

01177

A
20



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**TRITIO COMO INDICADOR AMBIENTAL DE RECARGA
A TRAVES DEL ACUITARDO LACUSTRE
DE CHALCO, MEX.**



**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
P R E S E N T A
ABIGAIL ARACELI CERVANTES MEDEL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

¡Aguas
del quinto reino!

¡Aguas
silenciosas que huelan el alma

¡Aguas
de eterno ritmo y retumbo, cunas profundas entre muros golpeados
por puñas de espuma, ¡Oh verbo en los oleajes del espíritu de la vida
la gran incesación del elemento primigenio, oh aguas
resplandecientes y puras de la liberación y la eternidad
a través de las imágenes esenciales, ¡Oh aguas,
balsamas marinas de alga, ola y ola,
desnudez trágica y jadeante del Desarrollo azul
con cuya piel de oro se cubre el día de la tierra!

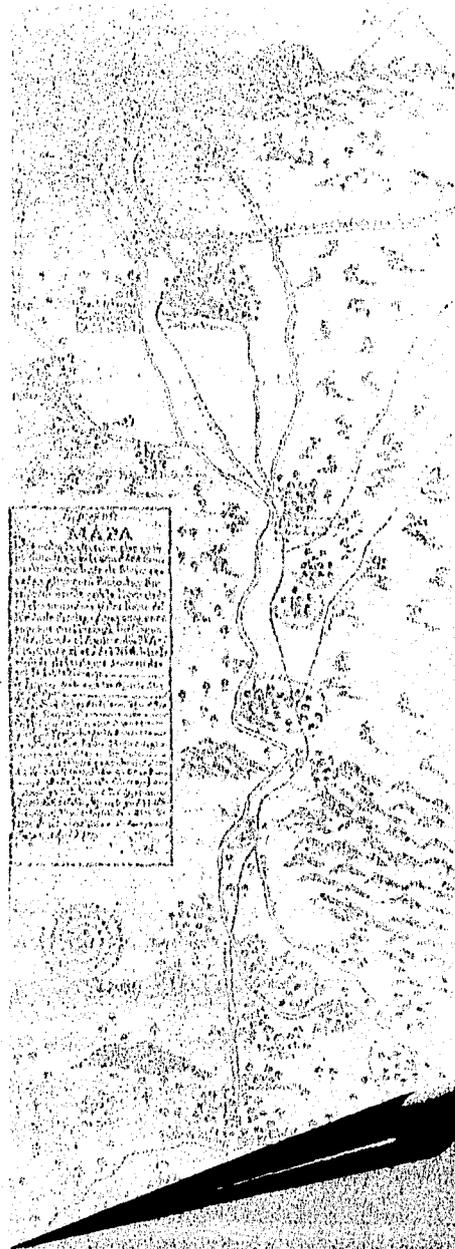
¡Aguas
sembradas por la luz!

¡Archas magnitudes de la memoria como fluviales
arcadas sepultadas por milenarias lunas! ¡Oh urnas
de reposo donde el desnudo pensamiento se sumerge y
tañe las rayas-cuerdas de la cithara solar!

¡Cartomas, hermanas en Fenatish, las cíclicas aguas totales,
las puras fuerzas de la epifanía del espíritu abragado a la naturaleza,
donde palpitan las retornas engendradas por la ejaculación de sales
del infinito amor, asilantes puentes de oro tendidos
entre la nada y el futuro!

Caudales y visiones, incansables cuerpos de las rías
acostada estatura palpitante de la belleza, ¡Oh aguas
del amor y la estrella
cañita de rompiente que levanta las felices nombres de la tierra,
insurgencia del canto.!

Agustín Bartra



Agradecimientos:

No sería posible realizar ningún tipo de investigación sin un apoyo económico, por lo que en primer lugar agradezco el financiamiento de esta tesis proporcionado por los proyectos internos denominados:

1. " Contaminación del acuífero de la Ciudad de México 1995 -1996 del Instituto de Geología de la UNAM.
2. Proyecto 4811 del Instituto de Ingeniería, 1994 .

Ambos proyectos a cargo del Dr. Adrian Ortega Guerrero, así como a los directores de ambas instituciones; Dr. Dante Moran Zenteno e Ing. Jose Luis Fernández.

Hago extenso mi agradecimiento al Dr. M. Adrian Ortega Guerrero por la dirección y asesoría de esta tesis, y por su apoyo e interés en mi desarrollo y superación académica.

Como una mención especial agradezco al Dr. John A. Cherry, de la Universidad de Waterloo, por todo el apoyo brindado, así como al Sr. Bob Ingleton por su invaluable ayuda y su inapreciable amistad.

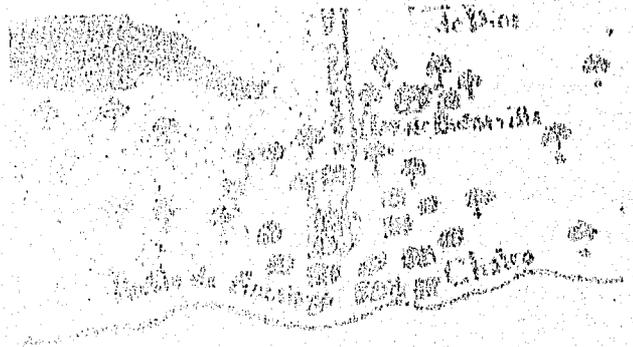
Agradezco de igual modo al Ing. Roberto Ortega Guerrero por el préstamo del equipo necesario para la instrumentación de campo.

A la Maestra Rosario Turbe por sus valiosos comentarios durante la revisión de esta tesis, a la Dra. Georgina Fernández también por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y a sus importantes comentarios sobre ésta, al M. en C. Constantino Palacios y a la M. en I. Francisca Soler por el tiempo que implicó para ellos la revisión de este trabajo.

En forma muy especial a Enrique Martínez quien sin tener que hacerlo me dedico tantas horas de trabajo para poder realizar esta tesis, mil gracias.

Y.. por supuesto a mis padres quien una vez mas me han apoyado tanto, para ser de otro de mis grandes sueños una realidad, muchísimas gracias.

RESUMEN



Resumen de la obra de...

RESUMEN

La sobreexplotación que sufre el acuífero de la Ciudad de México ha provocado la alteración de la hidrodinámica natural del flujo subterráneo en el acuitardo lacustre que lo sobreyace, el cual era ascendente (artesianismo), cambiando a un flujo predominantemente descendente, con la consecuente vulnerabilidad del acuífero a la contaminación debido a la migración de contaminantes provenientes de la superficie del terreno hacia el acuífero subyacente.

Con el fin de evaluar la vulnerabilidad del acuífero de la Ciudad de México, se utilizó el isótopo de tritio como indicador de recarga a través del acuitardo lacustre, y se determinó la profundidad del flujo activo en el acuitardo.

Este estudio se llevó a cabo en la porción nororiental de la subcuenca de Chalco, a lo largo de una sección aproximadamente norte-sur, con una extensión de 1500 metros, donde se emplearon tres nidos de piezómetros, con profundidades que varían desde 2 hasta 35 metros.

A partir de los registros de carga hidráulica y datos de conductividad hidráulica a lo largo de la sección de estudio, se definieron dos zonas, una superior con bajos gradientes hidráulicos ($i < 0.63$) y altas conductividades hidráulicas ($K > 1.5 \cdot 10^{-9}$ m/seg.), y una zona inferior con altos gradientes hidráulicos ($i > 0.63$) y bajas conductividades hidráulicas ($K < 1.5 \cdot 10^{-9}$ m/seg.).

Se midieron las concentraciones de este trazador a diferentes profundidades y en diferentes zonas con espesor variable de 10, 15 y 35 m del acuitardo lacustre de Chalco. De los tres sitios estudiados sólo se detectó tritio en el lugar donde el acuitardo presenta 35 metros de espesor, de acuerdo con las velocidades de agua subterránea calculadas, el trazador en los dos sitios restantes ya atravesó al acuitardo alcanzando al acuífero subyacente.

Empleando el perfil de tritio obtenido en el sitio de mayor espesor y la evidencia de ausencia en los otros dos sitios, se calibró un modelo matemático con el objeto de identificar la velocidad de migración y la distribución del pico de tritio en el subsuelo. En esta calibración se encontró que los valores que mejor simulan la curva de campo son una velocidad promedio de 0.2 m/año y una dispersividad de 0.02 m.

Los resultados muestran que en las zonas donde el espesor del acuitardo es menor a 15 metros, este no representa una protección al acuífero subyacente, debido a que el pico de tritio ya atravesó al acuitardo en su totalidad, lo cual es consistente con el intervalo de velocidad calculado con datos hidráulicos.

Ante el impacto de migración del trazador de tritio hacia el acuífero subyacente, es importante determinar los factores que pudieran controlar la migración de diferentes grupos de contaminantes a través del acuitardo y con ello la inminente contaminación de esta importante fuente de agua potable.

CONTENIDO

Resumen.	i
Indice de Tablas.	ii
Indice de Figuras.	iii
1. Introducción.	1
1.1. Generalidades.	1
1.2. Objetivos.	3
1.3. Selección de la zona de estudio.	4
2. Información preliminar y metodología	9
2.1. Antecedentes.	9
2.2. Metodología	11
2.2.1. Instrumentación.	11
2.2.2. Muestreo de agua subterránea y análisis de tritio.	12
2.2.3. Modelación numérica del transporte de tritio en el acuitardo.	13
3. Hidrogeología.	15
3.1. Hidrostratigrafía de la subcuenca de Chalco.	15
3.2. Hidrogeología de la subcuenca de Chalco.	16
4. Discusión de Resultados.	19
4.1. Condiciones de flujo de agua subterránea en el acuitardo.	19
4.2. Profundidad del flujo activo.	22
4.3. Velocidad y tiempos de residencia del agua subterránea en el acuitardo.	24
4.4. Distribución de tritio.	27
4.4.1. Marco teórico.	27

4.4.2. Distribución de tritio en la atmósfera.	28
4.4.3. Distribución de tritio en el acuitardo de Chalco.	29
4.5. Modelo conceptual de la migración de tritio en el acuitardo.	30
4.6. Modelación matemática.	31
4.6.1. Condiciones Iniciales y de Frontera.	31
4.7. Resultados de la modelación.	33
4.7.1. Sitio N14.	33
4.7.2. Sitios N20 y N23.	34
5. Conclusiones y Recomendaciones.	53
Apéndice.	56
Referencias.	58

Indice de Tablas

Tabla 3.1 Eventos Importantes relacionados con el antiguo Valle de Chalco.

Tabla 4.1 Parámetros hidráulicos medidos

Tabla 4.2 Parámetros medidos en el sitio N23

Tabla 4.3 Parámetros medidos en el sitio N20

Tabla 4.4 Parámetros medidos en el sitio N14

Tabla 4.5. Resumen de valores promedio calculados

Indice de Figuras

- Fig. 1.1 Localización del área de estudio**
- Fig. 1.2 Rasgos culturales de la planicie lacustre**
- Fig. 1.3 Espesores del acuitardo lacustre de la subcuenca de Chalco mostrando la ubicación de los nidos piezométricos**
- Fig. 3.1. Unidades Hidrogeológicas en el área de Chalco**
- Fig. 3.2 Sección transversal mostrando las unidades Hidrogeológicas de la subcuenca de Chalco**
- Fig. 4.1 Distribución de la carga hidráulica en la sección**
 - Fig. 4.1.a. Sitio N23**
 - Fig. 4.1.b. Sitio N20**
 - Fig. 4.1.c. Sitio N14**
- Fig. 4.2 Distribución de la conductividad hidráulica en la sección**
 - Fig. 4.2.a. Sitio N23**
 - Fig. 4.2.b. Sitio N20**
 - Fig. 4.2.c. Sitio N14**
- Fig. 4.3 Distribución de la velocidad hidráulica en la sección**
 - Fig. 4.3.a. Sitio N23**
 - Fig. 4.3.b. Sitio N20**
 - Fig. 4.3.c. Sitio N14**
- Fig. 4.4. Distribución del caudal específico en la sección**
 - Fig. 4.4.a. Sitio N23**
 - Fig. 4.4.b. Sitio N20**
 - Fig. 4.4.c. Sitio N14**
- Fig. 4.5 Fluctuaciones de la carga hidráulica con la profundidad**
 - Fig. 4.5.a. Sitio N20**
 - Fig. 4.5.b. Sitio N14**
- Fig. 4.6. Función de tritio en la estación Veracruz**

Fig. 4.7 Función de tritio en la estación Chihuahua

Fig. 4.8 Perfil de tritio medido en campo

Fig. 4.9 Modelo conceptual

Fig. 4.10 Función Veracruz 70-87, sensibilidad a la dispersividad

Fig. 4.11 Función Veracruz 70-87, sensibilidad a la velocidad

Fig. 4.12 Función Chihuahua 70-87, sensibilidad a la dispersividad

Fig. 4.13 Función Chihuahua 70-87, sensibilidad a la velocidad

Fig. 4.14 Función Veracruz 60-87, sensibilidad a la dispersividad

Fig. 4.15 Función Veracruz 60-87, sensibilidad a la velocidad

Fig. 4.16 Función Chihuahua 60-87, sensibilidad a la dispersividad

Fig. 4.17 Función Chihuahua 60-87, sensibilidad a la velocidad

CAPITULO 1

Introducción



1. INTRODUCCION

1.1 Generalidades

Para el suministro de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México se requieren alrededor de 62 m³/s, de los cuales 20 m³/seg provienen del sistema Cutzamala, y 42 m³/seg del acuífero granular regional de la cuenca de México (Sahab, 1992). Este acuífero se localiza bajo una gruesa secuencia de sedimentos lacustres arcillosos denominado en términos hidrogeológicos acuitardo, cuyo espesor aumenta gradualmente desde unos cuantos metros a partir de la periferia de los antiguos lagos, hasta un máximo de 300 metros en su parte sur, lo que representa los mayores espesores de estos sedimentos en la cuenca de México. Este acuitardo constituye la única protección del acuífero regional a la contaminación superficial.

La cuenca de México comprende a la denominada subcuenca de Chalco, la cual se localiza precisamente en donde el acuitardo alcanza su mayor espesor, es decir al sureste de la Ciudad de México (Fig. 1.1). Del acuífero regional de la subcuenca de Chalco se extraen 8 m³/seg, de los cuales 3 m³/seg se envían a la Ciudad de México, lo que representa el 37% de la extracción total en la subcuenca (Huizar, 1989, SARH-CEAS, 1989), y el 4.8 % de los requerimientos totales de la zona metropolitana.

Sobre la planicie de Chalco se ubican diversos canales de aguas residuales de origen urbano e industrial, extensas zonas agrícolas y ganaderas (Fig.1.2), sitios aislados de disposición clandestina de residuos industriales, así como pequeños basureros, los cuales representan una continua amenaza a la contaminación del subsuelo, por lo que es importante determinar la

velocidad de migración de los diferentes contaminantes a través del paquete lacustre y el posible impacto al acuífero subyacente.

En la subcuenca de Chalco, la despresurización y consolidación del acuitardo, debido al intenso bombeo del acuífero regional, ha provocado la inversión de los gradientes hidráulicos, originalmente ascendentes, a través del paquete lacustre. La inversión del gradiente se manifiesta en zonas donde el espesor del acuitardo es menor a 100 metros, mientras que en zonas donde el espesor es mayor a 100 metros (Fig. 1.3), el gradiente en la parte superior del acuitardo es todavía ascendente (Ortega, 1993).

Este proceso de inversión es crítico para el acuífero granular, ya que cualquier contaminante dispuesto en la superficie se está moviendo en forma vertical a través de los sedimentos arcillosos y puede impactar al acuífero tarde o temprano, contaminando esta invaluable fuente de agua potable. Así mismo la inversión del gradiente hidráulico, a través del acuitardo lacustre, ha favorecido también la incorporación de trazadores atmosféricos, tanto químicos como isotópicos, que pueden ser utilizados en la evaluación de mecanismos de migración en el acuitardo, tales como oxígeno-18, deuterio y tritio por medio de la infiltración de agua de lluvia (Ortega et al. 1993).

El análisis de los procesos de incorporación de estos trazadores al acuitardo, así como su aplicación en estudios hidrogeológicos en la cuenca de México, han sido desarrollados exitosamente por Rudolph et al. (1991) y Ortega (1993), en las planicies lacustres de Texcoco y Chalco respectivamente (Fig. 1.1). Estos autores calibraron modelos matemáticos de transporte con los perfiles de distribución de trazadores medidos en campo, concluyendo que el flujo de agua subterránea y la migración de solutos en el acuitardo están controlados por la presencia de

microfracturas que se extienden hasta 20 ó 25 metros de profundidad.

Ortega (1993) instrumentó en diversos puntos de la planicie de Chalco 19 sitios o nidos de piezómetros a diferentes profundidades en el acuitardo, para investigar la migración de solutos y contaminantes a través del paquete lacustre hacia el acuífero subyacente. Como parte de estas investigaciones, obtuvo muestras de agua en dos sitios diferentes del acuitardo de Chalco (Fig. 1.3), para determinar el contenido de tritio como trazador ambiental, por medio de la técnica de ^3H - ^3He , cuyos datos no fueron procesados ni interpretados.

1.2 Objetivos

La inversión del gradiente hidráulico a través del acuitardo lacustre de Chalco y la incorporación de trazadores atmosféricos al acuitardo pueden permitir la aplicación de la técnica de tritio y tritio-helio al estudio de los procesos de transporte de solutos y recarga, así como su impacto en el acuífero; por lo que la presente tesis analiza la presencia y distribución de tritio en zonas de menor espesor del acuitardo de Chalco, para evaluar la recarga y el potencial de migración de contaminantes no reactivos a través de los sedimentos lacustres hacia el acuífero subyacente, con base en los siguientes objetivos:

- a) Evaluar el potencial de migración de contaminantes no reactivos a través del acuitardo y su impacto al acuífero subyacente, determinando la recarga de agua meteórica al acuitardo.
- b) Identificar la profundidad de flujo activo de agua subterránea en el acuitardo lacustre de Chalco, analizando el comportamiento y las variaciones de la distribución de la carga

hidráulica y del gradiente hidráulico a diferentes profundidades.

- c) Determinar la distribución de tritio en diferentes sitios del acuitardo en donde el espesor de los sedimentos sea variable, mediante el muestreo y análisis del agua de poro, cuyos datos se aplicarán en la calibración de un modelo matemático de transporte.
- d) Estimar el tiempo de residencia del agua subterránea en el acuitardo lacustre de Chalco, a partir de los valores hidráulicos calculados.

1.3 Selección de la zona de estudio

Para cumplir con estos objetivos se seleccionó la zona nororiental de la planicie lacustre de Chalco, con un área aproximada de 2000 m², debido a las siguientes características:

- a) Existen dos nidos de piezómetros previamente instalados (Ortega, 1993), uno de ellos consta de 7 piezómetros instalados a profundidades entre 3 y 15 m que es la base del acuitardo en este sitio (considerando aproximadamente un metro de relleno del canal), a intervalos entre cada piezómetro de 1 y 1.8 m. Un segundo nido está integrado por 22 piezómetros con profundidades que varían desde 2 m, aumentando a intervalos de 1 y 2.5 m, hasta alcanzar la base del acuitardo que en este sitio es de 35 metros.
- b) La disponibilidad de datos de tritio-helio en uno de estos nidos de piezómetros, en donde la profundidad del acuitardo es de 35 metros.
- c) El espesor del acuitardo varía desde 10 a 35 m en esta zona, por lo que la inversión del gradiente en el acuitardo ocurrió primero en los sitios en donde éste es más delgado y

progresivamente hacia donde tiene mayor espesor, es de esperar que la incorporación de los trazadores atmosféricos variará también dependiendo del espesor, y en consecuencia los perfiles de tritio se deben ubicar a diferentes profundidades en el acuitardo en función del espesor.

- d) Existe la posibilidad de complementar la instrumentación a lo largo de una sección norte-sur, con una extensión aproximada de 1500 metros, instalando un tercer nido de piezómetros, en el sitio donde el espesor del acuitardo es de 10 m, es decir en su parte más delgada, lo que permitirá estudiar el comportamiento del tritio a lo largo de una sección en la cual el espesor del acuitardo variará desde 10 metros en el nuevo sitio hasta 15 y 35 metros en los dos sitios ya existentes.

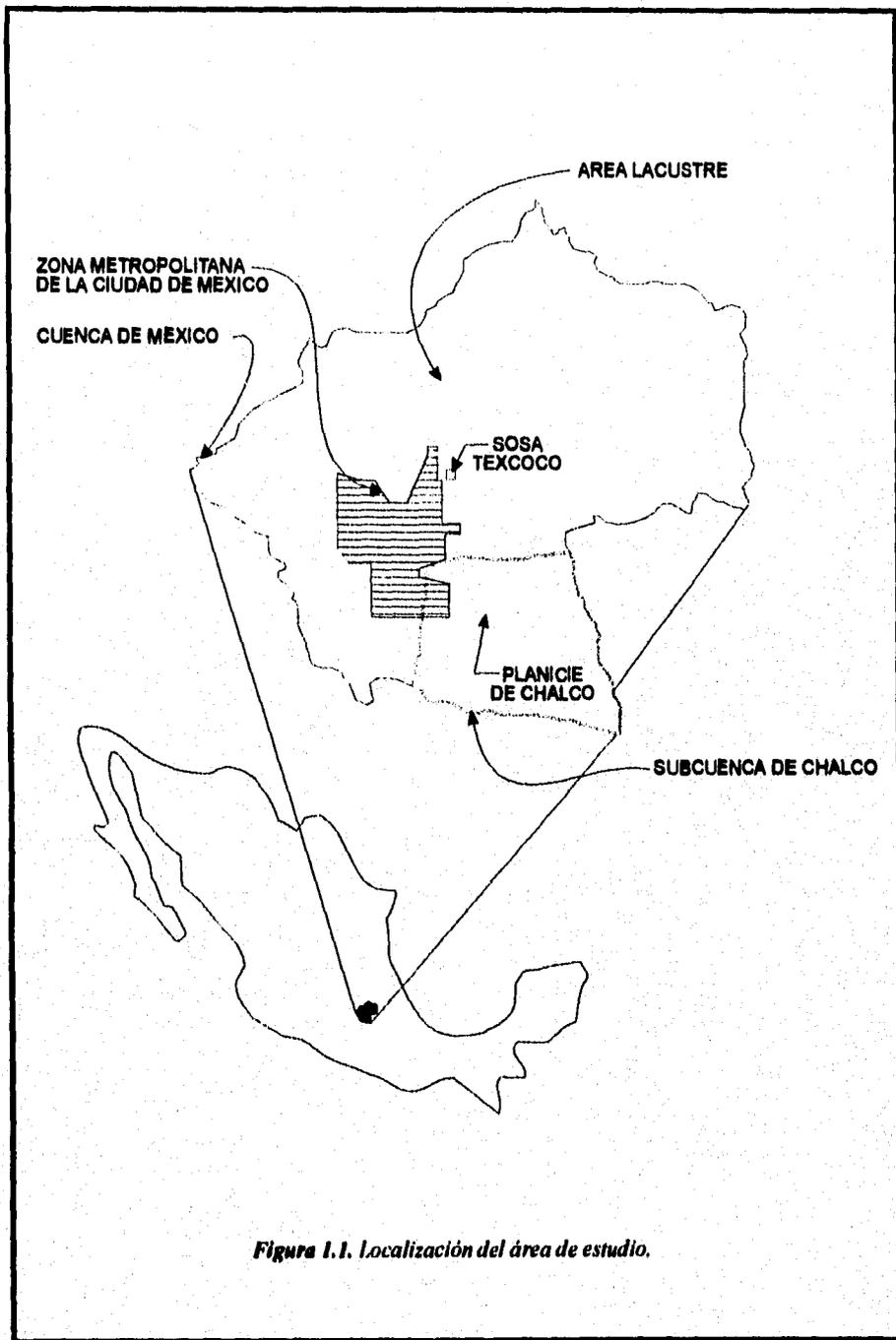


Figura 1.1. Localización del área de estudio.

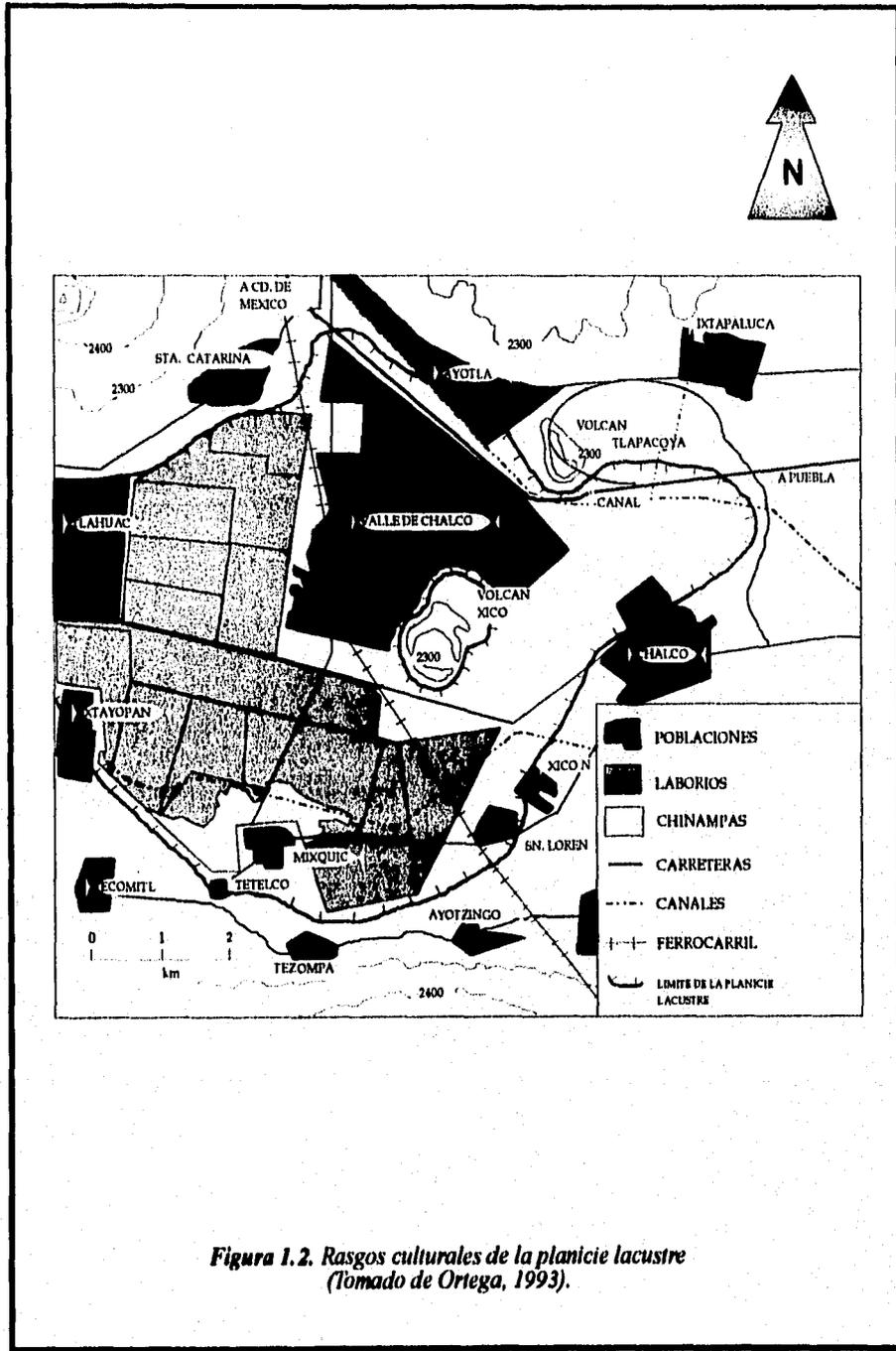
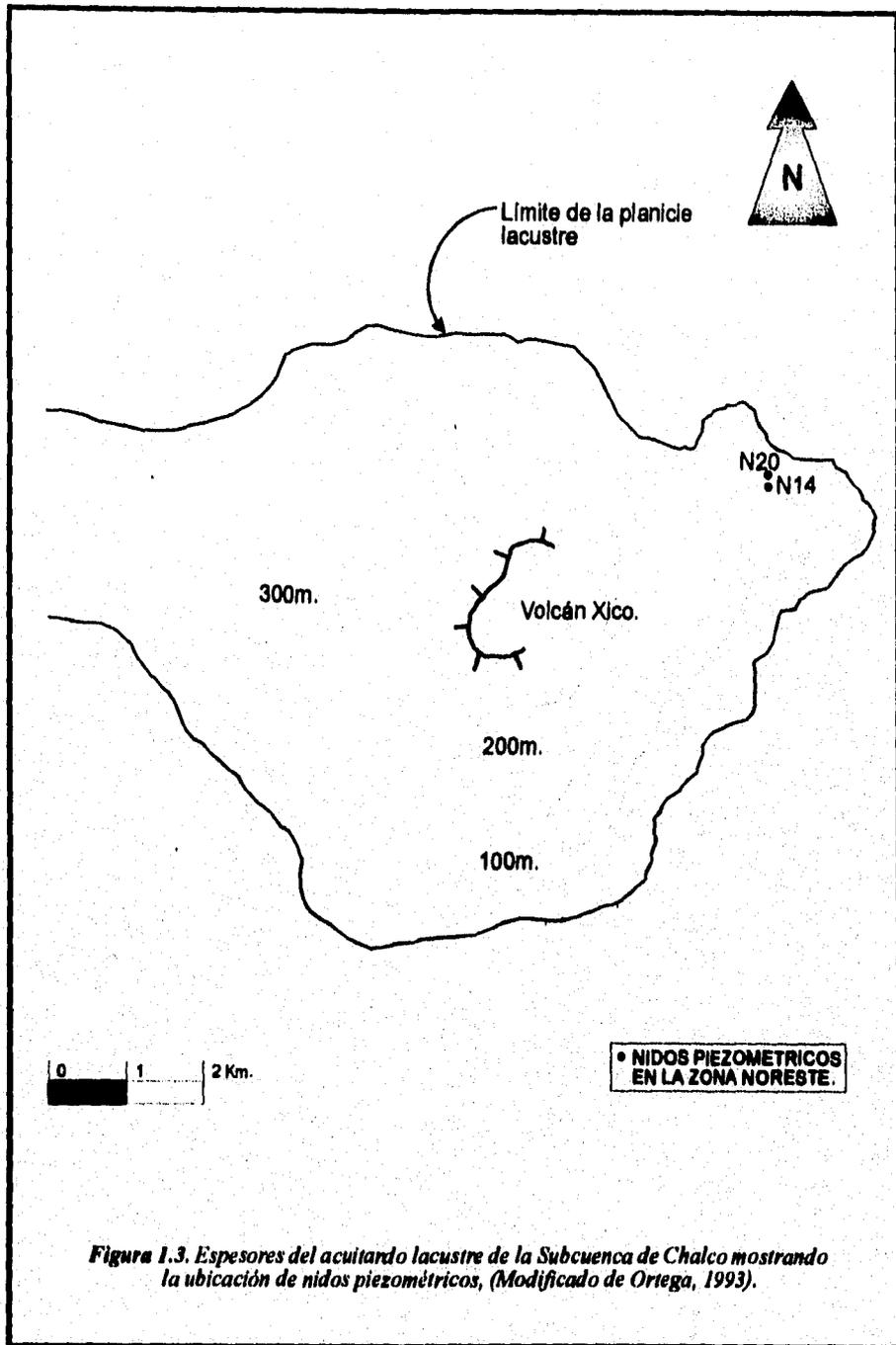


Figura 1.2. Rasgos culturales de la planicie lacustre (Tomado de Ortega, 1993).



CAPITULO 2

Información Preliminar y Metodología



2. INFORMACION PRELIMINAR Y METODOLOGIA

2.1 Antecedentes

Existen diversos datos históricos de la evolución hidrogeológica de la subcuenca de Chalco, desde el drenado del antiguo lago de Chalco (Briviesca, 1961), la explotación del agua subterránea en la subcuenca, el consecuente abatimiento de los niveles piezométricos en el acuífero (SARH, 1972, SARH-CAVM, 1982, SARH-CAVM, 1987) y el proceso de inversión de gradientes a través del acuitardo que determinaron la incorporación de trazadores al acuitardo lacustre (Ortega et al., 1993). Ortega (1993) realizó diversos estudios de hidrogeología de contaminantes en los sedimentos lacustres de la planicie de Chalco. Como parte de estos estudios realizó un análisis sistemático de los mecanismos de migración tanto de solutos naturales y trazadores ambientales, como de contaminantes a través del acuitardo lacustre hacia el acuífero subyacente, apoyado en una detallada instrumentación de campo, muestreo de agua subterránea y modelación matemática. Dos de los sitios utilizados por el citado autor se ubican en la porción nororiental de la planicie de Chalco; el sitio N20 en donde el espesor del acuitardo es de 15 metros (Ortiz, tesis en revisión, realiza un estudio en este sitio considerando un espesor de 14 metros), y el sitio N14, con una profundidad máxima de 35 metros.

En el sitio N14 Ortega (inédito) determinó la distribución de tritio a través del acuitardo por medio de la técnica de $^3\text{H}-^3\text{He}$ (Solomon et al. 1991), con un límite de detección de 0.01 UT (Unidad de tritio), cuyos análisis se efectuaron en la Universidad de Rochester, N.Y. El empleo de este trazador en la hidrogeología se ha extendido principalmente como indicador de las

propiedades de dispersión hidrodinámica y de difusión molecular en medios porosos (D'Astus et al., 1988, Ruland et al., 1991), y como estimador de recarga en el sistema acuífero (Egboka, 1983, Robertson & Cherry, 1989).

La presencia de tritio en arcillas fracturadas permite definir la profundidad de la zona de flujo activo, asociada a fluctuaciones importantes del nivel piezométrico a lo largo del año (Ruland et al., 1991).

Solomon et al. (1991), realizó diversas investigaciones con los trazadores de tritio (^3H) y helio (^3He), analizando los efectos teóricos de la dispersión a través de modelos uni y bidimensionales basados en la ecuación de advección-dispersión, así como su aplicación como un estimador de recarga.

En cuanto a las propiedades físicas de los sedimentos lacustres de la cuenca de México, existen también diversos estudios como son los realizados por Marzal y Mazari (1959) en donde a partir de diferentes análisis, determinan la porosidad (n) de las arcillas de la cuenca de México en un intervalo de 80 a 90 %, SARH-CAVM (1981), reporta un índice de porosidad del 80 al 88%, Rudolph et al. (1991), emplea para su modelo, en los sedimentos lacustres de la planicie de Texcoco, una porosidad promedio del 87 %. Mientras que Ortega et al. (1993) considera para los sedimentos lacustres del acuitardo de Chalco, un intervalo de porosidad del 40 al 80 %.

Los resultados de conductividad hidráulica (K), medidos en los sitios N20 y N14 por Vargas (1995), a partir de numerosas pruebas piezométricas de recuperación, se emplearon en combinación con los registros de cargas hidráulicas, para determinar las características y velocidad del flujo a lo largo de la sección de estudio, la cual abarca desde los límites de la zona lacustre, cerca de Ixtapaluca, hasta el interior de la planicie.

Ortega (1993), determinó la ocurrencia de la inversión de los gradientes hidráulicos en donde el espesor del acuitardo es menor a 100 metros, estableciendo que está ocurrió inicialmente (1955-1965) en los sitios de menor espesor, para presentarse posteriormente (1970-1975) en los sitios de mayor espesor.

Los datos anteriores en combinación con la información hidrogeológica generada por Huizar (1989), Ortega et al. (1993) y diferentes datos piezométricos de la SARH-CAVM (1987) y DDF (1991), se tomaron como punto de partida de la presente tesis.

2.2 Metodología

2.2.1 Instrumentación

En febrero de 1994, se instaló un tercer sitio de piezómetros denominado (N23), como complemento de la sección de estudio, hasta una profundidad de 10 m, abarcando así el espesor total del acuitardo. La técnica empleada para la instalación de piezómetros se desarrolló inicialmente en la Universidad de Waterloo (Cherry et al., 1983), modificándose para su implementación en México por Ortega et al. (1993). La instrumentación del sitio N23, consistió en la instalación de 8 piezómetros entre 3 y 10 metros de profundidad, con un metro de intervalo desde la superficie del terreno hasta la interfase acuífero-acuitardo, el material de estos piezómetros es de acero inoxidable con un diámetro interno de 1.25 cm, forrado con una fina pantalla de nylon, un filtro sumamente delgado, y un ademe perforado de acero inoxidable continuo desde la superficie del terreno. Una tubería adicional de acero inoxidable de 20 cm de

sección y un diámetro interno de 1.25 cm se instala entre la boca del piezómetro y la tubería de acero negro para minimizar los efectos de oxidación de esta última. Los piezómetros se instalaron empleando un martillo vibratorio de gasolina como equipo portátil. inicialmente se perforaron 15 cm de sección, por medio de una punta de acero inoxidable, que va unida a otra tubería también de acero inoxidable de 1/2" a 3/4". Así mismo se agregaron de manera continua tubería de 2 metros de longitud hasta alcanzar la profundidad deseada.

2.2.2 Muestreo de agua subterránea y análisis de tritio

Con el fin de complementar la distribución de tritio a lo largo de la sección de estudio, se efectuó un muestreo de agua subterránea en el sitio N20 y en el nuevo sitio N23, empleando una pequeña bomba peristáltica con un tubo de diámetro pequeño, conectado a un matraz de vidrio, o por medio de un muestreador de tubo triple, controlado por gas nitrógeno comprimido, descrito por Robin et al. (1982). Antes de coleccionar la muestra, se dejó fluir el agua de la parte superior del piezómetro para asegurar que las muestras representaran el agua de entrada al tubo a través del medio poroso. Las muestras se coleccionaron en botellas de vidrio color ambar de 1 o 2 litro, las cuales se cerraron y sellaron herméticamente para evitar el contacto con el exterior. Estas muestras se enviaron para su análisis al Laboratorio de Isótopos Ambientales del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Waterloo, Canadá, en donde, debido a los bajos niveles en el contenido de tritio esperado, se analizaron por medio de la técnica de enriquecimiento electrolítico, el cual cuenta con un límite de detección de 0.8 - 1 UT (B.J. Dremie, comunicación verbal).

Los resultados de los análisis efectuados en los sitios N20 y N23, así como los datos previos de tritio en el sitio N14, se graficaron para obtener los perfiles de campo a lo largo de la sección.

2.2.3 Modelación numérica del transporte de tritio en el acuitardo.

Con el objeto de definir y predecir el comportamiento de tritio en el acuitardo lacustre desde la superficie, se calibró un modelo numérico unidimensional derivado de la ecuación de advección-dispersión con decaimiento radiactivo, que describe el transporte de un soluto radiactivo en un medio poroso equivalente, con valores promedio de conductividad hidráulica (K), velocidad y dispersividad (Egboka, 1983). Los datos de conductividad hidráulica (K) empleados en la modelación, fueron generados por Vargas (1995), en los diferentes sitios de estudio a partir de numerosas pruebas piezométricas de recuperación.

Los parámetros de velocidad lineal promedio (v), se calcularon a partir de la denominada ecuación de Darcy ($v = -Ki/n$) donde i es el gradiente hidráulico y n es la porosidad. Utilizando el intervalo de porosidad estimado por Ortega et al. (1993), con valores extremos de $n=0.4$ y 0.8 . Los valores de dispersividad como incógnita en la ecuación de transporte, se determinaron a partir de las simulaciones efectuadas para diferentes combinaciones de parámetros (en los rangos medidos) hasta obtener la mejor reproducción del perfil de tritio medido en campo.

En la calibración del modelo se consideraron los períodos de inversión determinados por Ortega (1993) para los sitios N23, N20 y N14, es decir 40, 30 y 20 años respectivamente, así como los datos históricos de distribución de tritio en la atmósfera, como función de entrada, los cuales corresponden a las estaciones de los estados de Veracruz y Chihuahua, controlados por la

**International Atomic Energy Agency, entre 1960 y 1990, cuyos datos se reportan en informes
periódicos para diferentes estaciones en el mundo.**

CAPITULO 3

Hidrogeología



3. HIDROGEOLOGIA.

3.1 Hidroestratigrafía de la subcuenca de Chalco

Basado en cortes litológicos de pozos (SARH-CAVM, 1982), registros eléctricos (CNA,DDF), registros geofísicos (Benhumea y Vásquez, 1988), Ortega et al. (1993) define las siguientes unidades hidroestratigráficas, (Figs. 3.1 y 3.2):

- 1) Acuitardo superficial, constituido por sedimentos lacustres. El espesor de este acuitardo aumenta gradualmente desde 10 m a partir de la periferia de la planicie, a un máximo de 300 m en el área central (Fig. 1.3). Estos sedimentos lacustres constan de una secuencia de capas arcillosas de 10 a 30 m de espesor, intercaladas con capas de arena volcánica fina de 1 a 3 m de espesor denominadas "Capas Duras" de gran resistencia a la penetración con cono eléctrico.
- 2) Depósitos cuaternarios volcánicos que conforman un importante acuífero en rocas basálticas, en las márgenes norte y sur de la subcuenca, esta unidad se encuentra interdigitada con las arcillas lacustres, por lo que se puede asegurar que ambas unidades son contemporáneas.
- 3) Depósitos aluviales y piroclásticos, los cuales constituyen un acuífero granular libre en la porción nororiental de la subcuenca y un acuífero semiconfinado bajo el acuitardo lacustre. Este es el acuífero regional del que se extrae agua subterránea para abastecer en parte a la Ciudad de México.

- 4) Rocas volcánicas terciarias como basamento del sistema hidrogeológico.

3.2 Hidrogeología de la subcuenca de Chalco

El antiguo lecho del lago de Chalco, como parte de la cuenca de México, fue drenado en el año de 1918 (v. apéndice, Tabla 3.1). En 1922 se registran los primeros pozos de bombeo en el área, con una extracción mínima al acuífero regional (SARH, 1972). En los años 40's se inicia el bombeo en el acuífero libre con 150 pozos de bombeo que producían aproximadamente 1.3 m³/seg (Molina, 1956), para uso agrícola y doméstico. En los inicios de los 60's se perforan nuevos pozos sobre el acuífero basáltico lo cual provoca la desaparición de los manantiales en los límites de la sierra Chichinautzin con la planicie lacustre. El número de pozos perforados en el área se incrementa durante los años 70's, extrayendo más de 5 m³/seg (DDF, 1979). Durante la década de los 80's, se perforan 14 pozos más, los cuales aportan un promedio de 1.7 m³/seg, para cubrir la demanda de la Ciudad de México (SARH-CAVM, 1982). En 1988 la extracción en la subcuenca de Chalco era del orden 7.75 m³/seg (Huizar, 1989), y en 1989 aumenta a 8 m³/seg por abastecimiento local (SARH-CEAS, 1989), lo que corresponde al 18% de la extracción total del acuífero principal de la Ciudad de México.

Como consecuencia del bombeo regional en el acuífero libre los niveles Piezométricos en la planicie de Chalco, se han abatido 35 metros durante el período de 1940 a 1994, es decir un promedio de 0.65 m/año. En los últimos 10 años este abatimiento ha sido del orden de 1.2 m/año. La extracción de agua subterránea generó la inversión de los gradientes hidráulicos, al menos en los primeros 100 metros de espesor del acuitardo, mientras que en espesores superiores a este se

conserva un flujo ascendente o bien se mantienen condiciones hidrostáticas (Ortega et al., 1993). La inversión de los gradientes hidráulicos ocurrió inicialmente en las márgenes del acuitardo lacustre, primero en zonas donde el acuitardo es muy delgado y progresivamente en zonas donde el espesor es mayor. Por tal motivo el tiempo de inversión de los gradientes hidráulicos a lo largo de la sección de estudio varió aproximadamente desde hace 40 años en el sitio donde el espesor es de 10 metros (N23), 30 años en el sitio con espesor de 15 metros (N20) y 20 años en el sitio donde el espesor es de 35 metros (N14). Es de esperarse que la incorporación de tritio al acuitardo, en cada uno de los sitios, se llevó a cabo en tiempos diferentes, por lo que se prevé que el pico de tritio se ubique también a diferentes profundidades.

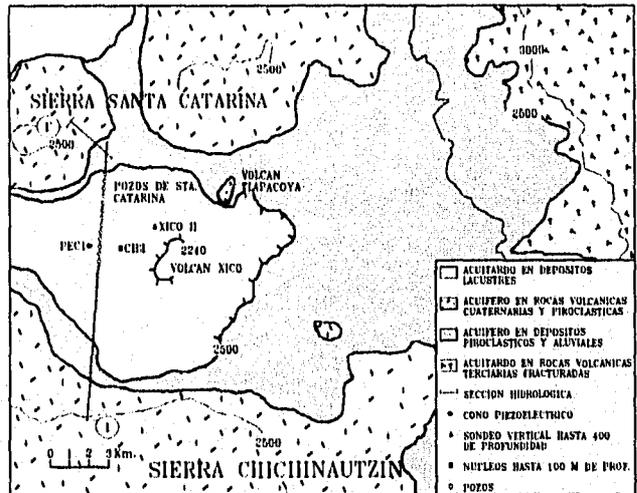


Figura 3.1. Unidades hidrogeológicas en el área de Chalco (Tomado de Ortega 1993)

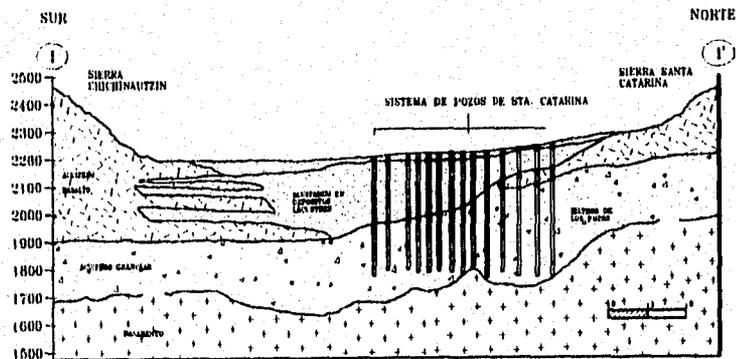


Figura 3.2. Sección hidroestratigráfica (Tomado de Ortega 1993).

CAPITULO 4

Discusión de Resultados



Figura 4.1: Vista general del sitio arqueológico.

4. DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Condiciones de flujo del agua subterránea en el acuitardo

La presencia de una gruesa secuencia de capas arcillosas sobreyaciendo a un acuífero, representaba la protección de este último a la infiltración de agua superficial proveniente de la precipitación pluvial, del agua de riego, o bien de canales de aguas negras que cruzan la planicie de Chalco, sin embargo la determinación de la inversión del gradiente hidráulico en el área, así como de la ocurrencia de grandes fluctuaciones en la carga hidráulica (Ortega, 1993), indica la actividad del flujo subterráneo a través del acuitardo y en consecuencia la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. El siguiente análisis permitirá evaluar esta vulnerabilidad a partir de los diversos parámetros hidráulicos del acuitardo lacustre, como son carga hidráulica, gradiente hidráulico y conductividad hidráulica.

La figura 4.1. muestra la distribución de la carga hidráulica vs. profundidad en los diferentes sitios de la sección de estudio. En esta figura se pueden definir dos zonas; la primera zona o zona superior, en donde los valores de carga hidráulica (h) son menores a 4 m, y la segunda zona o zona inferior que se inicia con un cambio brusco en el perfil de la carga hidráulica (h), incrementando su valor desde 4 m hasta un valor similar al del espesor del acuitardo en cada sitio.

La figura 4.1.a. muestra que en el sitio N23, con 10 metros de espesor, la profundidad de la primera zona es de 0 a 8 m, mientras que la segunda se encuentra entre 8 y 10 m de profundidad.

La figura 4.1.b. muestra que en el sitio con 15 metros de espesor (N20), la profundidad de la primera zona abarca los primeros 11 metros de espesor; y la segunda entre 11 y 15 m. La figura

4.1.c. en el sitio N14, en donde el acuitardo tiene 35 metros de espesor, la primera zona se extiende hasta los 22 metros de profundidad, mientras que la segunda se ubica entre 22 y 35 metros de profundidad (v. Tabla 4.1). En general puede apreciarse que aproximadamente las primeras 3/4 partes del espesor del acuitardo en cada sitio presentan variaciones pequeñas de carga hidráulica y la cuarta parte que es la más profunda, muestra grandes variaciones de carga.

Los gradientes hidráulicos, definidos por la pérdida de carga por unidad de longitud vertical en los tres sitios, determinan que el flujo de agua subterránea a través del espesor total del acuitardo es descendente (v. Tablas 4.2 a 4.4). El gradiente hidráulico en la zona superior es de 0.63, 0.53, y 0.14 en los sitios N23, N20 y N14 respectivamente; mientras que en la zona inferior es de 2.6, 2.2 y 1.4 para cada uno de estos sitios (v. Tabla 4.1). Lo que representa una variación promedio del gradiente hidráulico de 0.49 en la zona superior, y de 1.2 en la zona inferior. El gradiente hidráulico total a través de todo el espesor del acuitardo es unitario en los sitios de menor espesor (N23 y N20), mientras que en el sitio donde el acuitardo tiene un espesor de 35 m (N14) el gradiente es de 0.66

La figura 4.2. muestra los perfiles de conductividad hidráulica (K), en la sección de estudio, cuyos intervalos varían de $1 \cdot 10^{-8}$ m/seg. a $1 \cdot 10^{-10}$ m/seg. Con base en la distribución de K, se definen también dos zonas: la zona superior con valores mayores a $1.5 \cdot 10^{-9}$ m/seg., y la zona inferior con valores menores a este. La profundidad de esta primera zona coincide con aquella definida a partir de la carga hidráulica (<4 m) y el gradiente hidráulico (<0.63) (v. Tabla 4.1).

La figura 4.2.a. muestra que en el sitio con 10 metros de espesor (N23) el intervalo de variación de K es de $1.4 \cdot 10^{-8}$ m/seg. a $8 \cdot 10^{-10}$ m/seg.; en la figura 4.2.b. se observa que en el sitio con 15 metros de espesor (N20), este intervalo es de $1.1 \cdot 10^{-8}$ m/seg. a $1.6 \cdot 10^{-10}$ m/seg.; la figura 4.2.c.

representa el sitio con espesor de 35 m (N14) en donde el intervalo de variación es entre $5.2 \cdot 10^{-8}$ m/seg. a $1 \cdot 10^{-10}$ m/seg. (v. Tabla 4.1). En general se observa que la conductividad hidráulica (K) disminuye con la profundidad.

La figura 4.3. muestra la distribución de la velocidad lineal promedio, calculada a partir de la ley de Darcy, descrita por la ecuación, $v = K \cdot i / n$, en donde v representa la velocidad, K la conductividad hidráulica, i el gradiente hidráulico y n la porosidad la cual varía entre 0.4 y 0.8. (Ortega, op. cit.). Dado que la zona con alto valor de conductividad hidráulica presenta un bajo gradiente hidráulico y viceversa, la distribución de la velocidad al igual que la del caudal específico se encuentra dominada por esta tendencia (v. Tablas 4.2 a 4.4)

En la figura 4.3. se observa que los valores de velocidad (v) en la zona superior son mayores que los de la zona inferior de cada sitio (v. Tabla 4.1), con una porosidad (n) de 0.4, estos valores fluctúan entre 0.004 m/año y 1.12 m/año, mientras que con una porosidad (n) de 0.8, estos valores son de la mitad de los anteriores, es decir entre 0.002 m/año y 0.84 m/año. El caudal específico (q) se calculó a partir de la ecuación de Darcy: $q = K \cdot i$. La figura 4.4. presenta la distribución del caudal específico (q), a lo largo de la sección, en la zona superior definida a partir de altos valores de conductividad hidráulica ($K > 1.5 \cdot 10^{-9}$ m/seg.), y bajos gradientes hidráulicos ($i < 0.63$), se presenta un valor mínimo en el caudal específico de $0.001 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}^2$ y un valor máximo de $0.5 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}^2$, en la zona inferior definida a partir de bajos valores de conductividad hidráulica ($K < 1.5 \cdot 10^{-9}$ m/seg.), y altos gradientes hidráulicos ($i > 0.63$), se observa un valor máximo del caudal específico de $0.67 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}^2$ y un valor mínimo de $0.004 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}^2$ (v. Tabla 4.1).

Considerando el valor máximo se tiene que de un contaminante no reactivo expuesto en un área

de 100 m², se incorporarán 67 m³/año hacia el acuitardo, en caso de existir volúmenes importantes del contaminante en la fuente.

SITIO	ZONA	Prof.(m)	i	K(m/seg.)	v(m/año)	q(m ³ /a/m ²)
N23	SUPERIOR	0-8	0.63	1.4*E-8 - 2.3*E-9	0.65-0.04	0.3-0.01
	INFERIOR	8-10	2.6	7.3*E-9 - 8*E-10	1.67-0.14	0.67-0.05
N20	SUPERIOR	0-11	0.53	1.1*E-8 - 3.8*E-9	1.12-0.18	0.5-0.07
	INFERIOR	11-15	2.2	2.3*E-10-1.6*E-10	0.03-0.02	0.012-0.01
N14	SUPERIOR	0-20	0.14	5.2*E-8 - 1.5*E-9	0.5-0.004	0.2-0.001
	INFERIOR	20-35	1.4	2.3*E-9 - 1*E-10	0.1-0.01	0.04-0.004

Tabla 4.1 Parámetros hidráulicos medidos.

Lo anterior permite concluir que la zona superior en cada sitio presenta una mayor permeabilidad y en consecuencia un diferente comportamiento hidráulico, lo cual se puede relacionar con la presencia de fracturas reportadas en trabajos previos (Ortega, 1993).

4.2 Profundidad de Flujo Activo

La figura 4.5. muestra los perfiles de carga hidráulica verticales para diferentes periodos de tiempo a lo largo del año; en época de lluvia (Junio, Agosto) y de secas (Diciembre, Abril, Mayo),

medidos en los sitios N20 y N14, ya que en el sitio N23 no se cuenta con registros periódicos.

La figura 4.5.a. para el sitio con espesor de 15 metros (N20), presenta fluctuaciones estacionales de la carga hidráulica mayores a 1.5 metros, a profundidades entre 2 y 11 metros, mientras que a mayor profundidad el nivel piezométrico presenta fluctuaciones estacionales menores a 0.40 m.

La figura 4.5.b. muestra en el sitio con espesor de 35 metros (N14), fluctuaciones estacionales de la carga hidráulica hasta de 4 m a través de los 20 metros superiores del perfil, conservándose constante a mayor profundidad.

Las fluctuaciones estacionales mayores a 0.50 m registradas en los piezómetros cercanos a la superficie son indicativos de fracturas, mientras que fluctuaciones menores observadas a mayor profundidad indican que las fracturas no contribuyen significativamente al flujo de agua subterránea o bien que su amplio espaciamiento no permite su influencia en la respuesta de los piezómetros. Resultados similares fueron reportados por Ruland et al. (1991), en arcillas glaciolacustres en Canadá.

Los datos anteriores muestran que la profundidad estimada de la zona hidráulicamente activa para el sitio con 15 metros de espesor (N20), es de 11 metros y de 20 metros para el sitio con 35 metros de espesor (N14). Estas profundidades coinciden con la zona superior, definida previamente a partir de la carga hidráulica y la permeabilidad a lo largo de la sección en los piezómetros cercanos a la superficie del terreno, en donde la probabilidad de intersectar fracturas es mayor. Por lo que puede concluirse que la zona superior se encuentra densamente fracturada mientras que la zona inferior presenta menor densidad de fracturas. Este comportamiento debe controlar la distribución y migración de tritio en el acuitardo.

4.3. Velocidad y tiempos de residencia del agua subterránea en el acuitardo.

Para evaluar el comportamiento hidráulico del acuitardo como unidad, o bien, como la integración de dos zonas, dada la anisotropía inherente debido a la presencia de diversas capas lacustres, se calcularon los promedios efectivos o armónicos, en los cuales a diferencia de los aritméticos los valores más pequeños dominan en el promedio, es decir que el flujo vertical es dominado por las capas menos permeables (Frind, 1993), como es el caso de la conductividad hidráulica efectiva (K_{efec}) la cual se obtuvo por medio de la ecuación de:

$$K_{efec} = b / (b_i / K_i)$$

Considerando además un gradiente hidráulico promedio (i_{prom}).

$$i_{prom} = h_i / b$$

En donde b representa el espesor total del acuitardo, b_i el intervalo a que corresponde el valor de K y h_i la pérdida de carga en el intervalo considerado.

A partir de estos valores se calcularon la velocidad lineal promedio equivalente (v_{efec}), la distancia efectiva (d_{efec}), el caudal específico (q), y tiempo de residencia (TR), empleando las ecuaciones de:

$v_{efec} = (K_{efec} * i_{prom}) / n$. En donde n es la porosidad mínima de 0.4 estimada por Ortega op. cit.

$d_{efec} = v_{efec} * \text{período de inversión}$ estimado para cada sitio de 40, 30 y 20 años, (Ortega, 1993),

$q_{efec} = K_{efec} * i_{prom}$, y $TR = b / v_{efec}$. En donde b representa el espesor del acuitardo en cada sitio, los resultados se enlistan en la tabla 4.5.

Tomando en cuenta las zonas superior e inferior se calcularon los valores de K_{sup} y K_{inf} , i_{sup} e i_{inf} , así como los parámetros derivados de estos.

Los valores de i_{prom} , i_{sup} , e i_{inf} , son aquellos obtenidos para los sitios N23, N20 y N14 anteriormente, es decir i_{prom} : 0.99, 0.95 y 0.66; i_{sup} : 0.63, 0.53, 0.14, e i_{inf} : 2.62, 2.19 y 1.42 respectivamente. (v. Tabla 4.5).

Los valores de K_{efec} representan un promedio de este parámetro en el espesor total del acuitardo en cada sitio, es decir en el sitio N23 el promedio de la conductividad hidráulica únicamente en la dirección vertical es de $3.91E-09$ m/seg., en el sitio N20 este promedio es de $6.56E-10$ m/seg., y en el sitio N14 de $2.71E-10$ m/seg., este promedio indica, a diferencia de los datos medidos, una menor permeabilidad en la dirección vertical, debido al método de análisis que resalta la K menor. Considerando únicamente los valores de K en los primeros 8, 11 y 20 metros de cada sitio, como zona superior se tienen valores promedios de K_{sup} : $8.6E-09$ m/seg., $8.1E-09$ m/seg., $4.31E-09$ m/seg. y en los metros inferiores K_{inf} : $1.44E-09$ m/seg., $1.86E-10$ m/seg. y $1.21E-10$ m/seg. en forma respectiva. Lo que permite observar la permanencia de la zona de mayor permeabilidad vertical en la parte superior del acuitardo.

A partir de estos valores se obtienen los promedios de la velocidad (v_{efec}) en el espesor total del acuitardo con valores de 0.3 m/año, 0.05 m/año, 0.013 m/año en cada sitio.

Considerando una zona superior y una inferior en cada sitio, tal como se observa en la realidad, se tienen los valores para la zona superior de v_{sup} : 0.4 m/año, 0.32 m/año, 0.05 m/año respectivamente y los valores para la zona inferior de v_{inf} : 0.3 m/año, 0.03 m/año, 0.01 m/año, en los sitios N23, N20 y N14.

A partir de los promedios del espesor total del acuitardo, tomando en cuenta el periodo de inversión para cada sitio, se obtiene la distancia efectiva (d_{efec}) recorrida en cada uno de ellos, siendo de; 12.02 m, 1.5 m, y 0.28 m, a diferencia de aquellos obtenidos a partir de una zona

superior y una inferior, en donde la distancia recorrida en la zona superior (d_{sup}), es de 15.5 m, 9.7 m, y 1 m en los sitios N23, N20 y N14 respectivamente y una distancia inferior (d_{inf}) de; 11.7 m, 0.95 m y 0.26 m en cada sitio, observando que los mayores desplazamientos ocurren en la zona superior (v. tabla 4.5).

Por lo anterior se concluye que la zona superior representa una zona de mayor permeabilidad con valores promedio de K_{sup} mayores a $4.3E-09$ m/seg., lo que implica una estrecha relación con la presencia de fracturas, presentando velocidades superiores a aquellas de la zona inferior en donde la K_{inf} es menor a $1.4E-09$ m/seg., es decir que esta zona representa la zona de baja permeabilidad con velocidades menores a 0.01 m/año.

Los tiempos de residencia mínimos calculados, a través del espesor total del acuitardo para los sitios N23, N20 y N14 es de; 33 años, 300 años, y 2700 años, respectivamente.

El caudal específico promedio a lo largo de la sección, calculado a partir de la ecuación de $q=K \cdot i$, es de 0.12 m³/año/m² en el sitio N23, 0.02 m³/año/m² en el sitio N20, y de 0.005 m³/año/m² en el sitio N14, lo que representa una recarga por unidad de área a partir de la inversión del gradiente hidráulico para cada sitio de; 4.8 m³, 0.6 m³, y 0.01 m³. En la zona superior el caudal específico superior es de; 0.16 m³/año/m², 0.13 m³/año/m² y 0.02 m³/año/m², lo que significa una recarga de; 6 m³, 4 m³ y 0.4 m³ respectivamente (v. tabla 4.5).

4.4 Distribución de tritio.

4.4.1 Marco teórico.

El tritio como un isótopo radiactivo del hidrógeno (^3H), con vida media de 12.43 años, se ha convertido en una importante herramienta de la hidrogeología en las últimas décadas, debido a su incremento en la concentración atmosférica en los años 50's, producto de las pruebas nucleares iniciadas en 1953 por E.U. y la U.R.S.S., lo cual dio lugar a altas concentraciones de tritio en la precipitación pluvial. Los niveles de concentración de tritio en la atmósfera del hemisferio norte (E.U. y Canadá) en el año de 1953 era de 5-10 UT (Unidad de Tritio), posterior a la denominada era nuclear este nivel se incrementó a cientos e incluso miles de UT (Egboka, 1982), cuya concentración desciende en forma proporcional hacia el hemisferio sur (Robertson, 1989).

En el agua subterránea la mayor concentración de tritio es identificable como un pico que indica la presencia de agua de recarga posterior al incremento nuclear, en contraste con aquella de baja concentración anterior a las pruebas nucleares. El tritio se emplea principalmente para datar aguas relativamente modernas (Freeze and Cherry 1979), ya que no es afectado por otras reacciones mas que por decaimiento radiactivo, y puede ser considerado como un trazador conservativo. Por tal motivo en México, la detección de tritio, en niveles superiores al límite de detección (± 1 UT), indicarán la presencia de agua infiltrada al acuitardo en los últimos 50 años, mientras que su ausencia representaría que la recarga es nula o que la concentración de tritio ya alcanzó al acuífero subyacente.

El incremento de tritio en la atmósfera, excepcionalmente alto durante los años 60's, define una

función que es conocida como "pico de tritio". La infiltración del agua meteórica hacia el agua subterránea permite definir un pico similar, donde la concentración de tritio varía con la profundidad (Ruland et al, 1991).

4.4.2 Distribución de tritio en la atmósfera

La figura 4.6. muestra la concentración de tritio en la estación de Veracruz, en donde se observa una concentración máxima de tritio de 465 UT en el año 1965, mientras que durante la década de los 70's el valor máximo fue de 45 UT, a partir de entonces la concentraciones reportadas descienden en forma continua hasta ser menores a 1 UT en 1990.

La figura 4.7. muestra las concentraciones observadas en la estación Chihuahua, en donde la concentración máxima es de 720 UT en el año 1965, mientras que durante el período de 1970 a 1985 las concentraciones disminuyen de 406 UT a 10 UT para desaparecer prácticamente durante la década de los 90's.

Lo anterior permite observar que las concentraciones máximas encontradas en la estación Veracruz son inferiores hasta 255 UT, en comparación con las reportadas en la estación Chihuahua, esto se debe a la cercanía de la fuente emisora en Estados Unidos, mientras que la estación Veracruz se encuentra a gran distancia de ésta. Las concentraciones de tritio esperadas en la ciudad de México deben ser ligeramente superiores a las de la estación Veracruz y mucho menores que aquellas de la estación Chihuahua.

4.4.3. Distribución de tritio en el acuitardo de Chalco.

De los tres sitios estudiados en la presente tesis, únicamente en el sitio con espesor de 35 metros (N14), se detectó la presencia de tritio. Mientras que en los sitios con espesores de 10 m (N23) y 15 m (N20), no se detectó tritio a través del acuitardo. Cabe recordar que en estos dos sitios los análisis fueron con la técnica de tritio enriquecido, con un límite de detección de 1 UT; por lo que en caso de existir tritio en el subsuelo, este se encuentra en concentraciones menores a 1 UT.

La figura 4.8. muestra la distribución de tritio en el sitio N14, analizado por medio de la técnica de tritio-helio con un límite de detección de 0.1 UT. En esta figura se observa que el pico de tritio se ubica a 5 metros de profundidad con una concentración máxima de 4.9 UT. Considerando que la inversión del gradiente hidráulico se llevó a cabo hace aproximadamente 20 años en el sitio N14, la velocidad promedio de transporte del pico de tritio es de al menos 0.25 m/año. Mientras que, en los sitios N23 y N20, donde la inversión de los gradientes hidráulicos se llevó a cabo hace aproximadamente 40 y 30 años respectivamente, de acuerdo con la velocidad promedio (aritmética y armónica) del agua subterránea calculada y del inicio de infiltración de tritio al acuitardo (1960), para cada sitio, en el sitio N23 el tritio se ubicaría a 12 m de profundidad considerando una velocidad promedio aritmética superior de 0.34 m/año y a 14 metros de profundidad con una velocidad efectiva superior (V_{eq}) de 0.4 m/año. En el sitio N20 el pico se ubicaría a 19.5 metros de profundidad considerando la velocidad promedio aritmética superior de 0.65 m/año y a 10 metros considerando la velocidad efectiva superior de 0.34 m/año. Por lo que se corrobora totalmente la ausencia de tritio en el sitio N23 y parcialmente en el sitio N20 lo que se analizará posteriormente.

4.5 Modelo conceptual de la migración de tritio en el acuitardo.

En la figura 4.9. se ilustra un modelo conceptual basado en los resultados descritos anteriormente. Este modelo está integrado por un acuitardo arcilloso, de 10 a 35 metros de espesor a lo largo de la sección de estudio, y con la presencia de fracturas cuya densidad es mayor cerca de la superficie del terreno de acuerdo con las mediciones hidráulicas. En el modelo se muestra también al acuitardo sobreyaciendo al acuífero granular, importante productor de agua subterránea en el área.

La inversión del gradiente hidráulico en el espesor total del acuitardo a lo largo de la sección de estudio, se estima en 40, 30 y 20 años en los sitios de menor a mayor espesor respectivamente (N23, N20 y N14) (Ortega 1993), por lo que el ingreso de tritio al acuitardo lacustre por medio de la infiltración de agua meteórica, se inició primero en donde el espesor del acuitardo es más delgado (N23), posteriormente en el sitio N20 y finalmente en el sitio N14. La diferencia del ingreso de tritio de un sitio a otro fue de aproximadamente 10 años.

En este esquema el pico de tritio que ingresó en los sitios con espesores de 10 m (N23) y 15 m (N20) ya migró a través del acuitardo y se incorporó al acuífero subyacente, por lo que no se detectó en ambos sitios. En el caso del sitio con espesor de 35 m, la inversión del gradiente hidráulico y la incorporación de tritio se llevó a cabo en fechas más recientes por lo que el pico de tritio se ubica a una profundidad menor a 5 m. De acuerdo con estudios previos en el área, puede sugerirse que el transporte de este trazador a través del acuitardo es controlado por procesos de advección y dispersión a lo largo de las fracturas y por difusión molecular a través de la matriz porosa (Ortega, 1993). Ortega (1993), encontró a través de simulaciones numéricas calibradas

con datos de campo, que el espaciamento entre fracturas varía entre 1.5 m, con una apertura de 30 a 50 μm .

4.6 Modelación matemática

Con el fin de analizar la migración de tritio a través del acuitardo lacustre de Chalco se consideró un medio equivalente granular, ya que no existen modelos en medios fracturados que permitan la incorporación de fuentes variables en el tiempo. Por tal motivo se utilizó la ecuación de advección-dispersión, definida por :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - V \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) - \lambda C \dots \dots \dots (1)$$

en donde:

- λ es la constante de decaimiento radiactivo (0.05634 año⁻¹ para ³H), v la velocidad efectiva de flujo (Mann et al., 1982).
- C la concentración del trazador,
- D_y es el coeficiente de la dispersión hidrodinámica ($D_y = \alpha_1 v + D^*$), en donde D^* es el coeficiente de difusión molecular), y α_1 dispersividad longitudinal.

La demostración de esta ecuación se presenta en Bear (1972) y Frind et al (1985)

4.6.1. Condiciones iniciales y de frontera

La ecuación unidimensional de transporte por advección-dispersión, presentada anteriormente,

considera que el flujo es unidireccional en la frontera superior. Las consideraciones en la modelación son:

- El bombeo de pozos cercanos al límite del acuitardo comienza a influir en el acuífero regional en 1960 (Ortega et al. 1991).
- La detección de tritio en la atmósfera se inicia en los 60's.

Las condiciones iniciales y de frontera para los sitios de menor espesor se definen como:

$$T_0 = 1960$$

$$C(y=0, t) = C_0 \exp(-\gamma t)$$

$$C(y=\alpha, t) = 0$$

en donde γ representa la constante de decaimiento radiactivo para la fuente.

Para el sitio con espesor de 35 metros se establece la condición de $T_0 = 1970$ tiempo estimado en que ocurrió la inversión del gradiente hidráulico (Ortega, 1993).

Por tratarse de un sistema transitorio, se especifican las siguientes condiciones iniciales:

- $C(y, t=0) = 0$
- El dominio unidimensional considerado comprende 35 metros en la dirección de y (vertical).

La solución propuesta por B.C.E. Egboka et al. (1983) donde la concentración del trazador varía con el tiempo es la siguiente:

$$C(y, t) = \frac{1}{2} C_0 \exp(-\gamma * t) \left[\exp\left(\frac{V_y}{2D_y} - \frac{y}{\sqrt{D_y}} * \sqrt{\frac{V^2}{4D_y} + \lambda - \gamma} * \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_y}t} - \sqrt{\frac{V^2}{4D_y} + \lambda - \gamma} * t\right) \right. \right. \\ \left. \left. + \exp\left(\frac{V_y}{2D_y} + \frac{y}{\sqrt{D_y}} * \sqrt{\frac{V^2}{4D_y} + \lambda - \gamma} * \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_y}t} + \sqrt{\frac{V^2}{4D_y} + \lambda - \gamma} * t\right) \right] \dots \dots \dots (2)$$

Donde λ es la constante de decaimiento radiactivo para el ^3H de $0.05634 \text{ años}^{-1}$

Para representar la variabilidad temporal de la concentración de tritio en la infiltración de la zona de recarga, se empleó el método de soluciones de superposición (Egboka, 1983). La función de entrada de tritio para cada año durante el período 1960-1987, se convirtió en una función escalón con intervalos de un año, promediando cada año en forma individual. Para generar la respuesta de entrada se utilizó la ecuación (2) con una concentración fuente de uno, esta respuesta unitaria se adaptó de acuerdo a la magnitud de la concentración de entrada para cada año del período 1960-1987 ó 1970-1987, los resultados se superpusieron para obtener la concentración total de tritio como una función de distancia y tiempo.

4.7 Resultados de la modelación

4.7.1. Sitio N14, (espesor de 35 m)

Empleando la función de tritio de Veracruz y a partir del período de inversión para cada sitio, se calibró el modelo para diferentes valores de velocidad y de dispersividad, con un valor de difusión molecular de $0.02 \text{ m}^2/\text{año}$ (National Research Council, 1929), y factor de retardo de 1, tomando como punto de referencia el perfil de tritio medido en el sitio N14.

La figura 4.10. muestra la distribución de tritio, a diferentes valores de dispersividad como son; 0.02 m , 0.05 m , 0.1 m y 1.0 m . La variación de este coeficiente no causa cambios importantes en la distribución del pico de tritio, sin embargo el valor que mejor simula la concentración medida en campo es una dispersividad de 0.02 m .

La figura 4.11. muestra la sensibilidad del modelo a los cambios de velocidad con valores de 0.4, 0.3 y 0.2 m/año. Se observa que el modelo alcanza una concentración pico de 2.5 UT a una profundidad de 5 metros con la velocidad de 0.2 m/año.

En el caso de la función de tritio en la estación de Chihuahua, para el mismo período de tiempo (70-87), la figura 4.12., muestra que no existen grandes variaciones a los cambios de dispersividad considerados, sin embargo para el mismo período de tiempo, la figura 4.13. muestra para la función de Chihuahua, con una dispersividad de 0.02 m, que la concentración es mayor (6.5 UT) a una velocidad de 0.2 m/año, alcanzando una profundidad de 5 metros.

Lo anterior permite concluir para el sitio N14 con 35 metros de espesor que la dispersividad y velocidad que mejor simula el comportamiento de la curva de campo son; dispersividad $\alpha_1=0.02$ m, y velocidad $v=0.2$ m/año. El cual coincide con el promedio de velocidad aritmética superior calculada de 0.25 m/año.

4.7.2. Sitios N20 y N23 (espesores de 15 y 10 m) .

Con el fin de comprobar que el pico de tritio en los sitios N20 y N23, ya rebasó el espesor del acuitardo, se realizaron una serie de simulaciones las cuales se muestran en las figuras 4.14 a 4.17. Empleando las funciones de tritio en la estación de Veracruz y en la estación Chihuahua en el período 60-87, se calibra el modelo para los sitios N23 y N20 con 10 y 15 metros de espesor considerando un período de inversión de 40 y 30 años respectivamente. La figura 4.14. muestra la sensibilidad de la dispersividad con valores de 0.02, 0.1 y 1.0 m, del modelo en la función de tritio de la estación de Veracruz, en donde la profundidad del pico de tritio se mantiene a 20 metros,

con una concentración del pico que varía desde 2 UT hasta 10 UT.

Empleando la dispersividad de 0.02 m, que se obtuvo de la calibración en el sitio N14, la figura 4.15. muestra el comportamiento del pico de tritio a diferentes valores de velocidad desde 0.2 m/año hasta 0.7 m/año, cuyo rango considera los valores de velocidad efectiva (v_{efc}), y velocidad superior (v_{sup}) de los sitios N20 y N23 (Tabla 4.5). En el sitio N23, con una velocidad de 0.4 m/año (v_{sup}), la concentración pico resultante es de 7.5 UT a una profundidad de 12 metros, antes de esta profundidad las concentraciones simuladas son de 1 a 1.5 UT.

Para el sitio N20, para el cual se obtuvo una velocidad superior máxima (V_{sup}) de 0.34 m/año (v. Tabla 4.5), y un intervalo de velocidad superior de 0.18 a 1.12 m/año (Tabla 4.2), la figura 4.15. muestra que con una velocidad de 0.4 m/año, la profundidad del pico alcanzada sería de 12 metros con una concentración pico de 7.5 UT con una dispersividad de 0.02 m. Sin embargo considerando una velocidad de 0.7 m/a, la profundidad del pico sería de 23 m con una concentración pico de 10 UT, lo que significa que el pico habría rebasado el espesor del acuífero a 15 metros de profundidad y únicamente registraría valores menores a 1 UT a menor profundidad, siendo este el límite de detección del método empleado de análisis de tritio enriquecido. La figura 4.16. muestra para la función de tritio de la estación de Chihuahua, durante el periodo 60-87, la sensibilidad a la dispersividad, en donde con un valor de dispersividad de 0.02 m, y una velocidad de 0.7 m/año, la concentración simulada es de 40 UT. Mientras que a una dispersividad de 0.1 m, la concentración calculada es de 12 UT sin variaciones en la profundidad del pico de tritio, pero no así en la distribución de este pico.

Las velocidades empleadas para calibrar el modelo con esta función fluctúan entre 0.2 y 0.6 m/año, la figura 4.17., muestra una concentración pico de 20 UT, a una profundidad de 5 m.

empleando una velocidad de 0.2 m/año, mientras que con una velocidad de 0.7 m/año la concentración pico es de 38 UT a una profundidad de 23 metros. El análisis anterior permite concluir que para el sitio N14 los valores que mejor simulan el comportamiento de campo, (considerando que la función de tritio de la estación de Veracruz, producirá valores inferiores a los esperados en la ciudad de México, mientras que la función de tritio en la estación de Chihuahua producirá valores superiores a estos), es para una velocidad de 0.2 m/año, y una dispersividad de 0.02 m, mientras que para el sitio N23 los valores de velocidad y dispersividad que muestran el paso del pico de tritio a través del espesor del acuitardo son; $v=0.4$ m/año y $\alpha_l=0.02$ m, los cuales concuerdan con los valores de velocidad superior calculados anteriormente (0.34 m/año, v. Tabla 4.5). Mientras que para el sitio N20 estos valores son de; $v=0.7$ m/año y $\alpha_l=0.02$ m, este valor de velocidad concuerda con el promedio aritmético del intervalo superior medido en campo (0.65 m/año), sin embargo como ocurre en el sitio N14 no concuerda con el promedio armónico calculado, lo anterior podría explicarse si únicamente se considerara un flujo vertical en los cálculos de la conductividad hidráulica y no una resultante de esta, es decir que el flujo vertical estaría dominado por las capas mas permeables.

TABLA 4.2. PARAMETROS MEDIDOS EN EL SITIO N23

PROFUNDIDA	CARGA	GRADIENTE	CONDUCTIVD	K _{perm}	VEL 1	VEL 2	CAUDAL
m	m		m/seg	m/seg	m/año	m/año	m ³ /año/m
					n=.8	n=.4	
-3	-1.5		2.06E-08				
-4	-1.6	0.1	3.93E-09	1.23E-08	0.047822	0.095645	0.038258
-5	-1.8	0.2	2.16E-09	3.05E-09	0.023678	0.047356	0.018942
-6	-3.25	1.45	2.5E-09	2.33E-09	0.131358	0.262712	0.105085
-7	-4.22	0.97	1.46E-08	8.7E-09	0.328108	0.656217	0.262487
-8	-4.66	0.44	1.39E-08	1.44E-08	0.246344	0.492687	0.197075
-9	-7.6	2.94	7.94E-10	7.35E-09	0.838815	1.67963	0.671852
-10	-9.9	2.3	8E-10	7.97E-10	0.071271	0.142542	0.057017

TABLA 4.3. PARAMETROS MEDIDOS EN EL SITIO N20

	PROFUNDIDA	CARGA	GRADIENTE	K	Kperm	VEL. 1	VEL. 2	CAUDAL
	m	m		m/seg	m/seg	m/ano	m/ano	m ³ /ano/m ²
	-2.8	-0.51071		9.92E-09				
-1.8	-4.6	-2.78444	1.263183	1.3E-08	1.15E-08	0.56263	1.12566	0.450264
-1.9	-6.5	-3.40737	0.327658	4.1E-09	8.55E-09	0.108088	0.217976	0.08719
-2.1	-8.6	-4.2536	0.403082	7.6E-09	5.85E-09	0.091676	0.183351	0.07334
-2.3	-10.9	-6.10087	0.803074	6.19E-11	3.83E-09	0.119586	0.239172	0.085889
-2.3	-13.2	-11.6409	2.408709	2.7E-10	1.86E-10	0.015541	0.031083	0.012433
-1.8	-15	-14.6652	1.791278	2E-10	2.35E-10	0.016367	0.032733	0.013093

TABLA 4.4. PARAMETROS MEDIDOS EN EL SITIO N14

PROFUND m	CARGA m	GRADIEN	K m/seg	Kprom m/seg	VEL1 m/ano n=.8	vel2 m/ano n=.4	caudal m3/ano/m
-2	-1.429		1.14E-08				
-3	-1.368	-0.061	1.46E-08	1.3E-08			
-4	-1.425	0.067	7.75E-08	4.61E-08	0.102054	0.204108	0.081643
-5	-1.392	-0.033	2.52E-09	4E-08			
-6	-1.39	-0.002	2.08E-09	2.3E-09			
-7	-1.355	-0.035	1.97E-09	2.3E-09			
-8	-1.333	-0.022	1.41E-09	1.69E-09			
-9	-1.34	0.007	3.7E-08	1.92E-08	0.005227	0.010454	0.004181
-10	-1.294	-0.048	6.77E-08	5.24E-08			
-11	-1.48	0.166	1.1E-09	3.44E-08	0.24877	0.49754	0.199018
-12	-1.034	-0.446	1.84E-09	1.47E-09			
-13	-1.625	0.591	1.71E-09	1.78E-09	0.040786	0.081572	0.032928
-14	-1.975	0.35	8E-09	4.65E-09	0.060066	0.132134	0.0528
-15	-2.15	0.175	1.24E-09	4.62E-09	0.031434	0.062869	0.025148
-17.5	-2.472	0.1288	5.52E-09	3.38E-09	0.016926	0.03385	0.01354
-20	-2.5	0.0112	4.6E-09	5.06E-09	0.002203	0.004407	0.001763
-22.5	-3.99	0.558	1.14E-10	2.36E-09	0.050956	0.101913	0.040765
-25	-7.17	1.312	1E-10	1.07E-10	0.005468	0.010937	0.004375
-27.5		-2.668	1E-10	1E-10			
-30	-17.47	6.968	1E-10	1E-10	0.027169	0.054339	0.021735
-32.5		-6.968	1E-10	1E-10			
-35	-23.83	9.532	1E-10	1E-10	0.03706	0.074121	0.029648

TABLA 4.5 RESUMEN DE VALORES PROMEDIO CALCULADOS

PARAMETRO	INTERVALO	RSD		INTERVALO	RSD		INTERVALO	R14	
		0.4	0.8		0.4	0.8		0.4	0.8
POROSIDAD	40 AÑOS	0.4	0.8	30 años	0.4	0.8	20 años	0.4	0.8
Iprom		0.88			0.88			0.88	
Kofec		3.91E-09 m/seg			6.56E-10 m/seg			2.71E-10 m/seg	
Vofec		0.3 m/año	0.15 m/año		0.05m/año	0.025 m/año		0.013 m/año	0.006 m/año
dfec		12.02 m	8 m		1.5 m	0.75 m		0.28 m	0.14 m
qofec		0.12 m3/año/m2			0.02 m3/año/m2			0.005 m3/año/m2	
Recarga		4.8 m3/m2			0.6 m3/m2			0.01m3/m2	
TR		33 años	88 años		300 años	600 años		2700 años	5400 años
		ZONA SUPERIOR							
Iaup	3-8 m	0.83		3-11 m	0.53		2-20 m	0.14	
Kaup	3-8 m	8.58E-09 m/seg		3-11 m	8.14E-09 m/seg		2-20 m	4.31E-09 m/seg	
Vaup	3-8 m	0.4 m/año	0.2 m/año	3-11 m	0.34 m/año	0.17 m/año	2-20 m	0.05 m/año	0.025 m/año
daup	3-8 m	16 m	8 m	3-11 m	10 m	5 m	2-20 m	1 m	0.5 m
qaup	3-8 m	0.18 m3/año/m2		3-11 m	0.13 m3/año/m2		2-20 m	0.02 m3/año/m2	
Recarga	3-8 m	8.4 m3/m2		3-11 m	3.06 m3/m2		2-20 m	0.4 m3/m2	
TR	3-8 m	25 años	50 años	3-11 m	47 años	94 años	2-20 m	700 años	1400 años
		ZONA INFERIOR							
Iinf	8-10 m	2.82		11-15 m	2.19		20-35 m	1.42	
Kinf	8-10 m	1.44E-09 m/seg		11-15 m	1.86E-10 m/seg		20-35 m	1.21E-10 m/seg	
Vinf	8-10 m	0.3 m/año	0.15m/año	11-15 m	0.03 m/año	0.015 m/año	20-35 m	0.01 m/año	0.005 m/año
dinf	8-10 m	12 m	6 m	11-15 m	0.95 m	0.48 m	20-35 m	0.26 m	0.13 m
qinf	8-10 m	0.11 m3/año/m2		11-15 m	0.012 m3/año/m2		20-35 m	0.005 m3/año/m2	
Recarga	8-10 m	4.7 m3/m2		11-15 m	0.38 m3/m2		20-35 m	0.11 m3/m2	
TR	8-10 m	118 años	233 años	11-15 m	500 años	1000 años	20-35 m	3500 años	7000 años

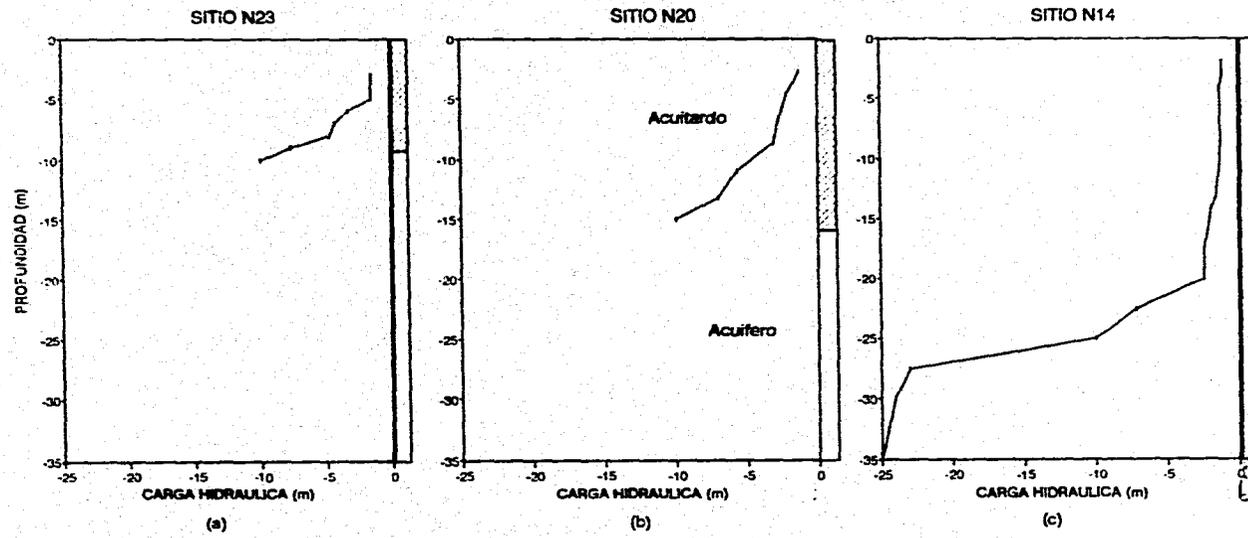


FIG. 4.1. DISTRIBUCION DE CARGAS EN LA SECCION

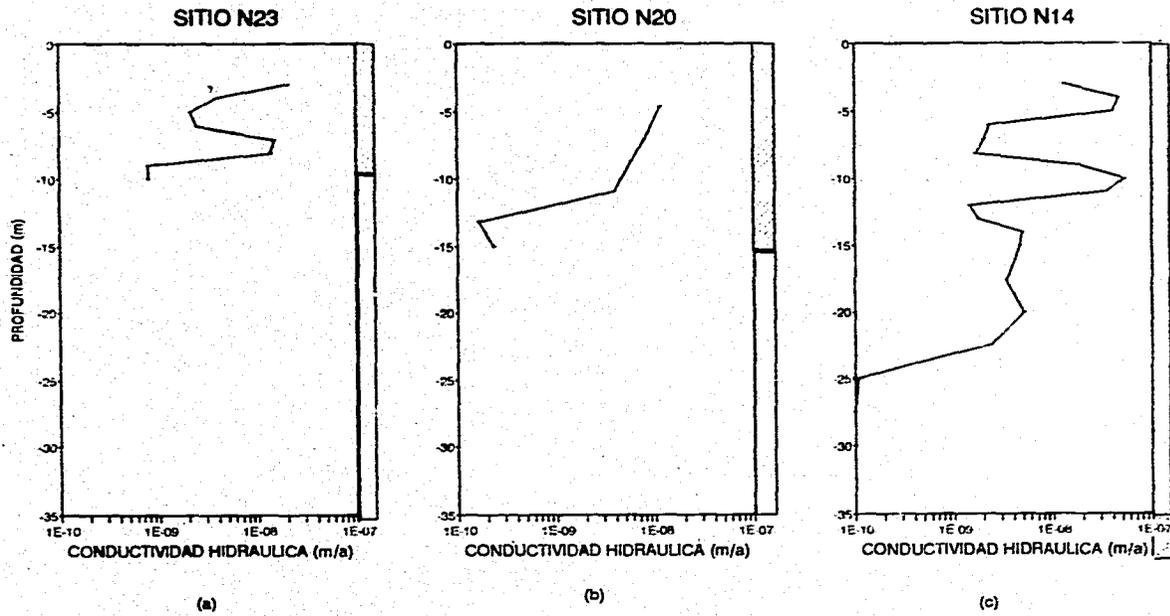


FIG. 4.2. DISTRIBUCION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LA SECCION.

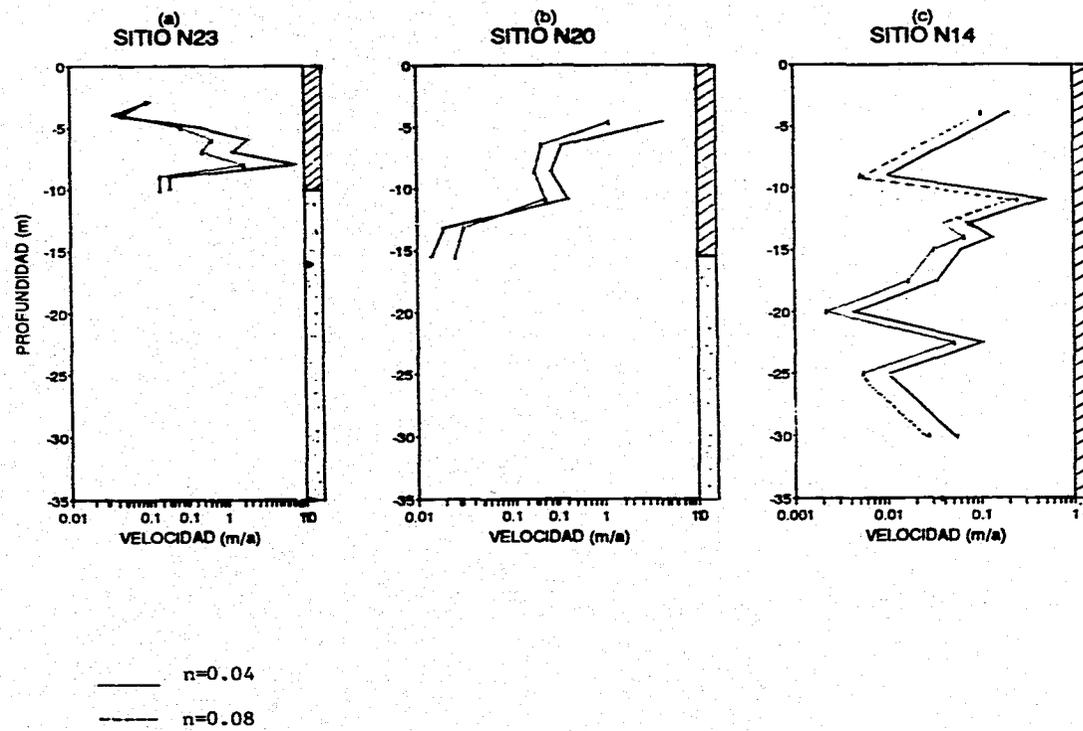


FIG.4.3. DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD EN LA SECCION

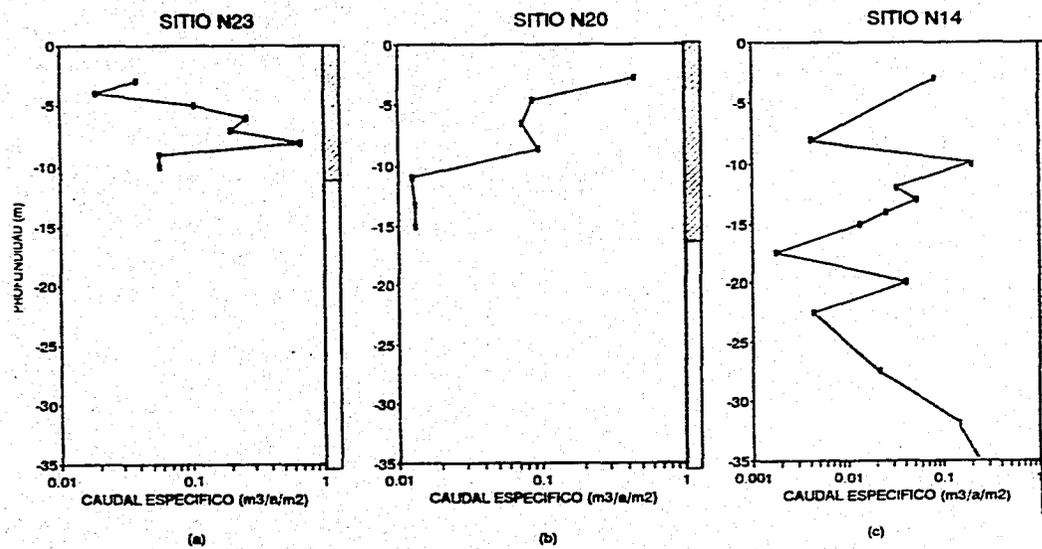


FIG.4.4 DISTRIBUCION DEL CAUDAL ESPECIFICO EN LA SECCION.

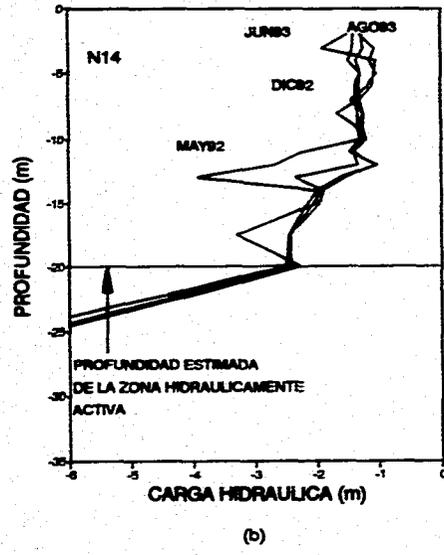
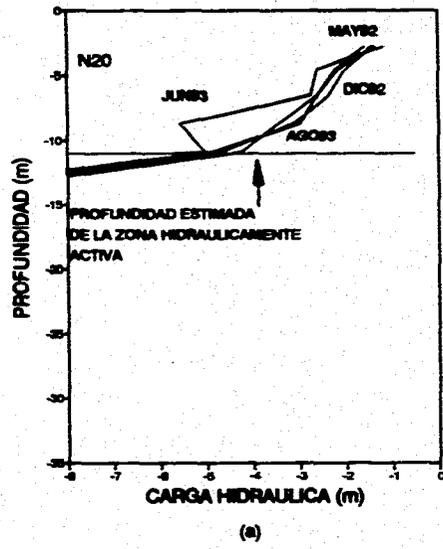


FIG. 4.5 FLUCTUACIONES DE LA CARGA HIDRAULICA CON LA PROFUNDIDAD

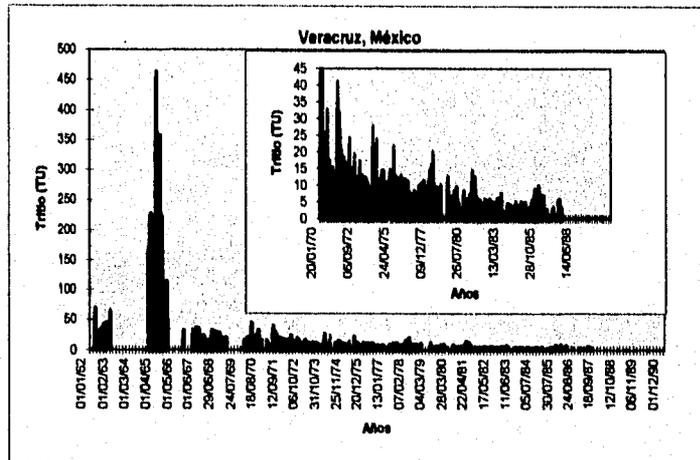


Figura 4.6. Función de Tritio estación Veracruz.

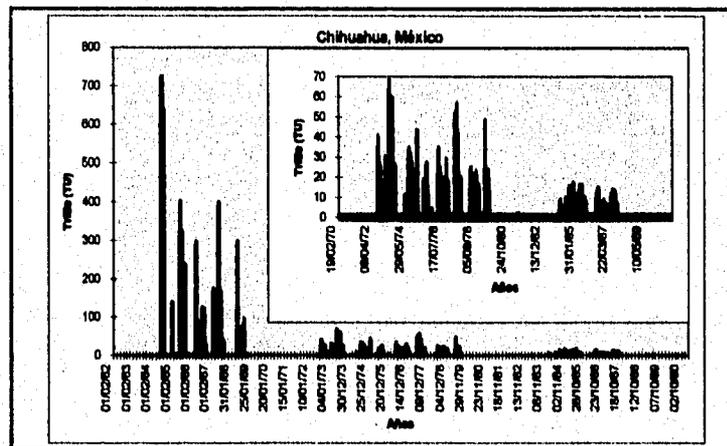


Figura 4.7 Función de Tritio estación Chihuahua.

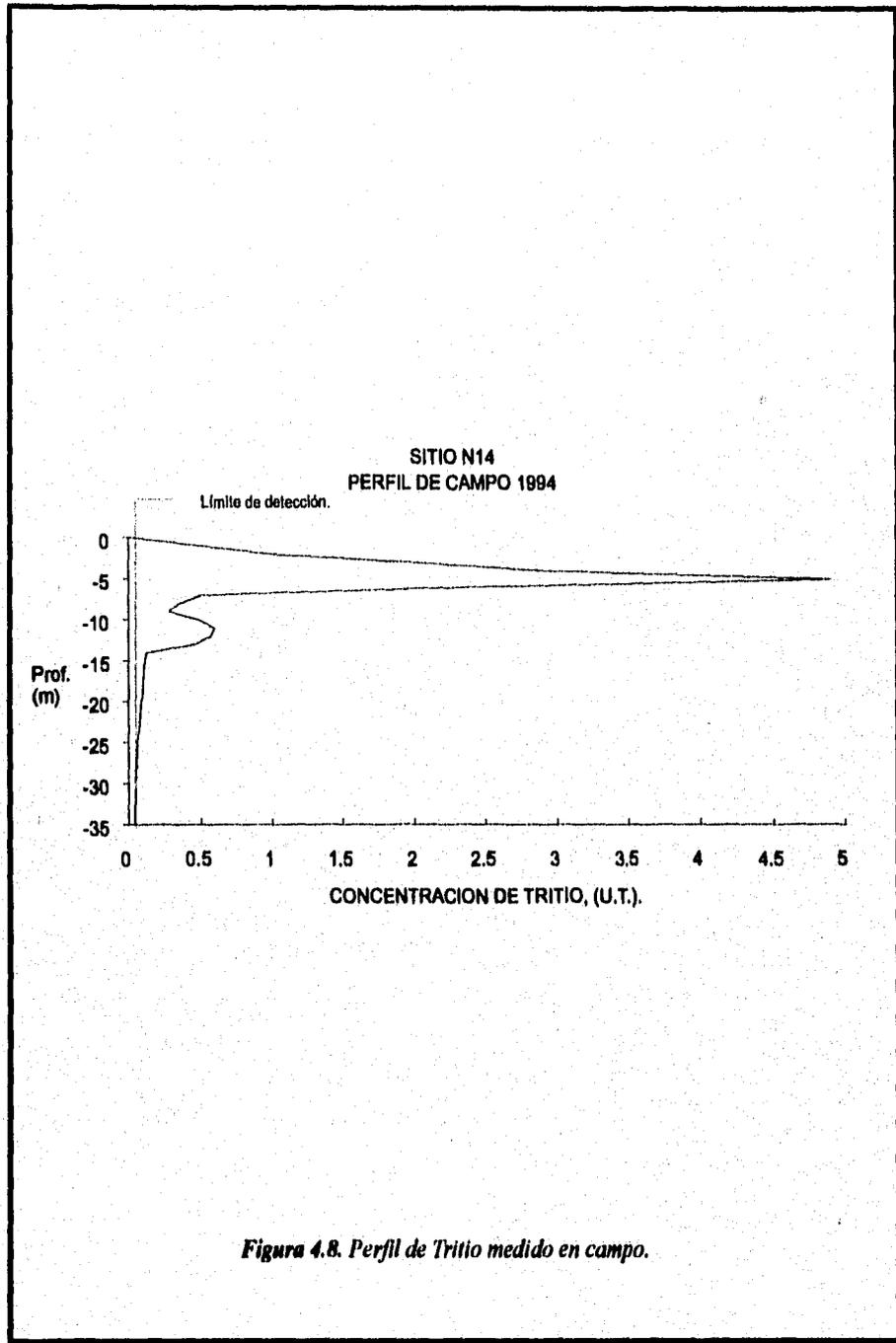


Figura 4.8. Perfil de Tritio medido en campo.

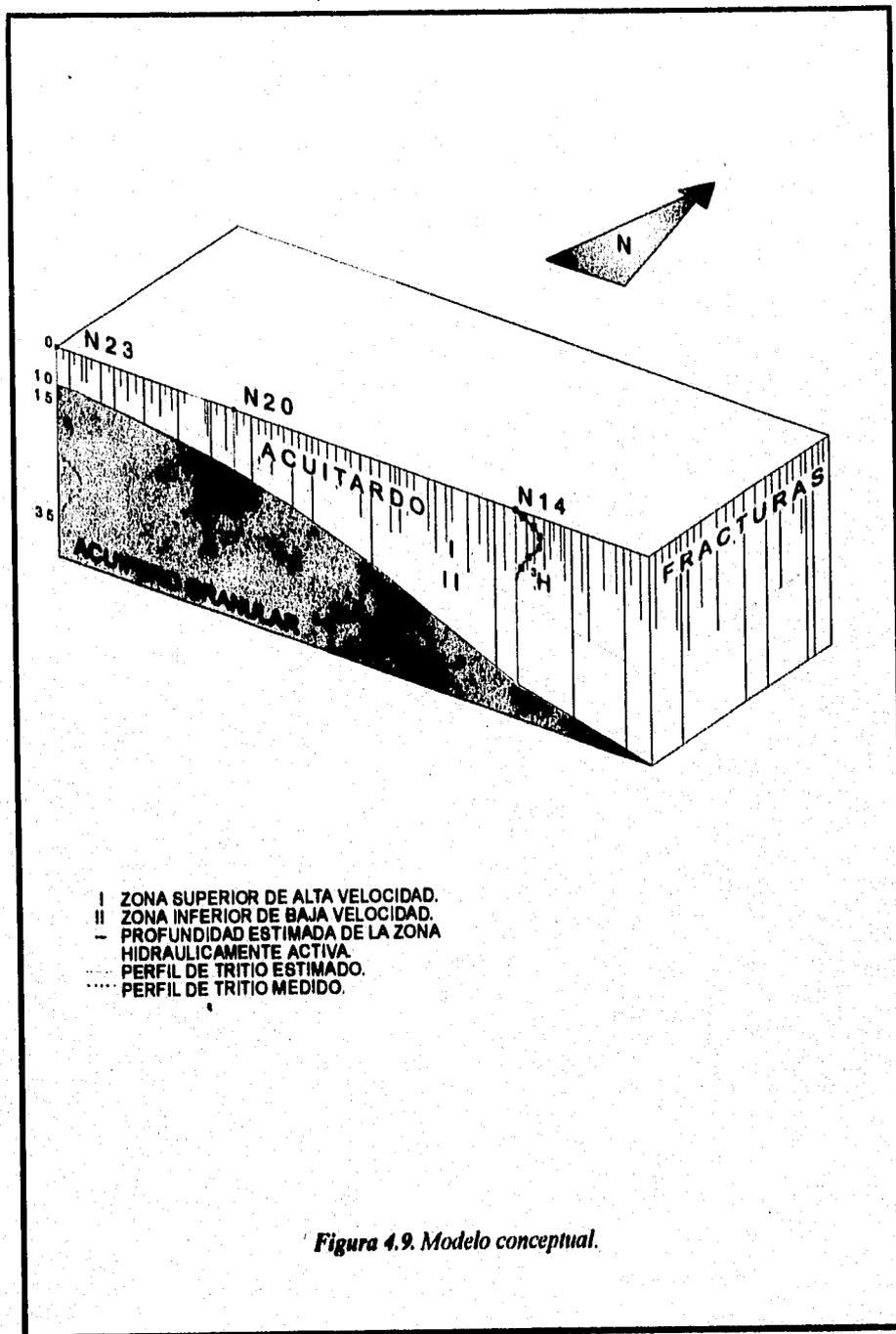


Figura 4.9. Modelo conceptual.

FUNCION VERACRUZ 70-87 PICO DE TRITIO DE 1994

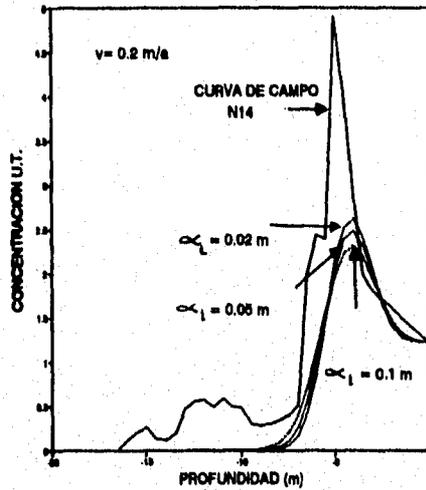


FIG. 4.10 SENSIBILIDAD A LA DISPERSIVIDAD

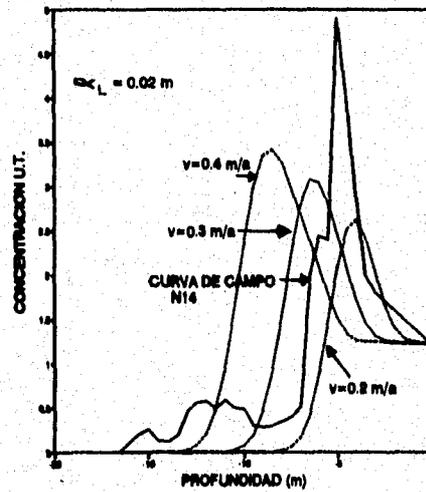


FIG. 4.11. SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD

FUNCION CHIHUAHUA 70-87, PICO DE TRITIO DE 1984

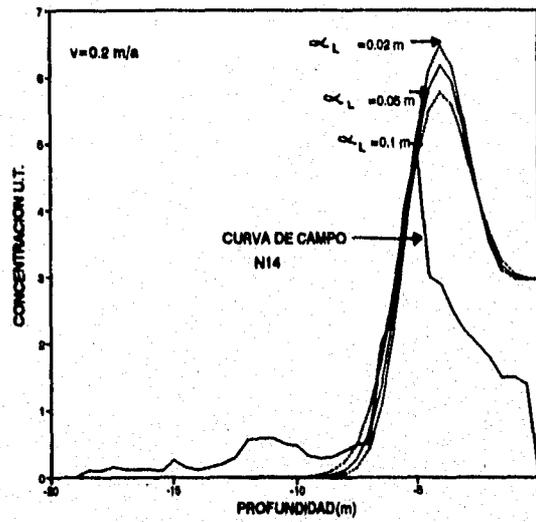


FIG. 4.12. SENSIBILIDAD A LA DISPERSIVIDAD

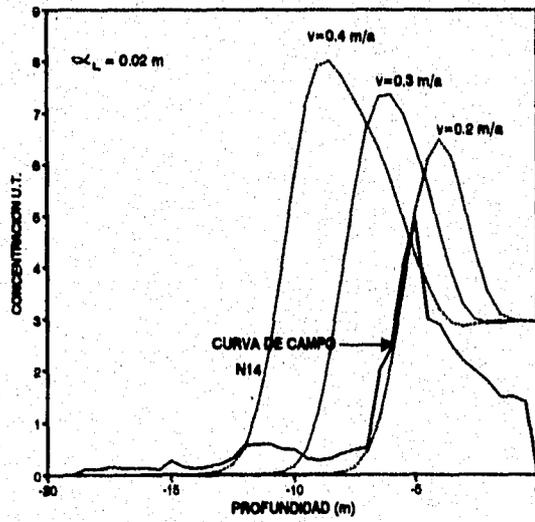


FIG. 4.13. SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD

FUNCION VERACRUZ 60-87 PICO DE TRITIO DE 1994

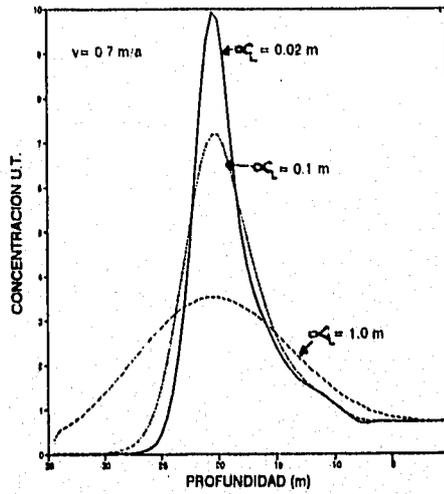


FIG. 4.14. SENSIBILIDAD A LA DISPERSIVIDAD

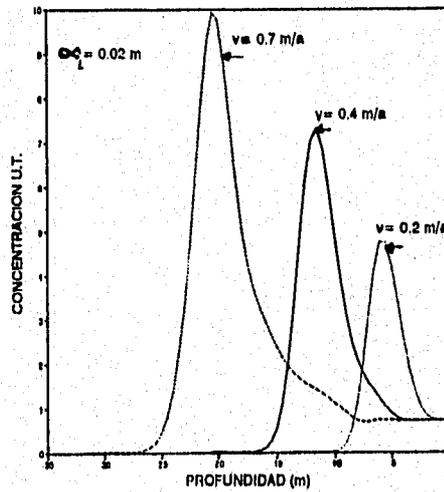


FIG. 4.15. SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD

FUNCION CHIHUAHUA 60-87 PICO DE 1994

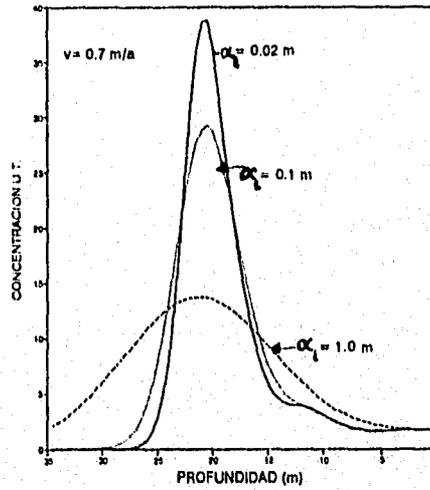


FIG. 4.16. SENSIBILIDAD A LA DISPERSIVIDAD

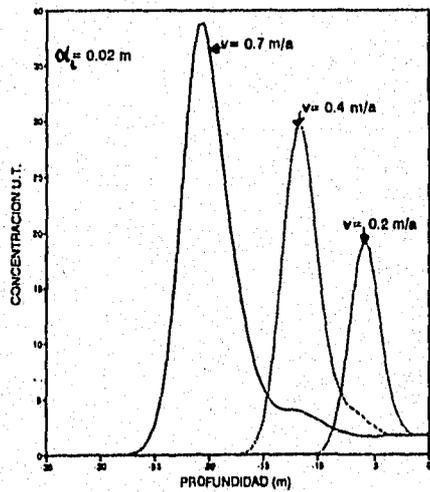
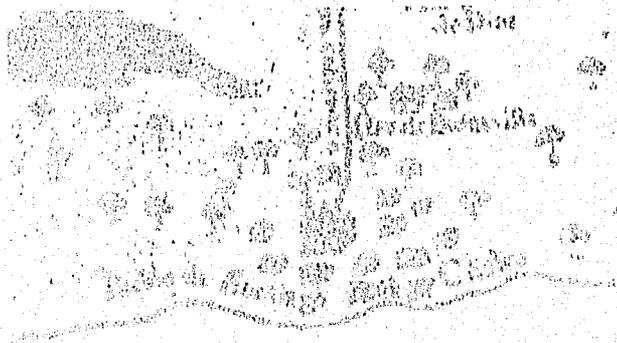


FIG. 4.17. SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones



El presente informe es el resultado de un estudio

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Se diferenciaron dos zonas en el acuitado lacustre que contrastan en su comportamiento hidrogeológico. Una superior en la que se determinaron variaciones pequeñas de la carga hidráulica, gradientes hidráulicos pequeños, altas conductividades hidráulicas y una gran actividad de movimiento de agua subterránea. Y otra inferior donde se midieron variaciones importantes de carga hidráulica, gradientes hidráulicos grandes, baja conductividad hidráulica y poca actividad hidráulica. El espesor de la zona superior abarca las primeras 3/4 partes del espesor total para cada uno de los sitios investigados a lo largo de la sección, es decir 8, 11 y 20 metros para los sitios con espesor de acuitado de 10, 15 y 35 metros respectivamente.
2. La distribución de la carga hidráulica en la zona superior muestra valores menores a 4 metros, mientras que en la zona inferior se presenta un cambio brusco, incrementándose desde 4 metros hasta un valor similar al espesor del acuitado en cada sitio, esto es 10, 15 y 35 metros. El gradiente hidráulico en la zona superior varía entre 0.14 y 0.63, mientras que en la zona inferior es de 1.4 a 2.6.

En general la conductividad hidráulica presenta valores mayores a $1.5 \cdot 10^{-9}$ m/s en la zona superior, mientras que en la zona inferior los valores varían entre $7.3 \cdot 10^{-9}$ y $1 \cdot 10^{-10}$ m/s. La profundidad de mayor flujo activo de agua subterránea coincide con la profundidad de la zona superior. Esto se asocia a una alta densidad de microfracturamiento; mientras que la zona inferior debe presentar una menor densidad de microfracturamiento, consistente con

estudios previos.

3. Como consecuencia de la inversión del gradiente hidráulico en el acuitardo de Chalco, se inició la incorporación de trazadores atmosféricos a partir de los años 60's en los sitios de menor espesor, y en los 70's para los sitios de mayor espesor. De los tres sitios estudiados se detectó tritio únicamente en el sitio donde el espesor del acuitardo es de 35 metros, en los dos sitios restantes, donde el espesor es de 10 y 15 metros, no se identificó la presencia de tritio. La distribución de tritio en el acuitardo es función del tiempo en que se llevó a cabo la inversión del gradiente hidráulico, de la velocidad del agua subterránea y de la dispersión del medio.
4. Los resultados de la simulación numérica de migración de tritio en el acuitardo a lo largo de la sección de estudio permitió definir que el pico de tritio, en los sitios con menor espesor, ya atravesó todo el espesor de arcillas e ingresó al acuífero, mientras que en el sitio con 35 metros de espesor los parámetros que mejor definen la distribución y magnitud del pico de tritio son; una velocidad de 0.2 m/año y una dispersividad de 0.02 m.
5. Los resultados muestran que las zonas donde el espesor del acuitardo es menor a 15 metros, no representan una barrera que impida la migración de contaminantes al acuífero. En estos sitios se calcularon velocidades de flujo del orden de 0.4 a 0.7 m/año.
6. Los contaminantes no reactivos, provenientes de la superficie del terreno, en zonas donde el acuitardo es mayor a 20 metros, podrán impactar al acuífero en un período no mayor a 120

años, si la disposición de contaminantes sobre el terreno continua sin control, al igual que la sobreexplotación del acuífero, este impacto alcanzara dimensiones alarmantes.

Este trabajo pretende llamar la atención sobre los riesgos que el acuífero regional de la Ciudad de México, a pesar de estar confinado o protegido por un acuitardo, enfrenta ante el desconocimiento de su delicada interacción física y química.

Dentro de las recomendaciones se propone en primer lugar un mayor control en la explotación del agua subterránea de este acuífero, así como evitar la disposición de basureros en el área, y el incremento de canales de aguas negras sobre la misma, además de instaurar una disposición adecuada de residuos industriales.

APENDICE

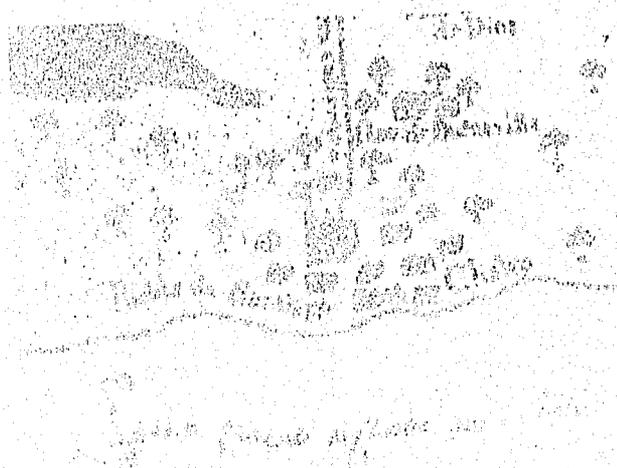


TABLA 3.1. EVENTOS IMPORTANTES RELACIONADOS CON LA LAGUNA DE CHALCO

AÑO	EVENTO
1779	<i>"Comienza la desecación en 1524 y la laguna dulce esta seca y enjuna"</i> ¹
1889	Mapa de Chalco, en donde el márgen nororiental esta completamente seco ²
1899	Nivel del terreno en Ixtapaluca 2259 m.s.n.m Chalco 2269 m.s.n.m. ³
1900	Se inaugura el gran canal, cuya procedencia última era la laguna de Chalco.
1911	Principia la desecación del lago de Texcoco ⁴
1915	<i>"Desaparece el último vestigio de la laguna de México con la desecación de la simbólica laguneta existente en la lagunilla"</i> ⁴
1918	Desecación total de la laguna de México.
1922	Primeros reportes de pozos en el acuífero granular de la subcuenca de Chalco ⁵
1940	Inicia el bombeo en el acuífero granular no confinado
1950	Se reportan cerca de 150 pozos de bombeo con una producción de aprox. 1.3 m³/s para abastecimiento de agua potable y riego

1960	Primeros pozos perforados en el acuífero basáltico para conducir agua potable a la Cd. de México.
1970	Se perforan mas pozos en este acuífero basáltico superando los 5 m³/s
1980	Se perforan 14 pozos profundos a 400 m de profundidad aportando a la ciudad un promedio de 1.4 m³/s a 1.75 m³/s
1984	En el margen nororiental de la subcuenca de Chalco reportan elevaciones del nivel estático de 2228 a 2218 m.s.n.m.
1988	La extracción total de la subcuenca alcanza un gasto de 7.75 m³/s
1989	Estimación aproximada de la extracción del acuífero de 8m³/s
1994 (entre 1978 y 1994)	En base a datos piezométricos se reportan descensos de niveles de agua del acuífero no confinado en un rango de 0.5 m por año a 1 m por año⁶

1 ORDOÑES 1779

2 ELIZABETH SHOLLING 1936

3 BORSOS O.A. 1948

4 JOSE LUIS BRIVIESCA CASTREJON 1960,

5 SARH 1972

6 SARH-CAVM 1981. CNA CAVM 1991

REFERENCIAS



Agencia presento un informe que...

REFERENCIAS

Bear, J.A., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier Science, New York.

Benhumea, M.L. and A.C. Vázquez, 1988. Estudios Geofísicos del Valle de México. Comisión Federal de Electricidad (CFE), 60 pp.

Briviesca-Castrejon J.L., 1960. Hidrología Histórica del Valle de México. Rev. Ing. Hidráulica. Mex. XIV(3).

Boraso O.A., 1948. Cartas del Valle de México. Archivo General de la Nación.

CNA-GAVM., 1991. Boletín de Mecánica de Suelos. v.10, 281 pp. México.

Cherry, J.A., R. W. Gillham, E.G. Anderson, and P. E. Johnson, 1983. Migration of contaminant in groundwater at a landfill. A case study 2, Groundwater monitoring devices, J. Hydrol., 63, 31-49.

Cortes, A. and Farvolden, R.N., 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, México. J. Hydrol., Vol.107, 147-153.

D'Astous, A.Y., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Cherry, J.A., and Gillham, R.W., 1988. Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo,, Waterloo, Ont., Canada N2L 3G1, pp.43-56

DDF, 1975. Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. México.

DDF, 1979. Memorias de los detalles constructivos y operativos del ramal Tulyehualco, reporte interno, México.

DDF, 1991. Registro de nivelación diferencial del área de Chalco. Reporte Interno.

Desaulniers, D.E., Cherry, J. A., and Fritz, P., 1981. Origin, age and movement of pore water in argillaceous Quaternary deposits at four sites in southwestern Ontario. *J. Hydrol.*, Vol.50, pp 231-257.

Desaulniers, D.E., Cherry, J. A., and Fritz, P., 1982. Origin, age and movement of pore water in clayey Pleistocene deposits in South Central Canada. *Isotope Studies of Hidrologic Processes*. Northern Illinois University Press, Dekalb, Illinois, E.C. Perry and Montgomery, C.W. (eds.), pp. 45-55.

Egboka, B.C.E., Cherry, J.A., Farvolden, R.N., y Frind, E.O., 1983. Migration of Contaminants in Grounwater at a Landfill: A case study. *Journal of Hydrology*, 63, 51-80.

Fontes, J.C. and Frintz, P., 1975. Isotope Hydrology q974. A review of the 4th I.A.E.A. Symposium on Isotope technioques in Groundwater Hydrology- *International J. Applied Radiat. Isot.* 26, Vol. 1, pp.1-8.

Frezze, R.A., and Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Frind, E. O., Matanga, G.B., 1985. The dual formulation of flow for contaminant transport modeling, 1, Review of theory and accuracy aspects, *Water Resour. Res.*, 21, 159-169.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Frind, E.O., 1988. Solution of the advection-dispersion equation with free exit boundary. Numerical Methods for Partial Differential Equation, Vol 4, pp. 301-313.

Frind, E.O., 1993. Lecture Notes, Physical Processes in Groundwater system Part 1, Department of Earth Sciences, University of Waterloo.

Hansen, R., 1990. Lake deposits from Chalco Basin sediment description and first results from core a/b (Abstract). Primer Simposium sobre el Cuaternario en México, México.

Huizar, A.R., 1989. Contribution a l'etude geologique et hydrogeologique de la plainede Chalco-Ameameca et de son bassin versant (Mexique). Diplome de docteur del'Universite de Besancon, French. 160 pp.

McKay, L.D., Cherry, J.A., y Gillham, R.W., 1993. Field experiment in a fractured Clay Till, 1. Hydraulic conductivity and Fracture Aperture. Water Resources Research, Vol. 29. No.4. pp.1149-1162. University of Waterloo.

Mann, W.B., Urterweiger, M.P., y Coursey, B.M., 1987. Comments on the NBS tritiated-water standards and their use, Int. J. Appl. Radiat. Isot., 33, 383-386.

Molina, B.R., 1956. Estudios geoquímicos, geofísicos y geológicos de la Cuenca de Chalco, Mex., México City. pp.105-113.

Marsal R.J., y Mazari, M., 1959. The subsoil of México City, Inst. de Ing. UNAM, México, City. (2 volúmenes).

National Research Council, 1929. International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry, and Technology, McGraw-Hill, New York.

Ordoñez, 1779. Relación Suscinta. Relaciones originales de Chalco-Amaquemecan, Sylvia Rendon, Fondo de Cultura Económica México 1965.

Ogata, A., 1970. Theory of dispersion in a granular medium, U.S., Geol.Surv. Prof. Pap., 411, 1.

Ortega-Guerrero, M.A., 1988. Analysis of Regional Groundwater Flow and Boundary Conditions in the Basin of México., Tesis de maestría, University of Waterloo, Ontario, Canadá. 45 pp.

Ortega-Guerrero, M. A. y Farvolden, R.N., 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and Boundary Conditions in the basin of México. J. Hydrol., 110: 271-294.

Ortega-Guerrero, M. A., Cherry, J.A., and Rudolph, D. L., 1993. Large Scale Aquitard Consolidation Near México City. Waterloo Centre for Groundwater Research.

Ortega-Guerrero, M.A., 1993. Origin and Migration of Pore Water and Salinity in the Consolidating Chalco Aquitard, Near Mexico City. Tesis Doctoral, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 294 pp. Can.

Ortega-Guerrero, M.A., y Cherry, J.A., 1996. Instrumentation of México City aquitard for hydrogeologic research for submission to Ground Water Monitoring Review and Contamination. Journal of Hydrogeology.

Ortega-Guerrero, M.A., Cherry, J.A., y Aravena, R., 1996. Origin of pore water and Salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of México City. *Journal of Hydrogeology* (Accepted for Publication).

Ortiz-Zamora, D. del C., 1996. Migración de Compuestos Inorgánicos Derivados de un Canal de Aguas Residuales de Origen Urbano e Industrial a través de Arcillas Fracturadas hacia el Acuífero Subyacente, Chalco-Ixtapaluca, México. Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM.

Paredes, A.J., Resendiz, N., y Organista, R., 1988. El subsuelo del valle de México, propiedades dinámicas y zonificación, *Revista de Ingeniería UNAM*, Vol. LVIII, Num.2.

Rendon, S., 1965. Relaciones originales de Chalco Amaquemecan, Fondo de Cultura Económica, México.

Robertson, W.D., y Cherry, J.A., 1989. Tritium as an Indicator of Recharge and Dispersión in a Groundwater System in Central Ontario. *Water Resources Research*, Vol., 25, No. 6, Pg. 1097-1109.

Robledo, C.L., 1983. Planeación del Valle desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental. *Memorias de la Planeación del desarrollo del Valle de México*, Div. Est. Psgr., Univ. Nac. Auton. de México. pp. 86-99.

Robin, M.J.L., Dytynshyn, D.J. and Sweeney, S.J., 1982. Two gas-drive sampling devices. *Ground Water Monitoring Review*. Vol. 2, No. 1, pp. 63-66.

Rudolph, D.L., Cherry, J.A., and Farvolden, R.N., 1991. Field Investigations and solute

transport in a lacustrine aquitard near México, City. Water Resour. Res., 27(9),pp.133-190.

Ruland W.W., Cherry, J.A. and Feenstra S., 1991. The depth of fractures and active groundwater flow in a clayey till plain in Southwestern Ontario, Ground Water, Vol 29, No.3.pp 405-417.

Sahab-Hadad, E., 1922. Acciones de la Gerencia de Aguas del Valle de México dentro del Programa Nacional de Agua Potable y Alcantarillado., Agua Potable., Vol.8.

SARH, 1972. Niveles piezométricos en el Valle de Chalco. Registro Interno.

SARH-CAVM, 1979. Planos topográficos del área de Chalco, escala 1:10,000, México.

SARH-CAVM, 1981. Boletín de mecánica de suelos No.8, 1974-1977,295pp.

SARH-CAVM, 1982. Memoria de los detalles constructivos de los 14 pozos del Ramal de Santa Catarina, Reporte interno, México.

SARH-CAVM, 1987. Niveles piezométricos de los pozos de Mixquic-Sta. Catarina en el Valle de Chalco. registro Interno México.

SARH-CEAS, 1989. Memoria de los detalles constructivos de los pozos de Xico. Reporte interno, México.

SMMS, Peralta y Faby R., 1989. Sobre el origen de algunas propiedades mecánicas de la formación arcillosa superior del Valle de México. Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México.

SMMS, 1990. El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.

Solomon, D.K., and Sudaki, E.A., 1991. Tritium and Helium-3 isotope ratios for direct estimation of spatial variations in groundwater recharge. *Water Resour. Res.* Vol.27, No.9, pp. 2309-2319.

Solomon, D.K., Poreda, R.J., Schiff, S.L., and Cherry, 1992. Tritium and Helium-3 as groundwater-age tracers in the Borden aquifer. *Water Resour. Res.*, Vol. 28, No.3. pp.741-755.

SRH, 1966. Lineamientos Generales del plan Hidráulico para la cuenca del Valle de México (alternativa 1960-1990).

Sudicky, E.A., and Frind, E.O., 1982. Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a system of parallel fractures, *Water Resources Res.*, Vol.18 (6), pp. 1634-1642.

Sudiky, E.A., Cherry, J.A., and Frind, E.O., 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. 4, A natural gradient tracer test. *J. Hydrol.*, Vol. 63, pp. 81-108.

Schilling E., 1938. Mapa antiguo del antiguo Lago de Chalco. Archivo General de la Nación.

Vargas, C.C., 1995. Distribución de la Conductividad Hidráulica en el Acuífero Lacustre de La Subcuenca de Chalco, D.F. y Edo. de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.