una tema importante dado que debe tener características similares al agua existente del posible acuífero recargado, ya que podrían presentarse problemas al combinarse con otros elementos que pudieran existir en el suelo, o sustancias que puedan ser vertidas por el hombre y que se puedan infiltrarse al subsuelo, cambiando la composición química del agua existente en la zona.

### *Instrumentación.*

Ésta es una de las etapas vitales de la metodología dado que es necesario contar con la mayor información de las aguas subterráneas, conociendo los niveles estáticos en determinado tiempo, ésto se logra haciendo observaciones en

pozos de muestreo ubicados en el acuífero de estudio, en el caso de agua pluvial, es necesario tener un historial de precipitaciones de la región, para de ésta forma asegurar el suficiente suministro del agua a recargar, y a su vez tomar en cuenta los niveles de evaporación de la zona.

### *Viabilidad de la Recarga.*

En ésta etapa es necesario conocer los recursos con los que se cuenta para una buena recarga, como el caso de la procedencia del agua a recargar, siendo necesario asegurar un gasto constante y permanente, dado que respecto a las aguas residuales procedentes de una planta de tratamiento no se cuenta con dicho gasto constante ya que dadas las condiciones de operación de las plantas en México hace difícil ésta maniobra pues dejan de funcionar o no operan para la capacidad a la que fueron diseñadas, como es caso de la planta de Cerro de la Estrella, la cual siendo la más grande de la Ciudad de México no opera a su máxima capacidad proporcionando un caudal de 4000 l/s a nivel terciario, en donde el 56% es designado al llenado de canales y lagos recreativos, 25% para recarga del acuífero, y el resto para otras actividades y servicios.

El transporte del agua es importante dado que lo recomendable es contar con una fuente cercana, al no existir esta cercanía surge la necesidad de crear tanques de almacenamiento, los cuales a su vez sirven como reguladores del gasto a inyectar en el caso de los pozos de inyección, otro aspecto relevante de la recarga artificial es la tendencia y dirección del flujo una vez que se recarga el acuífero esta se realiza a través del uso de programas de cómputo<sup>3</sup> los cuales simulan las direcciones de flujo subterráneo, siendo de utilidad para predecir efectos en el suelo.

---

<sup>3</sup> Programas de cómputo más usuales MODFLOW2000, RT3D, WINPEST, WATEQ2, que se detallarán en el siguiente apartado.

### *Recopilación de Datos.*

Una vez que se han tomado en cuenta todos los aspectos anteriores, se procede a unificar y analizar toda la información, antes de iniciar cualquier método de recarga. Para ello es necesario contar con laboratorios especializados, para un mayor análisis como pueden ser: geológicos, hidrológicos, mecánicos y de calidad.

### *Modelación Matemática.*

Esta etapa tiene como finalidad la predicción del comportamiento del acuífero una vez que se han determinado los caudales que se requieran para la infiltración, esto se hace con la recopilación de toda la información recabada anteriormente, previamente calibrado el programa, nos generará el modelo necesario, este procedimiento se describirá en el apartado 3.9 de este capítulo.

### *Inicio de la Recarga.*

Con la información arrojada por la Modelación, se procede a diseñar los componentes necesarios de acuerdo a la técnica apropiada, una vez determinadas las dimensiones de los elementos a usar, se procede al inicio de la recarga, monitoreando el comportamiento del acuífero, la calidad del agua y de los equipos usados en dichos métodos.

## **3.9 DISEÑO POR MEDIO DE MODELACIÓN DE LA TÉCNICA DE RECARGA.**

La modelación matemática cobra un papel muy importante en la determinación del caudal y lugar de la recarga artificial debido a que los programas de modelación de flujo subterráneo tienen como principal objetivo el desarrollo y dirección del agua subterránea, se recargue o no el acuífero, éstos programas de cómputo, entre los que se encuentran MODFLOW2000, RT3D,

WINPEST, WATEQ2, siguen un mismo patrón de análisis el cual se tratará de explicar a continuación.

Lo principal será la calibración del programa esto se hace comparando los niveles piezométricos obtenidos de los pozos pilotos o de muestra y los niveles que nos genera el programa una vez que se han introducido los datos necesarios, una vez calibrado, se procede a establecer un área de estudio, donde el programa construye una malla, de escala variable, los espacios formados por esta se catalogan como NODOS.

Existen mallas generadas por el programa de acuerdo a los distintos parámetros que se introduzcan, en la figura 3.47 se muestra la malla correspondiente a los volúmenes de extracción en  $Mm^3$  por año, de cada nodo de la zona Norte del Valle de México.

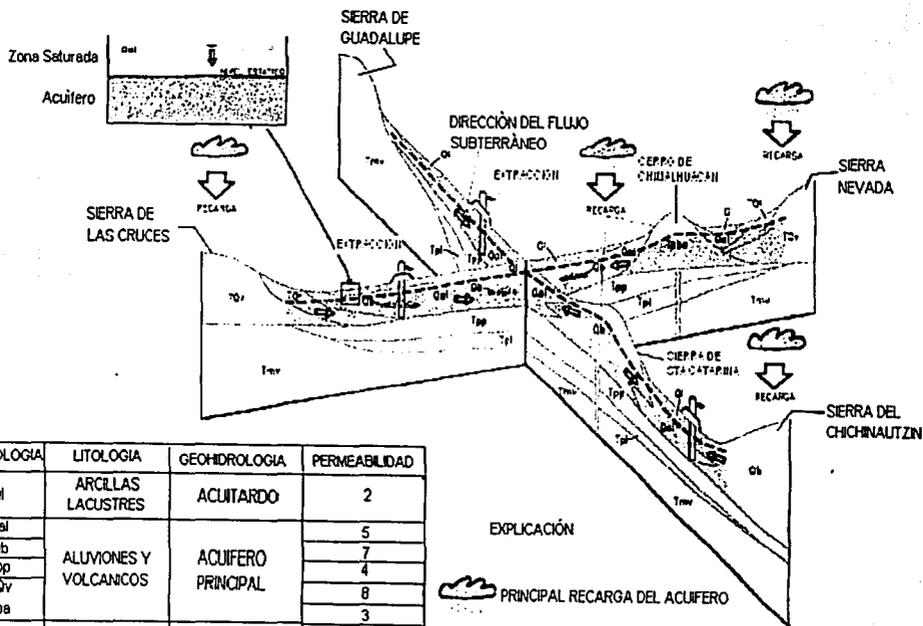
En cada nodo se tendrán que cargar los datos correspondientes de esa zona como serían permeabilidad vertical y horizontal, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, tipo de suelo, granulometría, transmisibilidad, porosidad, espesor de los estratos, niveles estáticos, y caudales de extracción de los pozos existentes en la zona de estudio, así como cartas geológicas, y los balances hidrológicos en los últimos años.

De acuerdo a toda la información recabada anteriormente, el programa se encargará de determinar las curvas de igual profundidad estática del agua, generando a su vez un isométrico en donde se muestra el corte de los estratos, direcciones de flujo subterráneo, así como la localización de los acuíferos en la zona de estudio como se muestra en la figura 3.48.



# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.48 Modelo Isométrico de funcionamiento del Acuífero del Valle de México

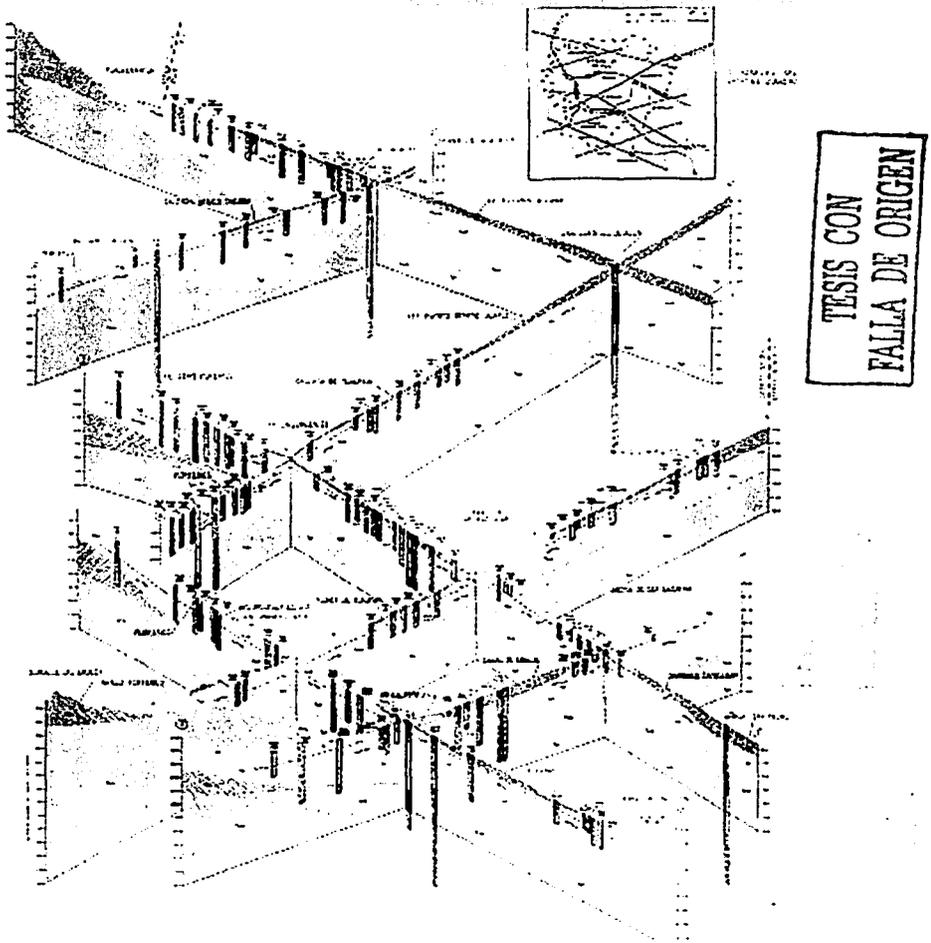


SIMBOLOGIA	LITOLOGIA	GEOHIDROLOGIA	PERMEABILIDAD
Ql	ARCILLAS LACUSTRES	ACUITARDO	2
Qal	ALUVIONES Y VOLCANICOS	ACUIFERO PRINCIPAL	5
Qb			7
Tpp			4
TQv			8
Tpba			3
Tss	SERIE ESTRATIFICADA	PROBABLE ACUIFERO	4
Tpl-Tmv	BASAMENTO GEOHIDROLOGICO	IMPERMEABLE	1

### EXPLICACIÓN

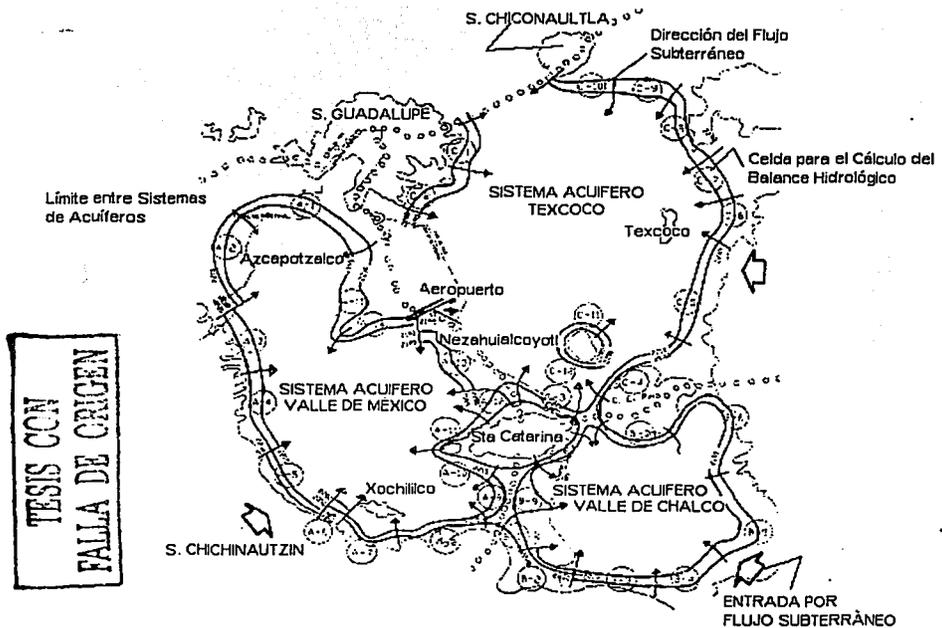
- PRINCIPAL RECARGA DEL ACUIFERO
- DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO
- EXTRACCION POR BOMBEO (DESCARGA DEL ACUIFERO)

Figura 3.49 Isométrico General del Valle de México.



De igual forma el programa genera una serie de gráficos los cuales nos muestran la dirección del flujo, con ésta gráfica se puede conocer el comportamiento de las aguas subterráneas según donde sean recargadas, como se muestra en la figura 3.50.

Figura 3.50 Esquema de la dirección del flujo subterráneo.



En el esquema se muestran las curvas de igual nivel estático, así como las direcciones del flujo subterráneo, en donde se observan varios conos de depresión existentes en el Valle de México.

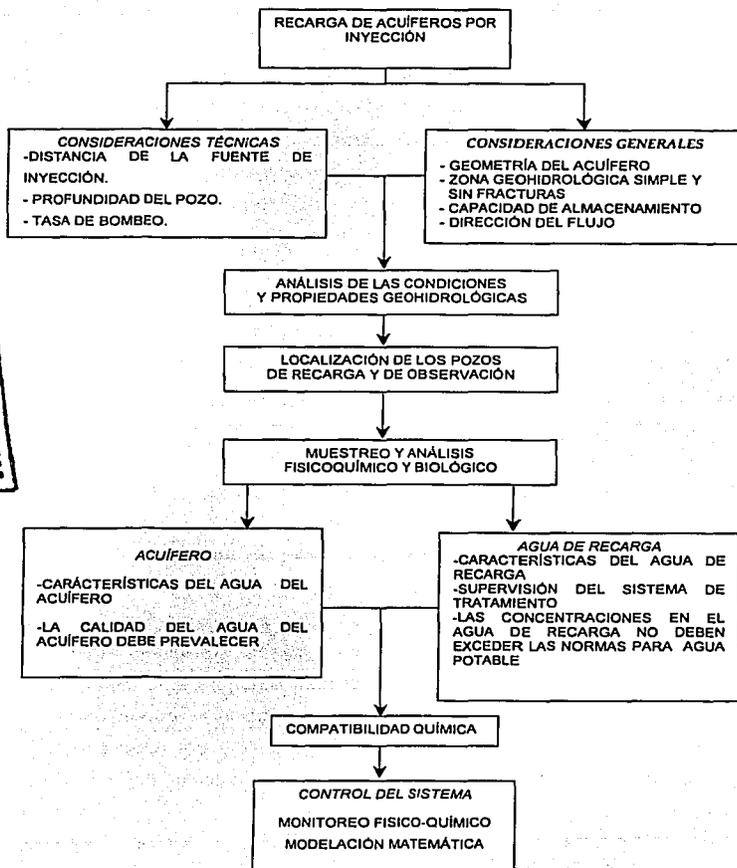
La magnitud de la sobreexplotación del acuífero del Valle de México para cada subsistema es la siguiente: 25% para el Subsistema de la Ciudad de México; 53% para el Subsistema de Texcoco, y de 19% para el de Chalco.

Otra de las ventajas que presentan éstos programas, es que se pueden variar los datos, para de ésta forma conocer las condiciones que se presentarían en un futuro inmediato, es necesario mencionar que no existen un modelo a seguir para el diseño de los elementos a usarse en la recarga artificial, tampoco existe un método único, dado que dependerán de aspectos como económicos, de espacio, del caudal a recargar, además de estar sujetos a consideraciones de costos de proyecto.

Para determinar la factibilidad técnica de recarga por inyección es necesario en primer término, analizar las condiciones geohidrológicas de la zona de estudio, para lo cual se requiere conocer la estructura geológica y el perfil estratigráfico y por otra parte las condiciones hidráulicas como los niveles piezométricos, velocidad y dirección del flujo. Con éste análisis es posible determinar la factibilidad del proyecto de recarga y bajo de las condiciones en que este se puede efectuar. En el cuadro 3.10 se muestra la metodología de recarga de acuíferos por el método de inyección en el Valle de México.

Por otra parte el conocimiento de las condiciones geohidrológicas locales así como la ubicación y el propósito del proyecto, permitirán determinar la localización de los pozos de recarga, su profundidad y la tasa de inyección. En general cuando se tienen pozos múltiples de inyección estos deben localizarse aproximadamente perpendicular a la dirección del flujo del agua subterránea y distancias tales que no exista interferencia entre los conos que cada pozo forma tanto en la inyección como la extracción.

Cuadro. 3.10 Metodología para la recarga de acuíferos para inyección.



Fuente: Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, SMISA

A.C. 1994

A continuación es necesario realizar la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y biológicas (FBQ) tanto del agua del acuífero como la que se pretende recargar; si proviene de un sistema de tratamiento la caracterización permitirá conocer su calidad; si no existe ningún tratamiento, la caracterización será un dato básico en el diseño para un sistema idóneo.

Una vez ubicada el área de inyección se debe garantizar el funcionamiento de un pozo en condiciones estables, durante el tiempo necesario para aceptar que trabaja satisfactoriamente; en esta etapa se requiere analizar la compatibilidad física, química y biológica con el agua de recarga para establecer los requerimientos de tratamiento, o en caso de compatibilidad, determinar si es suficiente para obtener la calidad requerida para la inyección directa.

Lo anterior permitirá prevenir los problemas más comunes como podrían ser los siguientes:

- Entrada de aire al acuífero.
- Partículas suspendidas en el agua de inyección.
- Precipitación de productos insolubles.
- Taponamiento por crecimiento bacteriano.
- Cambios bioquímicos entre el agua de inyección y el agua subterránea.

La última etapa corresponde al control del sistema de recarga en el cual se considera que una vez que éste opera, debe mantenerse en condiciones óptimas para lo cual requiere efectuar monitoreos FBQ periódicos, con objeto de seguir de manera continua el comportamiento del agua mezclada.

Lo anterior se complementa con la simulación del sistema de recarga, mediante un modelo matemático que permita conocer la forma de transporte de contaminantes en el acuífero, su velocidad de transporte y de acumulación así como los principales procesos que se presentan en cada zona de recarga.

La calibración del modelo se llevará a cabo con los datos del monitoreo, de tal forma que si los resultados calculados son congruentes con los medidos, se tiene la posibilidad de utilizar el modelo de manera predictiva evitándose monitoreos tan frecuentes como en la etapa inicial.

El empleo de un modelo matemático puede ayudar a establecer la forma óptima de operación del sistema y su vida útil.

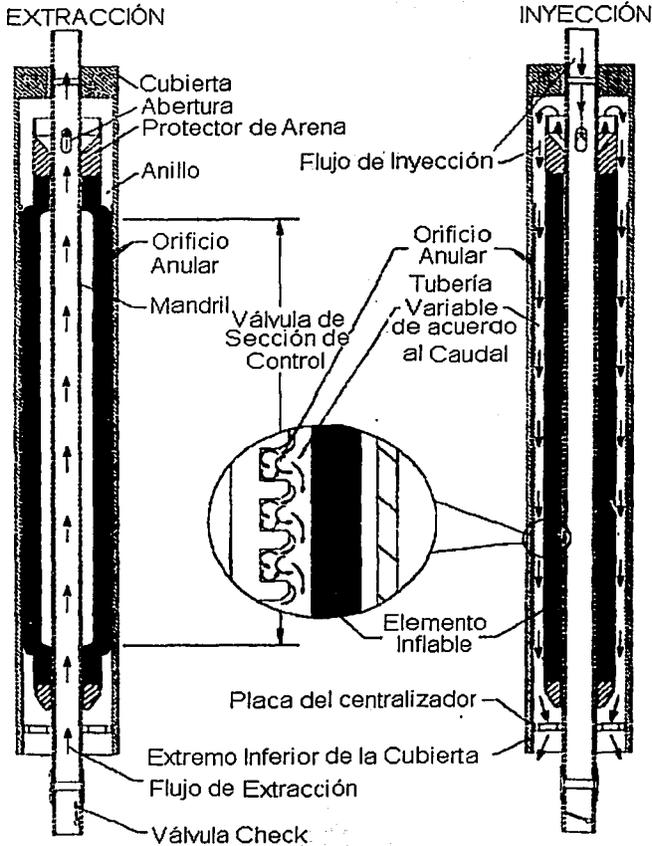
Como ya se mencionó el diseño de los elementos estructurales y tipo de método a seguir es variable, en la Ciudad de México, lo más común es el uso de pozos de inyección dado que cuenta con grandes ventajas además de ocupar un menor espacio que cualquier otro método, es por ésta razón que se mostraran unos criterios de diseño, no siendo una regla a seguir.

Para el diseño de los pozos de inyección usados en el Valle de México es necesario considerar el tipo de material existente en la zona de recarga, debido a que es una de las principales razones para la determinación de los elementos, como puede ser también el grado de permeabilidad, conocidos éstos parámetros y de acuerdo al caudal del proyecto generado de los programas, se procede a diseñar el tipo y dimensiones de los elementos.

Los pozos de inyección tienen gran semejanza con los pozos de extracción únicamente varía en la dirección del funcionamiento de la bomba, en la figura 3.51, se muestran los componentes de los pozos de inyección y de extracción.

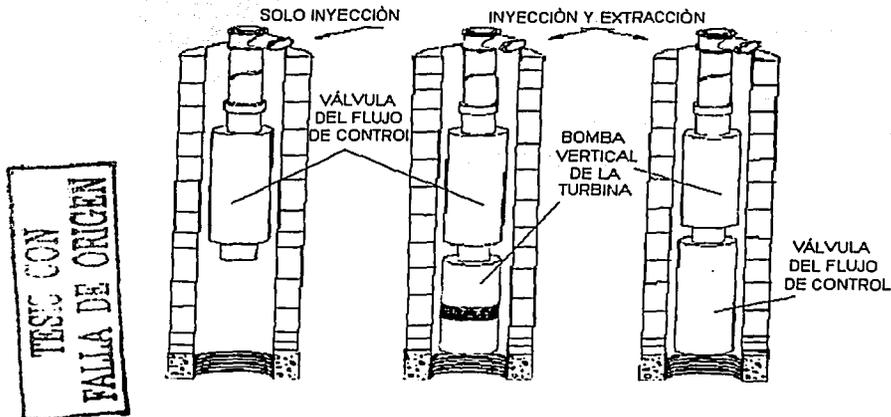
Otra característica importante son los filtros usados en los pozos, ya que dependerá de la zona de recarga, en éste caso la permeabilidad es un parámetro muy importante en el dimensionamiento de los diámetros de los pozos, así como el caudal a inyectar, dado que si el terreno es impermeable será difícil la introducción del agua de recarga, mientras que si es demasiado permeable la recarga será más sencilla.

Figura 3.51 Componentes de los pozos de inyección y extracción



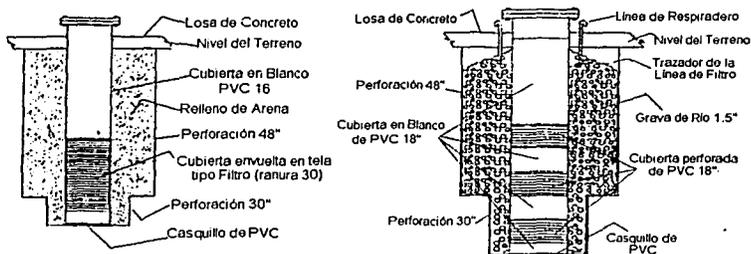
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.52 Corte de pozos de inyección y succión



En la figura 3.53 se muestran diversos tipos de filtros que son aplicables en el pozo de inyección, además de que se muestran los diámetros propuestos y la variedad de materiales que los conforman.

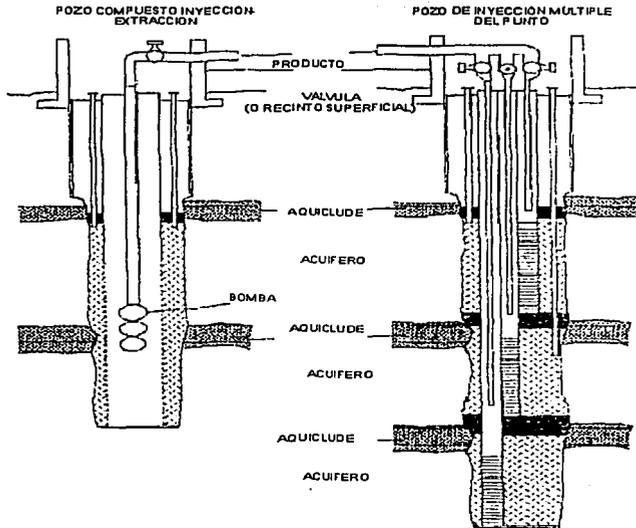
Figura 3.53 Componentes del pozo de inyección



La profundidad es otro factor importante en el diseño, dado que dependerá de los diversos estratos presentes en la zona de recarga, así como de los niveles estáticos existentes, en ocasiones se contarán con estratos impermeables cerca

de la superficie y habría que evitarlos, es por ésta razón que hay que realizar un buen estudio geológico para determinar todas éstas condiciones del terreno. Éstos inconvenientes repercuten en la necesidad de una mayor potencia de la bomba, en figura 3.54 se muestra un pozo con inyección a distintas profundidades.

Figura 3.54 Profundidad de los pozos de Inyección.

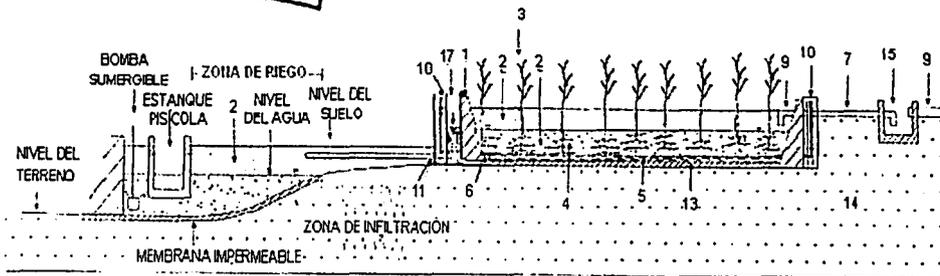


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Si nos referimos a la presa de infiltración, ésta presenta cuatro áreas: la primera, la entrada de las aguas de escurrimiento de las laderas montañosas, en el área se construye una trampa para residuos sólidos; la segunda área, es el sistema de amortiguamiento y purificación natural basado en plantas macrofíticas, conocido como "wetlands"; la tercera, es la zona de recarga al acuífero, y la cuarta, es el área de recuperación económica del sistema, formada por una zona

Figura 3.55 Esquema de una presa de infiltración

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



1. DIQUE DEL EMBALSE
2. MEDIO FILTRANTE GRAVA, ARCILLA, ARENA
3. PLANTAS ACUÁTICAS SUPERIORES
4. RIZOMAS DE LAS RAICES
5. DRENAJE, TUBERIA DE PVC RANURADA EN LA SUPERFICIE
6. COLECTOR DE AGUAS DE DRENAJE CONECTADO A 5
7. TUBERIA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
8. DISPOSITIVO REGULADOR DEL NIVEL DE AGUA DE SALIDA
9. ENTRADA DE AGUA SUCIA

10. PIEZÓMETRO
11. SALIDA DE AGUA PURIFICADA
12. COLECTOR DE AGUA PURIFICADA
13. MEMBRANA IMPERMEABLE
14. SUSTRATO ORIGINAL.
15. TRAMPA DE SÓLIDOS
16. CONDUCTOR DE FLUJO DE SALIDA CONECTADO A 6
17. DEPÓSITO DE AGUA PURIFICADA

### 3.10 APLICACIONES DEL MÉTODO DE RECARGA ARTIFICIAL

En el Valle de México se ha incrementado la aplicación del uso de los pozos de recarga para recuperación de los acuíferos existentes, tanto del Valle de México, Texcoco y Valle de Chalco, así como la reducción de los descensos piezométricos y hundimientos diferenciales, mientras que en las zonas costeras se usan para la disminución de la intrusión salina.

Dado que en el Valle de México existe una gran cantidad de plantas de tratamiento, se han propuesto varias alternativas para el aprovechamiento de las aguas tratadas por éstas, entre las cuales destacan la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella donde son utilizables 1000 l/s para recarga, distribuidos en 9 pozos de recarga alrededor de la Sierra de Santa Catarina, o la Planta de Ciudad Deportiva que aporta 5 l/s a un pozo cercano.

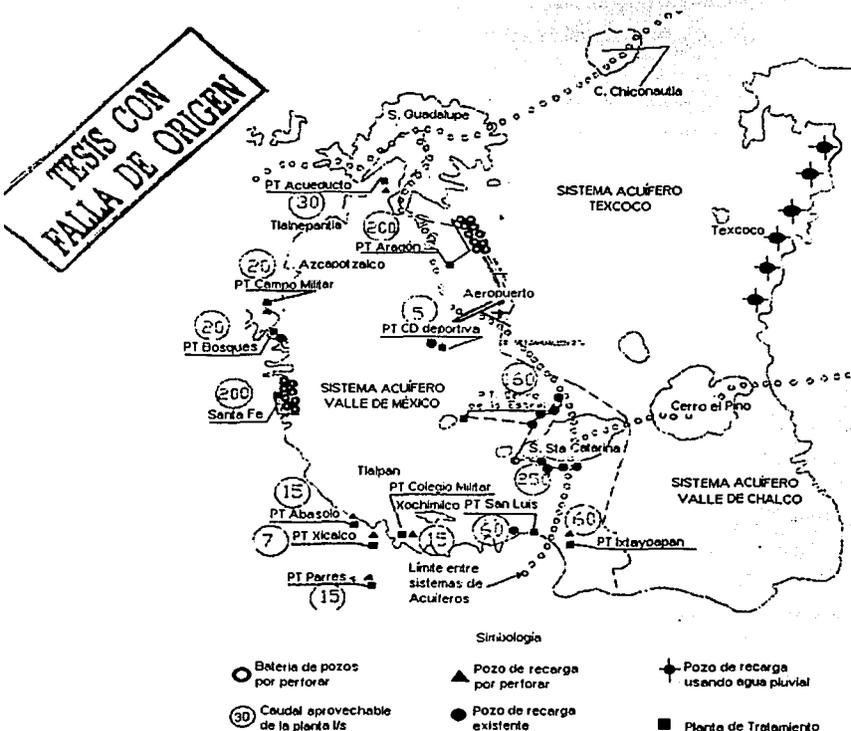
También existen pozos cerca de la planta de San Luis Tlaxiatemalco cerca de Xochimilco, además de existir varios proyectos para la perforación de baterías de 10 pozos en el área de Aragón, cuyo caudal de recarga cercano a los 200 l/s serán proporcionado por la planta de tratamiento de la zona, y otro en la zona de Santa Fe, con un conjunto de 8 pozos recargados con un caudal aproximado de 200 l/s provenientes de la planta de Santa Fe.

Habría que mencionar que dado que la necesidad de inyección de aguas tratadas se ha incrementado en los últimos años se tienen proyectos de pozos aislados cercanos a las plantas de tratamiento de Campo Militar, Bosques, Colegio Militar, Abasolo, Parres, Ixtlayoapan y Acueducto entre otros, lamentablemente las políticas de operación y los grandes costos de construcción hacen cada día más difícil la construcción de ellos.

Otra de las alternativas aplicables a los pozos de inyección es, el uso de agua pluvial, donde es necesario zonas especiales de captación del agua, pero con un inconveniente significativo que en el Valle de México únicamente se tienen

4 meses de lluvia durante el año, eso significa que si los pozos no están bien acondicionados se tendrían que mantener sin uso el resto del año, causando con ello grandes pérdidas, en la figura 3.56 se muestran la localización de proyecto de los pozos antes mencionados.

Figura 3.56 Localización de pozos usando agua tratada.



Otro de los proyectos que se tienen contemplados es que se plantea la posibilidad de infiltrar en los cuatro ríos de la ciudad, estamos hablando San

Bernabé, San Borja, Desierto de los Leones, Río Mixcoac. Estos cuatro ríos fundamentales representan cerca de 2.7 m<sup>3</sup>/s y actualmente estos ríos se combinan con el drenaje y se van al drenaje profundo. Se podría darle un uso y posteriormente infiltrarlos al acuífero y no introducirlos al drenaje profundo, estarían disminuyendo los impactos. Por un lado, permitiendo la infiltración a mantos acuíferos de agua superficial, prácticamente limpia y, por otro lado, disminuyendo el impacto en el drenaje profundo. De tal manera que disminuiríamos la cantidad de agua que tiene que desahogarse de la ciudad.

Las zonas de posible factibilidad para la construcción de las presas de infiltración de acuerdo a las características meteorológicas pueden ser la región de Tlalpan y Contreras, donde se presentan los máximos valores de precipitación y lluvia máxima en 24 horas, la región de Tláhuac con valores intermedios, o bien la zona Norte o Noreste con los valores más bajos, aunque, también son posibles de captarlos.

Con el estudio realizado, se propone construir un módulo experimental de pruebas para selección de los parámetros operativos de presas de infiltración en el Valle de México, atendiendo a aspectos como: selección de especie de macrófitas para purificación natural de aguas; estudios granulométricos para la selección de material de relleno en presas de infiltración; medición de propiedades de flujo dentro de presas de infiltración; selección de especies piscícolas para estanques de presas de infiltración, y desarrollo de experimentos para conocer la funcionalidad de presas de infiltración en la eliminación de residuos orgánicos.

### *3.10.1 Proyectos Realizados en el Valle de México.*

#### Proyecto Uno "Recarga Artificial del Pozo SC-6".<sup>4</sup>

La recarga artificial al acuífero presenta beneficios, como la disminución de hundimientos del terreno y el almacenamiento del agua para usos futuros, sin embargo, la recarga artificial con aguas tratadas implica riesgos que deben ser

<sup>4</sup> Recarga Artificial en el Pozo SC- 6 Anexos uno y dos, Lesser y Asociados S.A. 1995.

estudiados a fin de no causar efectos nocivos al acuífero. Por otra parte, la inyección del agua al subsuelo produce el taponamiento o colmatación de los pozos, problema que debe evitarse para que la recarga sea eficiente.

#### *Localización del pozo.*

El PC-6 se localiza en el flanco Suroeste de la Sierra de Santa Catarina, a 500 m al Norte de la Calzada México-Tulyehualco y sobre la línea de conducción de aguas tratadas procedente de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella. En el que se llevaron a cabo diversas actividades como son:

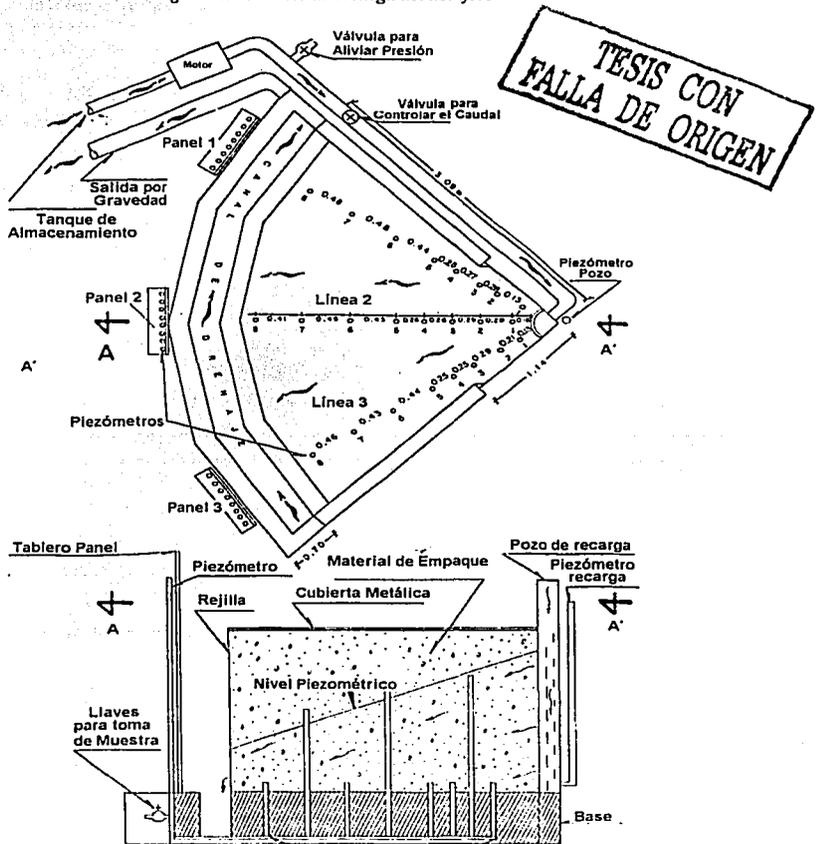
- Y Obtención de las características del Pozo SC-6, el cual se destinará para recarga, así como la química del agua tanto del acuífero como la que se utilizará para la recarga.
- Y Se construyeron pozos de monitoreo para detectar los posibles cambios en la química y piezometría del acuífero como respuesta a la inyección.
- Y Se elaboró un diseño constructivo de ingeniería de detalle, del tren de tratamiento terciario, adecuado para el agua previa a la recarga.
- Y Construcción de un tren de tratamiento a pie del PC-6, tendiente a adecuar el agua de recarga proveniente del agua de tratamiento del Cerro de la Estrella, a fin de que ésta presente una calidad apropiada antes de ser recargada al acuífero.
- Y Se operó el módulo experimental de recarga artificial y las columnas de colmatación, obteniéndose mediciones piezométricas y de calidad del agua, lo cual se procesó a fin de determinar la variación de dichos parámetros y determinar el grado de colmatación en el entorno de un pozo.

#### *Módulo de recarga.*

Tiene por objeto simular la recarga artificial en el tramo de un pozo de 1 m de longitud, rodeado por medio granular de características conocidas. El tubo que simula el pozo de recarga tiene un metro de longitud y consiste en un ademe ranurado. El módulo tiene aproximadamente un metro de altura; se encuentra relleno de un material areno-arcilloso y cubierto por tapas metálicas a fin de poder

trabajar a presión. Dentro del módulo se colocaron tres líneas de 8 piezómetros cada una de ellas, los cuales están ubicados a tres tubos ubicados en igual número de paneles localizados fuera del módulo y frente a cada una de las líneas de piezómetros. En la figura 3.57 se muestran sus principales características.

Figura 3.57 Modelo de recarga del acuífero



Los resultados de la piezometría con un caudal medio de inyección de 1.65 l/s, teniendo una pérdida de carga en su paso por el medio granular de 16.26 cm, con lo que se deduce una transmisibilidad del material de empaque de  $28.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Al finalizar la prueba el caudal de inyección había disminuido a 0.87 l/s; o sea, un 47% menos que al inicio. La transmisibilidad del medio disminuyó un 47% y su capacidad de infiltración disminuyó un 75% para presentar un valor de  $7.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

De lo anterior se concluye que en 100 días que operó el módulo, éste se colmató en un 75% y disminuyó su capacidad de infiltración en un 47%. El módulo de recarga funciona como un filtro para ciertos parámetros como el color y turbidez, los que disminuyeron su concentración. Esta propiedad va decayendo con respecto al tiempo, por lo que se requiere de un lavado periódico del material en el entorno del pozo, lo que significa que durante la recarga artificial será necesario utilizar maniobras que restablezcan las condiciones originales del medio.

Con la recarga se generó en el entorno del pozo de experimentación, la proliferación de materia orgánica, así lo indica el incremento en nitratos y DBO. Sin embargo, esto es debido a la oxigenación y las características del módulo, que discrepan de la realidad.

#### *Columnas de colmatación.*

Tienen por objeto determinar la velocidad de la colmatación en diferentes materiales granulares. Se observó una pérdida de carga, esto indica la colmatación de las columnas y variaron de acuerdo a la granulometría del material de empaque.

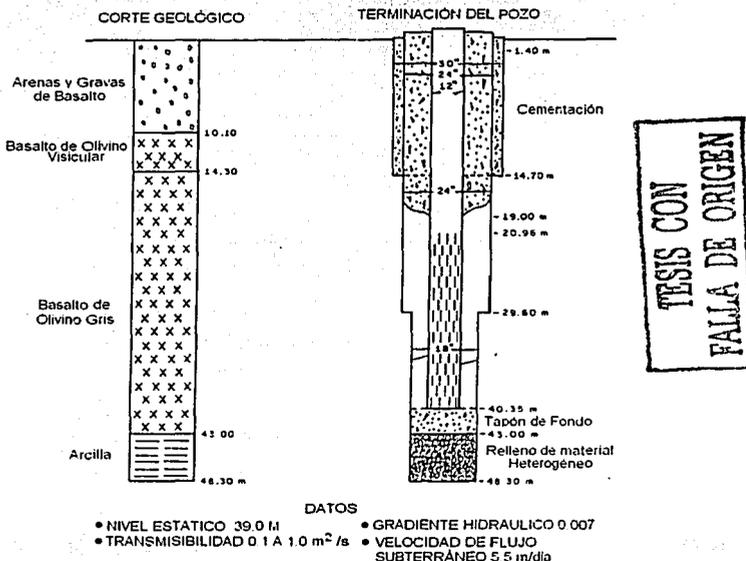
Los principales problemas de la inyección de agua al acuífero, es que los pozos a través de los cuales se lleva a cabo la recarga, se pueden taponar a corto plazo. Este proyecto tiene por objeto iniciar los trabajos para conocer el tipo y la velocidad del taponamiento, producido al acuífero mediante la recarga para a

partir de ello diseñar métodos de limpieza de los pozos. Por otra parte el agua tratada de la Planta Cerro de la Estrella, no cumple con los con los requisitos de calidad.

**Geología y Geohidrología.**

El suelo consiste de una alternancia de cenizas volcánicas, arenas, arcillas, piroclásticas y basaltos. Durante su perforación se cortaron arenas y gravas de 0 a 10 m; basaltos de 10 a 43 m y arcillas de 43 a 48.3 m. Como se muestra en la figura 3.58.

**Figura 3.58 Características estructurales del pozo SC-6.**



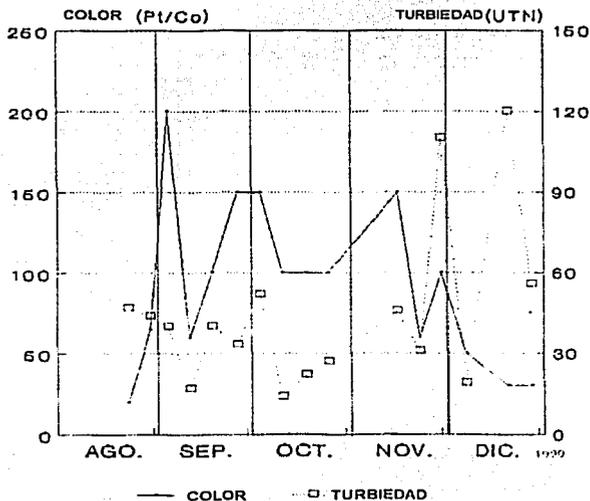
El acuífero tiene una transmisibilidad alta, oscila entre 0.1 y 1.0 m<sup>2</sup>/s. El gradiente hidráulico en esta zona es reducido, de 0.007 lo cual hace que la

circulación del agua subterránea sea del orden 5.9 m/día. El agua se encuentra a una profundidad de 39 m. El flujo subterráneo circula en dirección Norte-Sur.

El agua del acuífero se caracteriza por ser de mala calidad. En la gráfica de la figura 3.59, se muestra la gráfica proporcionada por los laboratorios de calidad de los parámetros de color y turbidez respecto al tiempo.

Figura 3.59 Características del pozo SC-6 Color-Turbiedad

### CARACTERISTICAS DEL POZO SC-6 COLOR Y TURBIEDEZ



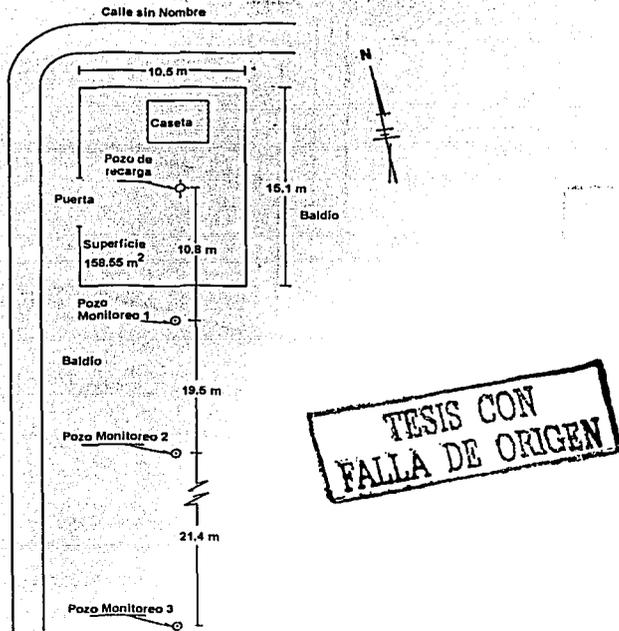
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para la recarga se utilizó agua tratada procedente de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella, la cual tiene un tratamiento final previo a la inyección. Se cuenta con una prueba de bombeo en el pozo SC-7 ubicada a 1,410 m al Oriente del pozo PC-6, en la que se obtuvo una transmisibilidad de  $958 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. El caudal de bombeo de los pozos emplazados en esta zona es de 40 a 70

l/s y el caudal específico del pozo SC-6, fue de 80 l/s/m de abatimiento. De lo anterior se deduce que el pozo SC-6 podría aceptar un caudal de 50 l/s.

Con el objeto de contar con puntos de observación tanto de la piezometría del acuífero como de la calidad del agua subterránea antes y durante la recarga, se construyeron tres pozos de monitoreo junto al pozo de SC-6. En la figura 3.60 se muestra la localización tanto del pozo de recarga SC-6, como de los pozos de monitoreo, los cuales se ubican a 10, 30 y 50 m de distancia del pozo de recarga y en dirección al Sur, ya que el flujo subterráneo se establece del Norte hacia el Sur.

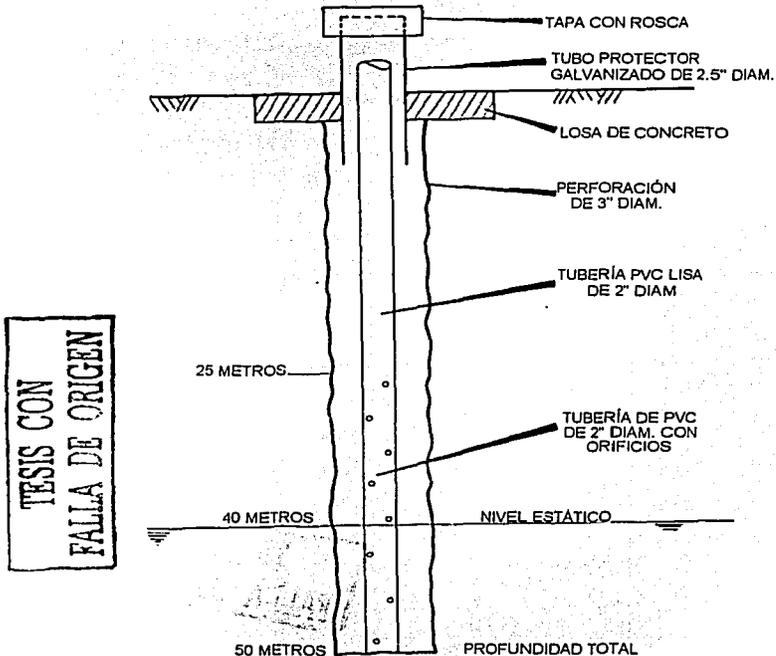
Figura 3.60 Localización de pozos de monitoreo.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se construyeron los pozos de monitoreo con un diámetro de 3" y a una profundidad de 50 m. Fueron ademados con tubería PVC hidráulica de 2" de diámetro, lisa de 0 a 25 m y ranurada de 25 a 50 m de profundidad. En la figura 3.61 se muestra el corte de terminación de los pozos de monitoreo.

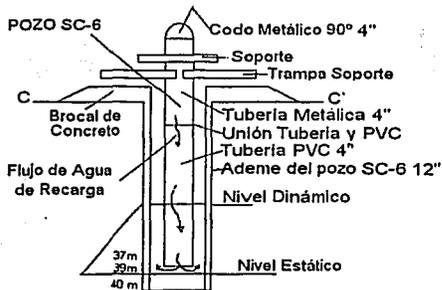
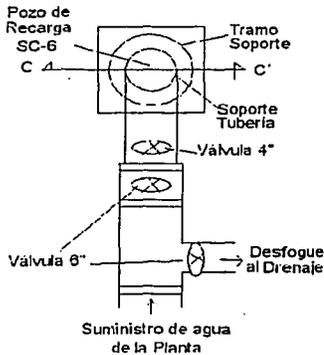
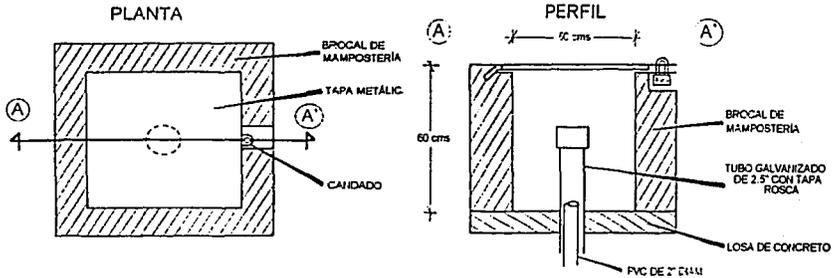
Figura 3.61 Corte de terminación de los pozos de monitoreo



A la terminación de cada pozo, se les colocó una tubería con una tapa de rosca de material galvanizado de 3" de diámetro. Además, se les construyó un brocal de mampostería con tapa metálica, todo ello para preparación del pozo, como se

muestra en la figura 3.62. En las figuras 3.63 y 3.64 se incluyen secciones Norte-Sur que ilustran la posición de los pozos y el probable funcionamiento del acuífero al realizar la recarga.

Figura 3.62 Brocal del pozo de monitoreo



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.63 Sección mostrando los pozos de monitoreo y recarga.

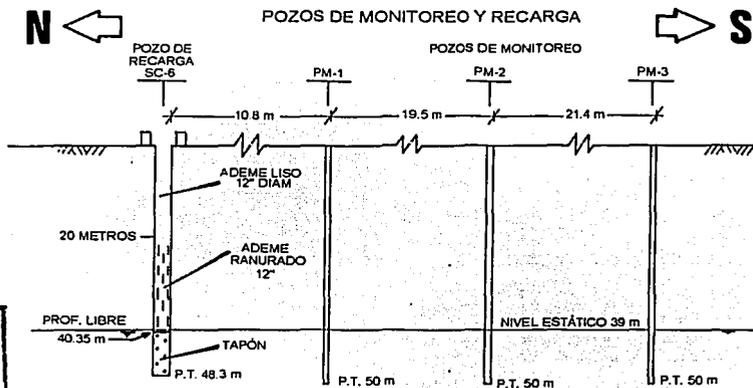
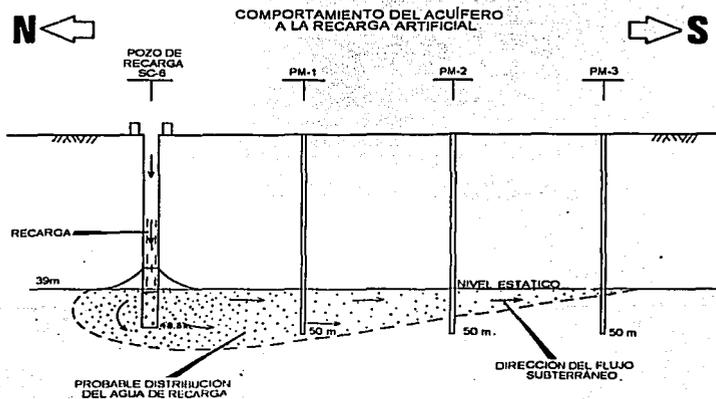


Figura 3.64 Comportamiento del acuífero a la recarga artificial.



TESIS C.I.T.  
 FALLA DE ORIGEN

Se inició la operación del módulo con un caudal (Q) de inyección de alrededor de 1.6 l/s; (Q) se encuentra en una relación directa con la presión de entrada (H), la cual sufrió una variación constante debida a la profundidad del tanque de almacenamiento.

Las condiciones iniciales, indicaron un caudal medio de inyección de 1.65 l/s, con una pérdida de carga en el paso por el medio granular del módulo, de 16.16 cm, con lo que se deduce una transmisibilidad del material de empaque de  $28.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Al finalizar la prueba, el caudal de inyección disminuyó a 0.87 l/s, y la pérdida de carga aumentó a 32.33 cm. De igual manera la transmisibilidad del medio disminuyó a un valor de  $7.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

De lo anterior se concluye que en 10 días que operó el módulo, éste se colmató en un 75% y disminuyó su capacidad de infiltración en un 47%. En la figura 3.65 se resumen los resultados obtenidos en 100 días de experimentación.

Figura 3.65 Comportamiento de la prueba de inyección

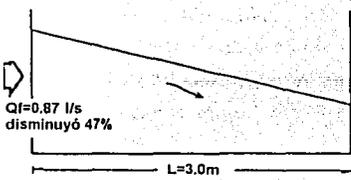
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



$\Delta h_0 = 16.26 \text{ cms}$   
 $T = 28.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

— E X P L I C A C I O N —

- $Q_0$  = CAUDAL DE INYECCION INICIAL
- $Q_f$  = CAUDAL DE INYECCION FINAL
- $\Delta h$  = PERDIDA DE CARGA
- T = TRANSMISIBILIDAD
- L = DURACION DE LA PRUEBA = 100 DIAS
- b = SECCION DE FLUJO = 1 m
- L = GRADIENTE
- L = LONGITUD DEL MODULO
- PRESION DE INYECCION CONSTANTE = 81.3 cms.



$\Delta h_f = 32.33 \text{ cms}$   
 $T = 7.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$   
 disminuyó 75%

$$Q = T b L \frac{\Delta h}{L}$$

$$Q = \frac{T b \Delta h}{L}$$

$$T = \frac{Q L}{\Delta h b}$$

### *Resultados de la calidad del agua.*

El módulo de recarga funciona como un filtro para ciertos parámetros como el color y la turbiedad, Sin embargo, esta propiedad va decayendo con respecto al tiempo por lo que se requiere de un lavado periódico del material areno-arcillosos de empaque del módulo, lo que significa que durante la recarga artificial se requerirá efectuar maniobras que restablezcan las condiciones originales del medio.

Con el tiempo, la capacidad del medio alrededor del pozo se satura, disminuyendo su capacidad de retención o adsorción, lo que provoca colmatación alrededor del pozo. La recarga de agua produce crecimiento de materia orgánica lo que es una de las principales causas de la colmatación alrededor del pozo.

### *Limpieza del módulo.*

Para restituir la capacidad de adsorción del medio acuífero, se procedió a efectuar una limpieza del entorno del pozo, la cual consistió en un pistoneo. Posteriormente se operó el modulo en donde se observó que se produjo una recuperación del 90%.

### Proyecto Dos "Determinación de la Sobreexplotación Acuífera a través del Balance Hidrológico"<sup>5</sup>

El balance Hidrológico es una de las herramientas básicas usadas en el proceso de la recarga artificial debido a que nos proporciona de manera porcentual el grado de explotación del acuífero, es por ésta razón que se presentará la determinación de la sobreexplotación acuífera del Valle de México, éste acuífero el cual se ha dividido en tres subsistemas Valle de México, Chalco, y Texcoco, esta división se trazo debido a las redes de flujo, de donde se marcó un parteaguas subterráneo que va de la Sierra de Santa Catarina con dirección al

---

<sup>5</sup> Sinopsis de la Piezometría del Valle de México 2000. Lesser y Asociados S. A. de C. V. 2000.

Noreste, pasando por el Aeropuerto Internacional, y siguiendo rumbo hacia el Norte con dirección hacia la Sierra de Guadalupe, la división entre el Valle de México y Chalco presenta un parteaguas a la altura de San Pedro de los Pinos, es necesario que para calcular el balance hidrológico se conozca la diferencia entre las entradas y salidas, conocido como cambio de almacenamiento.

La ecuación general de balance de agua subterránea se establece como la relación existente entre las entradas al sistema con respecto a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Cambio de Almacenamiento}$$

Donde:

Entradas	Entradas por Flujo Subterráneo (Es). Drenado vertical de las arcillas superiores (Iv).
Salidas	Extracción por Bombeo (Ext)
Cambio de Almacenamiento	Abatimiento producido por la sobreexplotación (As).

Resultando que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$Es + Iv = Ext + As$$

Para el cálculo del Balance hidrológico es necesario dividir en celdas el área y de estudio, para ello se dividió el subsistema del Valle de México en 16 celdas, el Subsistema de Texcoco en 11 celdas y el subsistema de Chalco en 8 celdas, las cuales han sido mostradas en la figura 3.50, de ésta figura se obtiene el ancho y la longitud de cada una de éstas celdas.

#### *Entradas.*

A continuación se describirá el procedimiento de obtención de las entradas, éstas corresponden a la infiltración natural, que para este caso es nula debido a que la mancha urbana impide la infiltración, además de que se presentan arcillas lacustres, las cuales imposibilitan dicha acción, mientras que las entradas

subterráneas son provenientes de estivaciones del acuífero. El flujo subterráneo se calculó usando la Ley de Darcy, en donde es necesario el conocimiento del gradiente hidráulico, y la transmisibilidad, generándose los caudales que se presentan en los siguientes cuadros respectivos para cada subsistema.

**Cuadro 3.11 Cálculo del flujo subterráneo para el subsistema Ciudad de México.**

Celda	Ancho (L)	Ancho (b)	Gradiente Hidráulico (I)	Transmisibilidad (T)	Caudal Q=TbI	Volumen
	km	km	$1 \times 10^{-3}$	$m^2/s$	$m^3/s$	$m^3/año$
A1	0.900	6.400	5.550	0.005	0.178	5.601E+06
A2	0.600	11.700	8.330	0.005	0.487	1.537E+07
A3	0.600	9.200	8.300	0.006	0.458	1.445E+07
A4	0.800	6.250	12.500	0.006	0.469	1.478E+07
A5	0.700	7.700	14.280	0.006	0.660	2.081E+07
A6	0.500	7.800	20.000	0.006	0.936	2.952E+07
A7	0.400	1.700	25.000	0.003	0.128	4.021E+06
A8	0.370	6.250	27.020	0.011	1.858	5.858E+07
A9	0.400	6.600	25.000	0.011	1.815	5.724E+07
A10	0.800	1.500	6.250	0.007	0.066	2.070E+06
A11	0.550	6.500	18.200	0.008	0.946	2.985E+07
A12	0.600	4.700	16.660	0.008	0.626	1.975E+07
A13	0.950	3.500	10.500	0.008	0.294	9.272E+06
A14	1.100	5.500	4.540	0.006	0.150	4.725E+06
A15	0.500	4.250	10.000	0.005	0.213	6.701E+06
A16	0.600	3.000	8.330	0.005	0.125	3.940E+06
					<b>SUMA</b>	<b>2.967E+08</b>

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

**Cuadro 3.12 Cálculo del flujo subterráneo del subsistema Valle de Chalco.**

Celda	Ancho (L)	Ancho (b)	Gradiente Hidráulico (I)	Transmisibilidad (T)	Caudal Q=TbI	Volumen
	km	km	$1 \times 10^{-3}$	$m^2/s$	$m^3/s$	$m^3/año$
B1	0.700	4.200	14.280	0.011	0.660	2.081E+07
B2	2.166	1.800	4.600	0.010	0.083	2.611E+06
B3	1.000	8.800	10.000	0.010	0.880	2.775E+07
B4	0.900	6.000	11.110	0.009	0.600	1.892E+07
B5	1.000	10.000	10.000	0.004	0.400	1.261E+07
B6	0.500	12.800	20.000	0.004	1.024	3.229E+07
B7	0.500	6.400	20.000	0.005	0.640	2.018E+07
B8	0.700	6.700	14.280	0.008	0.765	2.414E+07
					<b>SUMA</b>	<b>1.593E+08</b>

Cuadro 3.13 Cálculo del flujo subterráneo del subsistema Texcoco.

Celda	Ancho (L)	Ancho (b)	Gradiente Hidráulico (i)	Transmisibilidad (T)	Caudal Q=Tbi	Volumen
	km	km	$1 \times 10^{-3}$	$m^2/s$	$m^3/s$	$m^3/año$
C1	0.800	4.700	6.258	0.006	0.176	5.565E+06
C2	1.100	5.500	4.540	0.006	0.150	4.725E+06
C3	0.880	5.500	11.360	0.007	0.437	1.379E+07
C4	0.450	7.500	22.220	0.004	0.667	2.102E+07
C5	0.500	7.700	20.000	0.004	0.616	1.943E+07
C6	0.600	5.800	16.660	0.004	0.387	1.219E+07
C7	0.600	7.700	16.660	0.004	0.513	1.618E+07
C8	0.680	12.500	14.700	0.006	1.103	3.477E+07
C9	0.800	7.700	12.500	0.006	0.578	1.821E+07
C10	1.500	4.300	6.660	0.006	0.172	5.419E+06
C11	0.600	7.200	16.660	0.007	0.840	2.648E+07
					<b>SUMA</b>	<b>1.778E+08</b>

Se observa que la transmisibilidad es muy variable, en el Valle de México oscilan los valores entre 0.003 y 0.011  $m^2/s$ , mientras que el Chalco oscilan entre 0.004 y 0.011  $m^2/s$ , y finalmente en Texcoco van de 0.004 a 0.007  $m^2/s$ .

En lo que respecta al gradiente hidráulico, éste presenta una variación en el Valle de México de 0.0045 a 0.027, Chalco va de 0.0046 a 0.020, finalmente Texcoco varía de 0.0045 a 0.022.

El caudal de entrada que pasa por cada una de las celdas, es el que corresponde al flujo subterráneo de entrada a dicha celda y se presenta también de manera anual.

#### Salidas

La principal salida de los tres subsistemas es por la extracción, dichas cifras se obtienen principalmente de las lecturas y los caudales de extracción de todos los pozos con los que se cuenta para ésta actividad presentándose los resultados en el cuadro 3.14, hay que mencionar que la red de pozos del Valle de México cuentan con registros actualizados, aunque en la zona existen pozos particulares los cuales es necesario registrar para tener un mejor resultado en el balance.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cuadro 3.14 Extracciones en los subsistemas

Subsistema Acuífero	Mm <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /s
Valle de México	370	11.73
Texcoco	272	8.63
Valle de Chalco	190	6.03

**Cambio de Almacenamiento.**

La variación de almacenamiento se calculó multiplicando el volumen de la evolución del nivel estático, por el coeficiente de almacenamiento de cada una de las zonas que van desde 0.003 a 0.07, los resultados se muestran en el cuadro

15.

Cuadro 3.15 Cambio de almacenamiento para los Subsistemas

Subsistema Acuífero	Mm <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /s
Valle de México	-17.3	-0.55
Texcoco	-16.51	-0.52
Valle de Chalco	-12.32	-0.39

**Drenado Vertical**

De la ecuación general de balance se tiene que las entradas (entradas de flujo subterráneo mas drenado vertical) son iguales a las salidas (salida por bombeo) menos el cambio de almacenamiento, una vez que se han sustituido todos los valores mostrados anteriormente en la ecuación antes dicha, se despeja el drenado vertical, para obtener los valores siguientes mostrados en el cuadro 3.16.

Cuadro 3.16 Drenado Vertical para los Subsistemas

Subsistema Acuífero	Mm <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /s
Valle de México	56.09	1.78
Texcoco	77.75	2.56
Valle de Chalco	18.4	0.58

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Sobreexplotación Acuífera.**

Si se consideramos que la sobreexplotación del acuífero corresponde al cambio de almacenamiento y al drenado de las arcillas, éste volumen dividido entre la recarga de flujo subterráneo proporciona el porcentaje de explotación acuífero a que se encuentra sujeto, los resultados son mostrados en el cuadro 3.17.

**Cuadro 3.17 Porcentaje de sobreexplotación para los Subsistemas**

Subsistema Acuífero	Porcentaje de Sobreexplotación
Valle de México	25
Texcoco	53
Valle de Chalco	19

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

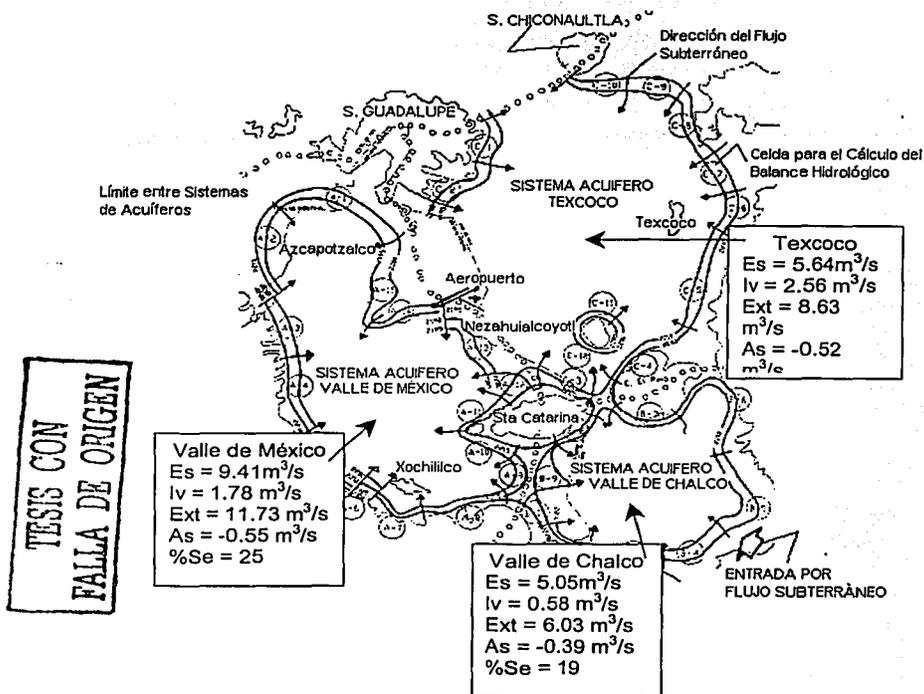
En el cuadro 3.18 se presenta un resumen de los cálculos obtenidos en el Balance hidrológico del acuífero del Valle de México y de los subsistemas Valle de México, Valla de Chalco y Texcoco, así como el porcentaje de sobreexplotación en cada una de éstas zonas.

**Cuadro 3.18 Cuadro resumen del Balance Hidrológico**

Subsistema Acuífero	Entradas	Drenado Vertical	Salidas	Cambio de Almacenamiento	Porcentaje de Explotación
	Es m <sup>3</sup> /s	IV m <sup>3</sup> /s	Ext m <sup>3</sup> /s	As m <sup>3</sup> /s	%Se %
Valle de México	9.41	1.78	11.73	-0.55	25
Texcoco	5.64	2.56	8.63	-0.52	53
Valle de Chalco	5.05	0.58	6.03	-0.39	19

En la figura 3.66, se muestran los tres subsistemas acuíferos que forman el acuífero Valle de México, y se presentan todos los resultados antes obtenidos.

Figura 3.66 Sobreexplotación acuífera a través del Balance Hidrológico



Proyecto Tres. "Módulo Experimental de Recarga de Acuíferos en el Ex-Lago de Texcoco".<sup>6</sup>

El proyecto consiste en la recarga con agua renovada de los acuíferos profundos (70 a 200 m) del Ex-Lago de Texcoco. En donde se perforaron tres

<sup>6</sup> Memorias VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, SMISA. A.C. 1995.

pozos a 200 m. Estos se realizaron en tres etapas y luego de ellos se procedió a aforarlos y limpiarlos. La limpieza se llevó en dos pozos.

Para control de los pozos se instalaron, ocho piezómetros a 80 m de profundidad y uno a 120 m, así como uno rasurado a 12 m, lo que permite conocer las presiones en el agua a dichas profundidades. Además se colocaron otros dos piezómetros a 80 m.

#### *Estratigrafía preliminar.*

En el sitio de recarga se presenta la siguiente estratigrafía, de acuerdo a la profundidad.

Tipo de Suelo	Profundidad m
Arcilla	0 - 30
Primera Capa Dura	30 - 40
Arcilla	40 - 60
Asegunda Capa Dura	60 - 68
Depósitos Profundos	68 - 200

#### *Pozos.*

Se construyeron tres pozos iguales (RA1, RA2 y RA3) y semejantes a los realizados en la zona federal. Los pozos se encuentran adomados hasta 70 m con tubería ciega. De esta profundidad hasta el fin del pozo se llevó una tubería ranurada de 10" de diámetro; cabe mencionar, que dos pozos eran para observación y el tercero para recarga.

#### *Niveles de Permeabilidades y de Transmisibilidad.*

El nivel de agua freática en la zona se localiza entre 0.6 y 1.19 m, en tanto que los niveles estáticos en los pozos se detectaron entre los 23 y 29 m en promedio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En cuanto a las permeabilidades, se realizaron pruebas, tanto de laboratorio como de campo y se obtuvo una variación promedio entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$  cm/s. El estudio de transmisibilidad del acuífero no fue concluyente por diversos motivos, se puede decir que: la velocidad de flujo del acuífero es reducida, no existe conexión entre pozos o la dirección del pozo es otra que la prevista.

#### *Piezometría.*

Del estudio de los resultados arrojados por los piezómetros instalados en la zona, se observa que presentan niveles piezométricos localizados entre los 20 y 23 m de profundidad. El tubo ranurado instalado a 12 m de profundidad presenta el nivel de agua freática a un metro.

#### *Pruebas de inyección.*

Se realizó con la finalidad de conocer cual es la capacidad de infiltración de dichos pozos; para lo cual se usaron 3 pipas de 10,000 litros de capacidad cada una. La primer prueba se realizó a un nivel de 23.30 m, utilizando una pipa con una descarga de 4" de diámetro, la cual se desalojó toda en 10 minutos. La segunda prueba con un nivel estático de 23 m, utilizándose las tres pipas, que en conjunción hacían una descarga de 10" de diámetro (4+4+2). Esto ocasionó que el pozo se llenará a los 7 minutos, por lo que se redujo el área de descarga dejándolo en 6" de diámetro, manteniéndose el nivel del agua a los 15 m. Se término de vaciar la pipa a los 28 minutos.

Con esto se obtuvo un gasto de infiltración de 20 l/s. Este gasto deberá tender a disminuir con la operación continua debida a la sobresaturación de los estratos y al taponamiento de las tuberías.

#### *Conclusiones.*

Debido a la falta de estudio geohidrológico preliminar, se han tenido varios errores que propician la carencia de datos.

Se desarrolló un modelo matemático que se utilizará cuando se conozca la calidad del agua por infiltrar, mismo que no se ha definido debido a que la zona que se pensaba extraer el agua para abastecer la planta de tratamiento terciario es de menor calidad que lo obtenido por la planta de lodos activados; por lo que será necesario continuar con el monitoreo para señalar el sitio exacto del efluente.

Debido a los diferentes trabajos desarrollados y a la poca información obtenida, es posible que se tenga que aumentar la carga hidráulica para poder infiltrar el agua de recarga y no vaciarla por gravedad ya que se han obtenido permeabilidades y velocidades muy bajas, además de los problemas de taponamiento y saturación del suelo.

Si se considera la estratigrafía determinada por el registro geofísico, indicando una secuencia de arenas y arcillas, y conociendo que la prueba de infiltración efectuada generó un gasto de 20 l/s para el proyecto.

Proyecto Cuatro. "Alteración de la interfase salina por pruebas de inyección en Yucatán".<sup>7</sup>

La inyección de aguas residuales en suelos kársticos es un problema manifiesto en la Ciudad de Mérida, la baja permeabilidad del suelo debajo de la interfase salina, por lo general no satisface el gasto de inyección requerido para este tipo disposición final de desechos. El acuífero de la Ciudad de Mérida, contiene una lente de agua dulce yaciendo sobre agua salina por diferencia de densidades, éste fenómeno conocido como intrusión marina es característico en los acuíferos costeros, ésta intrusión es una zona de mezcla que puede ser de unos metros a varios cientos de metros, y se presenta el contacto entre las dos masas de agua dulce y salada.

---

<sup>7</sup> Memorias VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, SMISA. A.C. 1997.

El estudio que se presenta tiene por objeto definir el comportamiento de la interfase salina en una región ubicada al Noreste de la Ciudad de Mérida, a una distancia aproximada de 36 km de la costa, comprende un área de 25 hectáreas y cuenta con una altura promedio de 6 msnm, en ésta zona se encuentran ubicados 4 pozos de absorción de 200 m de profundidad, separados a una distancia de 600 m uno del otro, cada uno de ellos cuenta con un pozo de observación de 75 m de profundidad situado a 30 m de su correspondiente pozo.

La temperatura media de la región oscila entre 21°C en enero y 28.5°C en junio, la evaporación y precipitación fueron del orden de 2,140 mm/año y 1,170 mm/año respectivamente, se ha clasificado a ésta región como sub-húmeda. La geología de la zona esta formada por sedimentos del Terciario del cual por debajo se encuentran depósitos del Cretácico, la litología predominante en la secuencia estratigráfica corresponde a la caliza con lechos internos de coquinas, y calizas margosas de altas porosidades secundarias y permeabilidades en los primeros 100 m y debajo de éstas se encuentran por lo general arcillas de baja o nula permeabilidad.

El nivel freático del acuífero varía en función de las estaciones de estiaje y precipitación alcanzando máximos de 70 cms. Estas fluctuaciones estacionales no se ven afectadas por efectos de bombeos regionales, ya que siguen un comportamiento similar al hidrograma patrón del año hidrológico y sus variaciones cíclicas estacionales.

El movimiento del flujo es hacia las costas siguiendo el patrón de fisuración de la costa Norte de la Península de Yucatán. La metodología de los límites y del comportamiento de la zona de mezcla en el acuífero, se realizó tomando muestras de pozos ubicados en el área de estudio a diferentes profundidades, determinándose en cada uno de ellos los parámetros físicos necesarios, para posteriormente analizarlos en el laboratorio.

Los pozos de adsorción (PD 1,2,3,4), están ademados sin ranurar hasta los 100 m, y libres los 100 m restantes, a cada pozo se le inyectaron diferentes caudales a 100 de profundidad durante 72 horas, sometidos a diferentes presiones, al finalizar cada prueba se dejaban 3 días antes de iniciar con el siguiente pozo.

A una distancia de 30 m se encuentra situado su correspondiente pozo de observación (PD: 1-A, 2-A, 3-A, 4-A), los cuales se encuentran ademados en toda su longitud. El muestreo se realizó a finales del periodo de estiaje hasta tres meses después de haberse iniciado la época de lluvias. El acuífero no presentaba ninguna variación ya sea por extracción inyección o recarga pluvial, cuando se muestrearon por primera vez dos pozos, se encontró que los potenciales eran iguales y que la variación de cloruros fue congruente.

En la práctica hay dos maneras de determinar la zona de transición de agua dulce y agua salada, la primera es por la medición directa del contenido de sales a diferentes profundidades a través de los pozos profundos que la penetren y la segunda es utilizando las teorías que la definen por medio de la medición del potencial con respecto a un nivel de referencia, pudiendo ser éste el nivel medio del mar o cualquier otro, según la teoría que se utilice.

Según se define la zona de mezcla y su espesor tomando el 5% y el 95% de la concentración de cloruros del agua del mar para los límites superiores e inferiores ya que no existe una interfase abrupta entre las aguas subterráneas agua dulce y agua salada, en el primero y en el último de los muestreos se determinó la posición de la interfase según las concentraciones de cloruros, se observó que la interfase se localiza por debajo del límite inferior de la zona de mezcla calculada por la concentración de cloruros (95% de la concentración de cloruros del agua del mar).

La zona de mezcla en el primer muestreo, cuando los potenciales eran iguales a 1.49 msnm no se encontró ninguna alteración, mostrándose la misma

concentración de cloruros a una misma profundidad para distintos pozos, sin embargo, los datos de los últimos muestreos 2 años después mostraron valores de igual potencial para todos los pozos de 1.79 msnm, eso implica que las concentraciones de cloruros no son iguales, mientras que los niveles piezométricos de los pozos, presentaron un descenso continuo propio de la zona de estiaje en los potenciales de agua dulce, de acuerdo a lo anterior se debería de reducir el vertido de agua dulce al mar y por lo tanto el lavado de sales en el acuífero, aumentando al mismo tiempo las concentraciones de éstas sales.

Las diferencias obtenidas durante el periodo de inyección, representan un descenso en los niveles, superiores en algunos casos al que se presentó en acuíferos someros, aún cuando no existía recarga en el acuífero por precipitación pluvial, se determinó que los cambios en la concentración de sales de varios pozos de observación debida el movimiento natural de la interfase salina por la acción de las mareas provoca descensos puntuales de los niveles estáticos, en dichos pozos, no congruentes con los pozos de observación cercanos que únicamente penetraban la zona de agua dulce.

Finalmente la baja permeabilidad a la profundidad en que se realizaron las inyecciones así como las condiciones a que se efectuaron las pruebas generaron una alteración que modificó el comportamiento de la interfase salina, esto se manifiesta por la variación de los niveles estáticos, temperatura y cloruros.

El comportamiento anormal de los cloruros se debe al cambio de presión en el medio subterráneo, provocado principalmente por la inyección de agua dulce en agua salada, la profundidad del límite entre el agua dulce y el agua salada de la zona de mezcla se definió para un rango de valores de 27.5 a 39 m, éste intervalo fue obtenido considerando las curvas de variación de los cloruros encontradas bajo condiciones de inalteración y alteración del acuífero, la profundidad del límite inferior se encuentra entre 55 y 66 m, de ésta forma el espesor de la zona de límite de mezcla tiene alrededor de 27 m.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS PARA SELECCIONAR LA TÉCNICA DE RECARGA**

#### **4.1 EVALUACIÓN TÉCNICA.**

En todo proyecto donde intervenga la ingeniería es necesario la determinación de la evaluación técnica, aún más conocido como estudio de factibilidad, en dicho estudio es necesario realizar comparaciones de los aspectos, requisitos y de las necesidades que intervengan en dicho proyecto como podrían ser, los recursos económicos, hidráulicos, sociales, políticos, así como la disponibilidad de terreno y de materiales con los que se cuenta para la realización del mismo.

La factibilidad no es más que un análisis de las condiciones existentes, y lo que se espera del proyecto de tal manera que se establezcan objetivos y metas, que se analicen para determinar si el proyecto las cumplirá total o parcialmente, ya que muchos de los proyectos de ingeniería, dependerán de estos cumplimientos, para su aprobación.

Antes de comenzar un proyecto de recarga de acuíferos es necesario tener contemplados todos los aspectos que intervienen directa o indirectamente en el proyecto de tal manera que se puedan aprovechar al máximo, éstos aspectos pueden llegar a ser determinantes en la selección del tipo de método de recarga a emplear, dado que; no sólo se trata de infiltrar el agua, sino que dependerá de aspectos y condiciones ya existentes en el terreno o en la zona a infiltrar.

Dentro de los principales aspectos que intervienen en la determinación del mejor método de recarga artificial se encuentra el tipo de suelo, las condiciones geológicas, áreas disponibles para el proyecto, y por supuesto el factor económico juega un papel muy importante.

Se considera principalmente que para la recarga artificial es necesario contar con fuentes de abastecimiento de agua de recarga, se podría partir de éste ámbito para comenzar a realizar el estudio de factibilidad; existen dos alternativas de abastecimiento de agua, el agua residual tratada y el agua pluvial, en donde en el último de los casos es necesario la construcción de depósitos de captación, lo cual incrementará directamente el costo del proyecto, de ahí que la alternativa más común en la Ciudad de México sea el uso de agua residual tratada.

El Valle de México se cuenta con una gran disponibilidad de aguas residuales, guiadas a través del drenaje profundo hasta desembocar al Golfo de México. De ésta forma se puede disponer de dichas aguas residuales para comenzar con trenes de tratamiento para una posterior utilización en proyectos de recarga artificial del acuífero del Valle de México, por el drenaje profundo son vertidos casi 60 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, de los cuales no todos llegan a su destino final, ya que en el trayecto existen distritos de riego, los cuales se abastecen de éstas aguas para las zonas de cultivo, siendo aproximadamente 45 m<sup>3</sup>/s los usados en ésta actividad, 14 m<sup>3</sup>/s son catalogados como aguas comprometidas las cuales tiene como función principal el riego de áreas verdes y llenado de canales, de los 31 m<sup>3</sup>/s restantes no pueden llegar a ser utilizados todo en su totalidad ya que es necesario que el drenaje profundo lleve agua en su recorrido para evitar sedimentación de sólidos, siendo destinada a ésta actividad el 70% restante, finalmente se contempla que el agua residual sin tratamiento que podría ser utilizada en la recarga tiene un gasto de tan sólo 8 m<sup>3</sup>/s, debido a las condiciones requeridas en toda recarga artificial es necesario que ésta agua cumpla un proceso de tratamiento previo a la recarga siendo, de ahí que solamente se contemplan 6 m<sup>3</sup>/s, con posibilidad de ser usada en la recarga artificial.

Otro aspecto de relevancia sería la disponibilidad de terreno para la determinación del mejor método, como se mencionó en el capítulo anterior existen tres tipos de métodos; superficiales, subterráneos y mixtos, donde básicamente en

los superficiales es necesario contar con grandes extensiones de terreno para la construcción de cualquiera de las técnicas mencionadas, por otro lado en los subterráneos es menor la cantidad de terreno que requieren de ahí que sean los más usados, y los mixtos requieren aún de un área considerable de terreno, en la Ciudad de México y dado a las características del suelo y de espacio se han usado los pozos de inyección, por el reducido espacio que requieren.

La infraestructura existente y la que posiblemente se construirá en un proyecto de recarga, tienen un papel muy importante dado que en la mayoría de las ocasiones no se cuenta con una planta de tratamiento cercana al punto de recarga, generando con ello un incremento en los costos de traslado del agua de recarga, no sólo del agua procedente de la planta de tratamiento, sino también es necesario considerar la construcción de la planta y si se cuenta con la suficiente cantidad de abastecimiento de agua residual, para el correcto funcionamiento de dicha planta.

Dentro de los aspectos de infraestructura que se consideran se encuentra que en todo proyecto de recarga es necesario la creación de pozos de observación los cuales deben de estar cercanos a la zona de recarga, éstos pozos deben de contar con las mismas especificaciones que el de recarga ya que de acuerdo a los resultados proporcionados por éstos, dependerá si se continúa con la recarga.

Los objetivos y metas que debe de cumplir el proyecto es fundamental para la realización del mismo de tal manera que sea atractivo técnicamente, es necesario que pueda cumplir las metas que se proyecten a corto, mediano y largo plazo, es por eso que una mala interpretación en los estudios o de los parámetros podría llevar a la cancelación del proyecto, como en el caso de la permeabilidad, en ocasiones se hacen estudios de mecánica de suelo, y una vez en campo se tienen otras condiciones distintas a las determinadas en laboratorio.

El monitoreo es un aspecto muy importante, ya que una vez que se toma la decisión de realizar la recarga, surgen varios aspectos que deben de ser controlados para una mejor obtención de resultados, la calidad del agua de recarga es muy importante controlarla y mantenerla de la misma forma ya que, el agua recargada de mala calidad repercute directamente en las condiciones a las que se encontraba el acuífero antes de ser recargado, el efluente de recarga será necesario controlarlo debido a las direcciones del flujo subterráneo, quizá un aumento en el efluente podría repercutir en un cambio brusco de la dirección o la afectación de estructuras cercanas, los niveles de agua subterránea, influyen directamente en los niveles piezométricos, así como un monitoreo constante de la capacidad de infiltración del terreno, de ésta forma se puede evitar la colmatación y con ello el bajo rendimiento de los pozos.

#### **4.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA.**

En todo proyecto la evaluación económica estará en función de los requerimientos y de los objetivos que se deseen cumplir, en el caso de la recarga artificial se comenzará con la disposición del terreno, en el caso de un método superficial éste requiere grandes extensiones, e influirá directamente en los costos, además de la construcción de obras que aumentarán el costo del proyecto, en éste caso los métodos profundos reducen en gran medida los costos de terreno dado que requieren menores extensiones.

La disposición del agua así como su obtención y calidad también tendrán un punto primordial en la evaluación económica debido a que en ocasiones es necesaria la construcción de la planta de tratamiento y el costo estará en función del tipo de tratamiento a usar como podrían ser de carbón activado u osmosis inversa, claro esta, que al exigir un mejor tratamiento influirá en los costos, a mayor y mejor tratamiento mayor será el costo, en la Ciudad de México al usar métodos profundos como son los pozos exigen una mejor calidad del agua a recargar dado que, al ser inyectada dicha agua evita muchas zonas las cuales

podrían servir como filtros, esta calidad quizá podría llegar a ser comparable como la potable, éste aspecto no pasaría en los métodos superficiales, en los cuales el mismo terreno funciona como filtro, lo cual podría reducir el costo del tratamiento.

En ocasiones no se cuenta con fuentes cercanas de abastecimiento de agua de recarga, en los métodos superficiales en ocasiones lo que se realiza es la desviación del cauce del río, en caso de existir, cuando no se cuenta con alguna fuente cercana se procede a construir canales que alimenten nuestras obras de recarga, reflejándose en altos costos de construcción, mientras que los métodos profundos es necesario transportar el agua desde la planta de tratamiento hasta la zona de recarga, generándose costos por la construcción de tuberías, así como de los tanques de regulación usados en la recarga, cuando se trata de una recarga continua, ya que en ocasiones la recarga no es continua debido a que no se cuenta con un caudal constante durante todo el año.

El costo de infraestructura es muy importante, en ocasiones en un método superficial sólo bastará con la construcción de diques en los cauces, los cuales logran reducir la velocidad del agua, de tal manera que se produzca la filtración, en el caso de los métodos profundos, es necesario la construcción de pozos en que podrían llegar a ser muy profundos, además de las diversas instalaciones con las que debe de contar un pozo de recarga, de ésta forma se reflejará en los costos de construcción.

El mantenimiento y su costo, pueden llegar a ser primordiales en la determinación del método de recarga, dado que en los métodos profundos en ocasiones los costos son más altos, ya que se necesita herramienta especializada, así como técnicas de mantenimiento, incrementándose los costos, mientras que en los métodos superficiales los costos serán menores.

Los métodos en los que es necesario la inyección de agua residual tratada es primordial el uso de sistemas de bombeo, los cuales deberán de contar con una

suficiente y continúa alimentación de energía eléctrica para el bombeo, de tal manera que permanezca el buen funcionamiento de los elementos.

Los financiamientos en una obra de ingeniería tienen un gran papel, debido a que en ocasiones las autoridades no cuentan con los suficientes recursos para la realización de las obras y las empresas particulares, no cumplen con los requisitos de mantenimiento, como ha sido el caso de los pozos de extracción, los cuales al paso del tiempo han dejado de funcionar debido a la falta de mantenimiento.

Todos los métodos de recarga artificial tienen sus altos y bajos costos, dependerá de qué característica o aspecto se esté hablando, la recarga artificial en el Valle de México se ha convertido en una actividad muy limitada debido a las grandes carencias existentes en la infraestructura y a la falta de interés de las autoridades correspondientes, dado que un proyecto de recarga es muy caro y en ocasiones no llega a ser técnicamente viable, debido a que aún se extrae más agua de la que es recargada.

Finalmente para determinar la mejor técnica de recarga es necesario tomar en cuenta, no sólo los aspectos antes mencionados, es importante considerar también las afectaciones al medio ambiente y a la sociedad, aunque quizá se puede decir que pese a que existen un gran número de aspectos a considerar para la determinación del método de recarga, las ventajas de ésta actividad no se verán reflejadas en el corto plazo, ni quizá en el largo plazo, dado que son mínimas las variaciones que se producen en el acuífero, pero ya es tiempo de comenzar a hacer algo en éste ámbito.

En el cuadro 4.1 se presentan los aspectos más importantes que son necesarios a considerar en la determinación de los costos en un proyecto de recarga artificial, haciendo un análisis comparativo de los métodos superficiales y profundos.

Cuadro 4.1 Comparativo de costos en un proyecto de recarga

Factor	Método de Recarga y Costo			
	Superficial		Profundo	
	Importancia en el proyecto	Costo	Importancia en el proyecto	Costo
Estudio de Mecánica de Suelos	Determinará la zona de embalse.	Costo medio dependerá de la precisión del proyecto	Determinará la profundidad de los pozos	Alto costo por su nivel de exactitud
Estudios Geohidrológicos	La permeabilidad es relevante.	Costo medio	Los resultados proporcionan su factibilidad	Alto costo en determinación de parámetros
Disposición del Terreno	Es de grandes dimensiones y en ocasiones es de cultivo	Alto costo dadas las dimensiones requeridas	Requiere menor espacio	Menor costo, que el superficial
Construcción de Instalaciones	Podría requerir de trabajos previos, para acondicionar el terreno	Alto dependiendo de las condiciones actuales del terreno	Complicadas a las de pretratamientos e inyección	Altos costos en caso de no existir
Caudal de recarga	Muy importante, ya que en ocasiones es muy grande	Altos costos para disponer del caudal	Es mucho inferior con respecto de las superficiales	Bajos costos
Pretratamiento del caudal de recarga	No necesario	Bajos costos	Necesario, el terreno, no lo filtra	Alto costos
Costos por bombeo	No existe	Nulos costos	Importante si es continuo	Altos costos
Calidad de agua de recarga	No tan estricto el terreno colabora	Bajos costos	Muy importante, para no afectar al acuífero	Altos costos dependerá de las normas que se fijen
Afectaciones sociales	En la compra de terrenos	Altos costos	Casi nula	Bajos costos
Mantenimiento	Limpieza de los embalses	Altos costos por ser tan grandes	Muy importante, de éste dependerá el buen funcionamiento	Altos costos
Factores Estéticos y al Medio Ambiente	Muy importante, podría generar insectos	Altos costos, para evitar problemas	Escasa, casi nula la afectación	Bajos costos
Pérdidas por evaporación	Importante en el caudal final de recarga	Altos costos en la pérdida de caudal	Casi nula	Bajos o nulos costos
Beneficios sociales	Escasos, en la expropiación de terrenos	Altos costos	Muy importantes al controlar la sobreexplotación	Bajos costos

## **CONCLUSIONES**

En éste trabajo se dió un panorama general de los aspectos, conceptos y parámetros que intervienen en la recarga artificial de aguas subterráneas, de igual forma se presentó la clasificación, tipos y cualidades de los acuíferos, se mostró la problemática actual que vive el país en cuanto a la disponibilidad de las aguas se refiere, y sus principales usos, se habló de la problemática de los acuíferos sobreexplotados y de los principales efectos que se generan a raíz de ésta, se mostraron los diversos métodos existentes para la realización de una recarga artificial, además de los factores que intervienen en ella, su modelación, además de las aplicaciones de éstos métodos en el país y proyectos realizados, finalmente se presentó lo que en el ámbito de la ingeniería se considera un estudio de factibilidad que es importante en la determinación del método de recarga, con todo lo anterior se pretende demostrar la necesidad de un buen uso y distribución de las aguas en México, y el reúso de aguas residuales con la aplicación de técnicas como la recarga artificial, que viene a mitigar algunos de los efectos que causa la sobreexplotación de acuíferos, como se ha presentado en la Ciudad de México.

El país cuenta con un gran desequilibrio en la distribución del agua, dado que en la zona Norte del país se encuentra la mayor concentración de la población, siendo un lugar en donde existe una gran sequía que se ha venido incrementando continuamente al paso de los años, mientras que en el Sureste del país cuenta con grandes niveles pluviales pero con una concentración de población mínima, lo que a su vez ha traído problemas de sobreexplotación de acuíferos en la zona Norte y en las zonas costeras, con los problemas de intrusión salina, además de las concentraciones de contaminantes, dado que ya se están sobreexplotando esas zonas.

Es necesario que se haga conciencia de un uso racional de los recursos hídricos, de tal forma que se eviten los problemas anteriores, en México y debido a los grandes niveles de explotación existente en la mayoría de los 650 acuíferos

que se tienen contabilizados en México, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas en la conservación de los acuíferos, es por esto que se han tomado medidas como es el uso de aguas residuales o pluviales, para ser aprovechadas como aguas de recarga.

En el caso de la Ciudad de México, la gran sobreexplotación de acuíferos existentes hace que los niveles piezométricos de las aguas sean muy profundos, haciendo que los costos por bombeo sean muy altos, para poder ser utilizada en forma económicamente rentable, el agua subterránea debe ser económica y fácilmente accesible. Dado que los costos de las perforaciones se incrementan considerablemente cuando la profundidad de los acuíferos excede de unos pocos cientos de metros de profundidad, ésta constituye un factor principal al optar por un tipo de recurso hídrico. Los costos también son altos cuando aumenta la profundidad de los niveles piezométricos (niveles estáticos) y los niveles de bombeo (niveles dinámicos). En este último caso, los gastos operacionales pueden verse radicalmente aumentados debido a los costos de bombeo.

Con el incremento de la profundidad, hay una tendencia creciente hacia la compactación y consolidación de los sedimentos y hacia la disminución de la capacidad de almacenamiento y la conductividad hidráulica. Esto se traduce generalmente en una mayor mineralización del agua. Por esta razón, y debido a los costos crecientes con la profundidad, la mayoría de los acuíferos profundos resultan inadecuados para el suministro de agua en zonas de alto consumo.

Existe una escasa cultura de respetar los acuíferos en las diferentes zonas del país debido a que la recarga artificial como natural que se realiza de estos, es menor que la extracción por lo que no se deja que los acuíferos se recarguen en su totalidad para ser nuevamente explotados. Aunado a que no hay una reglamentación estricta en cuanto al control de las aguas residuales, debido a que no se tiene un cuidado en la industria, ya que estas depositan sus aguas al alcantarillado municipal sin un tratamiento previo llegando hasta las cuencas con un alto grado de contaminación.

La infiltración de aguas residuales sin tratamiento, especialmente de aquellas que contienen sustancias tóxicas, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (no biodegradables), está provocando la contaminación de los acuíferos, en un proceso lento pero persistente y cuyo control presenta muchas dificultades. Si a este problema agregamos que el agua subterránea ha sido la fuente principal de abastecimiento de agua potable, lo cual ha provocado que se sobreexploten los acuíferos, podemos concluir que esta alternativa de abastecimiento urbano está seriamente amenazada.

Otro riesgo es la contaminación de los acuíferos. En términos generales, es de esperar un deterioro importante de la calidad de las aguas subterráneas, generalmente de forma lenta pero persistente. El grado de riesgo de contaminación variará con la escala y modo de generación de las aguas residuales, su calidad y las características hidrogeológicas del medio.

Como se ha presentado, existen diversos métodos de recarga de acuíferos, en donde dependerán de las condiciones existentes del terreno, además de la extensión de éste, para determinar cual sería una opción correcta, aunque ya se mostró que los pozos de inyección han sido los más usados al menos en la Ciudad de México, dado que requieren de poco espacio, además de que las arcillas que componen las capas subterráneas del subsuelo de la ciudad no permitirían el uso de otro tipo de método.

El uso de agua residual tratada, es conveniente dado que es una fuente permanente y constante, lamentablemente en México son pocas las plantas de tratamiento que cuentan con los sistemas adecuados en el manejo de las aguas residuales, ya que en los métodos de recarga artificial profundos requieren de una calidad de tercer nivel, mientras que en los superficiales es suficiente una calidad secundaria, es ahí donde los costos de construcción, operación y mantenimiento son altos, de ahí que en ocasiones los proyectos queden inconclusos.

En la Ciudad de México actualmente se han incrementado los proyectos vinculados con la recarga artificial, esto surge no por la escasez del líquido, sino por la gran cantidad de problemas que ha generado el abatimiento de los niveles, como sería el caso de los hundimientos diferenciales, que provoca afectaciones en las estructuras de los edificios, o como es el caso de la zona de Aragón la cual tiene un gran abatimiento de los niveles de hasta 15 m, esto ocasionado por la extracción del agua de los pozos de la zona, ya que la zona formaba parte del Lago de Texcoco, al ser extraída el agua, las arcillas comienzan a consolidarse de tal forma que se generan fracturas en las estructuras, esto a ocasionado que ahora las construcciones tengan cimentaciones más profundas que las anteriores.

En éste trabajo se presenta el estado del arte en que se encuentra nuestro país, para la realización del trabajo se presentaron problemas para acceder a la información siendo CNA, la única dependencia que cuenta con documentos vinculados a ésta actividad, lo anterior nos obligó a recurrir a ingenieros dedicados en la materia para obtener información, así mismo la DGCOH, nos brindó la ayuda en éste ámbito, lamentablemente la falta de proyectos actuales nos obligó a consultar documentos muy ambiguos, además la información de los acuíferos es muy particular.

Finalmente deseamos que éste trabajo sea de gran ayuda en la materia de recarga de acuíferos, e incluso logre ser un libro de consulta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

**BIBLIOGRAFÍA**

**LEYES Y DOCUMENTOS**

**"Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"**

**"Ley de Aguas Nacionales"**

**"Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales"**

**"Ley Federal de Derechos del Agua"**

**"Normas Oficiales Mexicanas"**

**"Ingeniería Hidráulica en México"**

Volumen 7 Num. 1 Enero-Abril 1992

**"BALANCE GEOHIDROLÓGICO Y RECARGA ARTIFICIAL DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

Lesser y Asociados S. A. de C. V.

Febrero, 1998.

**"RECARGA ARTIFICIAL EN EL POZO SC-6"**

Lesser y Asociados S. A. de C. V.

Enero, 2000.

**"SINOPSIS DE LA PIEZOMETRÍA DEL VALLE DE MÉXICO 2000"**

Lesser y Asociados S. A. de C. V.

Diciembre, 2000.

**LIBROS**

**"AGUAS SUBTERRÁNEAS, CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO"**

Martínez Rubio, Juan y Ruano Magan Pedro.

Promotora General de Estudios S.A. de C.V.

PROGENSA 1999.

**"AGUA SUBTERRÁNEA Y CONTAMINACIÓN"**

Iturbide Argüelles, Rosario.

Silva Martínez, Ana Elisa.

Series Instituto de Ingeniería UNAM, Julio, 1992.

**"ALTERNATIVAS A LOS PROBLEMAS QUE AFECTAN A LOS ACUÍFEROS  
DEL VALLE DE MÉXICO"**

Buendía Espinosa, Guillermo  
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura,  
ESIA IPN 1994.

**"APORTES A LA HISTORIA DE LA GEOHIDROLOGÍA EN MÉXICO"**

Arreguín Mañón, José.  
Editorial. "Centro de Investigaciones y Estudios Superiores de Antropología Social"  
CIESAS 1988.

**"COMPENDIO BÁSICO DEL AGUA EN MÉXICO 2001 y 2002"**

Comisión Nacional del Agua – Semarnat.

**"EL AGUA EN MÉXICO: RETOS Y AVANCES"**

Comisión Nacional del Agua – Semarnat,  
Octubre, 2000

**"FUNDAMENTOS DE CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA"**

T.H. Y TEBBUT  
Editorial LIMUSA S.A.  
Noriega Editores, 1999.

**"GEOHIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA"**

Custodio E, y Llamas, M.R.  
Editorial Omega, 2ª Edición. 1983.

**"IMPACTO AMBIENTAL"**

Cesar Valdés, Enrique y Vázquez González, Alba Beatriz  
Editorial UNAM Facultad de Ingeniería 1999.

**"MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA,  
ASPECTOS RELACIONADOS CON SU CALIDAD"**

Seminario Cantidad y Calidad del Agua Subterránea y Superficial  
Ponencia realizada el 6 de octubre de 1997.

---

**"RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS DEL VALLE DE MÉXICO  
POR POZOS DE INFILTRACIÓN"**

Arreguín Mañón, José.

Facultad de Ingeniería UNAM 1964

**"RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS, SÍNTESIS METODOLÓGICA,  
ESTUDIOS Y ACTUACIONES REALIZADAS EN LA PROVINCIA DE ALICANTE"**

Murillo Díaz, José Manuel y Castaño Castaño, Silvino.

Septiembre 1999

**"RECARGA ARTIFICIAL DE MANTOS ACUÍFEROS"**

Rayón Rayón, José Ángel

Escuela Nacional de Estudios Profesionales "Acallán"

UNAM 1988

**"SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN DESARROLLOS URBANOS"**

Ochoa López, Alejandro

UNAM 1991

**"MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE  
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL"**

Memorias IV, V, VI, VIII.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

SMISA A.C.

**PÁGINAS ELECTRÓNICAS.**

<http://www.cna.gob.mx>

<http://www.unesco.org.uy>

<http://www.ccvn.org.mx>

<http://www.semarnat.gob.org.mx>

<http://www.inegi.gob.org.mx>

<http://www.igme.es>

<http://www.riob.org>

<http://www.portal-ambiental.com>