

18

Zejun



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**"DISTRIBUCION DE LA CONDUCTIVIDAD
HIDRAULICA EN EL ACUITARDO LACUSTRE DE
LA SUBCUENCA DE CHALCO, D. F. Y
EDO. DE MEXICO"**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

CARLOS VARGAS CABRERA



FALLA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO

1995



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-022

SR. CARLOS VARGAS CABRERA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. M. Adrián Ortega Guerrero, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo:

**DISTRIBUCION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN EL ACUITARDO
LACUSTRE DE LA SUBCUENCA DE CHALCO, D.F. Y EDO. DE MEXICO**

- I INTRODUCCION**
- II GEOLOGIA**
- III METODOLOGIA**
- IV DISCUSION DE RESULTADOS**
- V CONCLUSIONES E IMPLICACIONES**
- VI RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
- MAPAS, GRAFICAS Y FIGURAS**

Ruego a usted 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 le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 17 de mayo de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg

J.A.

**"DISTRIBUCION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN EL ACUITARDO
LACUSTRE DE LA SUBCUENCA DE CHALCO, D.F. Y EDO. DE MEXICO"**

CONTENIDO

INDICE DE GRAFICAS Y FIGURAS	iv
RESUMEN	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
1.- INTRODUCCION	2
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Objetivos	7
1.2. Descripción de la zona de estudio	8
2.- GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO	11
2.1. Geología Regional	11
2.1.1. Estratigrafía	11
2.1.2. Geotectónica	13
2.2. Hidrogeología	14
3.- METODOLOGIA	21
3.1. Conceptos Básicos	21
3.2. Métodos de Medición de la Conductividad Hidráulica	23
3.3. Descripción del Método de Hvorslev	24
3.4. Descripción de las Pruebas de Campo	27
4.- DISCUSION DE RESULTADOS	31
5.- CONCLUSIONES E IMPLICACIONES	43
6.- RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFIA	47

INDICE DE GRAFICAS Y FIGURAS

Fig. 1. Localización de la Subcuenca de Chalco dentro de la Cuenca de México	4
Fig. 2. Rasgos culturales de la Planicie Lacustre	5
Fig. 3. Unidades Hidrogeológicas en el área de Chalco	14
Fig. 4. Sección transversal, mostrando las unidades hidrogeológicas de la Subcuenca de Chalco	15
Fig. 5a. Perfil de los depósitos lacustres en el centro de la Planicie de Chalco, detallando la estratigrafía y la resistencia a la penetración	16
Fig. 5b. Perfil de un pozo profundo mostrando la estratigrafía y registros geofísicos en el centro de la Planicie de Chalco	16
Fig. 6. Espesores del acuitardo lacustre de la Subcuenca de Chalco, mostrando la ubicación de sitios piezométricos	18
Fig. 7. Aparato experimental que ilustra la Ley de Darcy	21
Fig. 8a. Geometría en la prueba de recuperación según Hvorslev	24
Fig. 8b. Método de análisis de la prueba de recuperación	24

Fig. 9a. Prueba tipo de recuperación según la propuesta por Hvorslev, obtenida en la Subcuenca de Chalco	28
Fig. 9b. Prueba de recuperación característica, obtenida en la Subcuenca de Chalco	28
Tabla 1. Estadísticos de diferentes zonas hidrogeológicas de la planicie de Chalco	33
Fig. 10. Distribución de frecuencias para la conductividad hidráulica del acuitardo lacustre de la Subcuenca de Chalco	34
Fig. 11. Perfiles característicos de cada zona de la Subcuenca de Chalco:	
11a. Zona 1 (Sta. Catarina)	35
11b. Zona 2 (Xico)	35
11c. Zona 3 (Ixtapaluca)	36
Fig. 12. Distribución de frecuencias para la conductividad hidráulica, por unidades del acuitardo lacustre de Chalco:	
12a. Unidad arcillosa superior	37
12b. "Capa dura"	37
12c. Unidad arcillosa inferior	37
Fig. 13. Distribución de frecuencias de conductividad hidráulica por zonas:	
13a) Zona 1 (Ste. Catarina)	40
13b) Zona 2. (Xico)	40
13c) Zona 3 (Ixtapaluca)	40

RESUMEN

El acuitardo lacustre sobre el que se encuentra la Cd. de México, representa la única protección para el acuífero subyacente contra diversos contaminantes que se disponen en la superficie del terreno. En el área de Chalco, dicho acuitardo cubre un acuífero regional importante, y sobre él, existen varias fuentes de contaminación.

La conductividad hidráulica es un parámetro hidráulico fundamental para conocer la velocidad a la que migran los mencionados contaminantes y determinar el tiempo que tardarían en impactar al acuífero.

Con el fin de conocer la conductividad hidráulica del acuitardo lacustre de Chalco, se realizaron 136 pruebas piezométricas de recuperación, según el método de Hvorslev (1951). Los resultados del presente estudio, indican que la conductividad hidráulica de esta unidad hidrogeológica disminuye a medida que aumenta la profundidad. En los primeros 20-25m de sedimentos lacustres, la conductividad hidráulica tiene una media de 6.6×10^{-8} m/s, y por lo general, es dos órdenes de magnitud mayor que los valores obtenidos en las arcillas que se encuentran a profundidades de 25 a 50m, las que muestran una media de 2.8×10^{-10} m/s. Se asocian los valores altos de K, para los primeros 20m de arcillas, a la presencia de fracturas, lo cual es consistente con estudios de migración de solutos en la zona.

De los datos obtenidos de conductividad hidráulica, se propone que los valores mayores de 1×10^{-8} m/s corresponden a arcillas fracturadas, mientras que valores menores sugieren una procedencia de arcillas no fracturadas. Los altos valores de conductividad hidráulica obtenidos a profundidades mayores de 40m y la presencia de fracturas en el acuitardo, ponen de manifiesto el riesgo de que los contaminantes presentes en la superficie logren impactar al acuífero subyacente.

AGRADECIMIENTOS

El financiamiento para llevar a cabo los estudios hidrogeológicos en el acuitardo de Chalco, fué proporcionado por el Dr. John A. Cherry de la U. de Waterloo a través del National Science and Engineering Research Council de Canadá (NSERC), como parte de la tesis doctoral del Dr. M. Adrián Ortega (1993).

Agradezco una beca por un año, proporcionada por el Instituto de Ingeniería a través del Proyecto Interno 2411 del Dr. M. Adrián Ortega, y el apoyo proporcionado por el Instituto de Geología, ambas instituciones pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México.

El presente trabajo se realizó bajo la dirección y supervisión del Dr. M. Adrián Ortega G. , al que agradezco haber trabajado a su lado y me haya involucrado en un área de interés para mí.

Igualmente son apreciables, los comentarios del Dr. Garth Van der Kamp del NHRIEC (Saskatoon, Saskatchewan, Canadá) que en su visita a México en Noviembre de 1994, hiciera al autor y que contribuyeron a enriquecer el contenido del presente trabajo.

Deseo expresar mi reconocimiento a mis amigos Gustavo y Javier , y al grupo de trabajo con el que conviví en la elaboración de esta Tesis, de quienes aparte de su compañía y amistad, participé de sus opiniones y comentarios hacia la presente obra.

Finalmente, extendo mi gratitud y aprecio a mis hermanos, y especialmente a mi madre, quienes han sido en mi formación un soporte invaluable, ayudándome activamente a realizar diferentes proyectos que me he planteado.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Los asentamientos poblacionales en la Cuenca de México se ubican principalmente sobre depósitos arcillosos lacustres altamente compresibles (Fig. 1). Estos depósitos cubren un acuífero granular regional del que se extraen aproximadamente 43 m³/s, de los 62 m³/s que requiere la zona metropolitana de la Cd. de México (Sahab, 1992).

El bombeo excesivo del acuífero regional dio origen al hundimiento de la Ciudad de México, ocasionando numerosos problemas en la infraestructura urbana. Estos problemas requerían de la reducción del bombeo en la Cd. de México y de la búsqueda de zonas alternas de aprovisionamiento de agua subterránea cercanas; una de ellas fue la Subcuenca de Chalco localizada al SE de la Cd. de México (Fig. 1). De esta Subcuenca de Chalco se extraen actualmente cerca de 8 m³/s de agua subterránea que abastecen aproximadamente, el 18% de la demanda total de la Ciudad de México y de algunas zonas conurbadas (Ortega, 1993). La explotación del acuífero de la Subcuenca de Chalco, en las últimas décadas, ha resultado en una subsidencia regional del terreno, alcanzando hundimientos totales cercanos a los observados en la Cd. de México (Ortega, *op. cit.*).

La Cuenca de México contiene aproximadamente el 60% de la industria del país (El Colegio de México, 1987). La generación de residuos líquidos y sólidos de la industria y de la Ciudad de México, da lugar a numerosos contaminantes que no se disponen en forma adecuada sobre los sedimentos arcillosos lacustres.

Dado que existe la posibilidad de la migración de estos contaminantes hacia el acuífero subyacente, es necesario cuantificar la velocidad con que se mueven hacia el

mismo y estimar el momento en el que pueden impactarlo. Un parámetro fundamental para conocer la migración de estos contaminantes es la conductividad hidráulica del acuitardo. A pesar de ser un parámetro crítico en estudios hidrogeológicos, los valores de conductividad hidráulica que se reportan en la literatura fueron obtenidos principalmente a través de pruebas de consolidación en laboratorio. A esta escala, la medición se efectúa en muestras de pocos centímetros de espesor (de 2 a 8cm); estas determinaciones no representan las condiciones "in situ", donde generalmente se tiene la estratificación de otros materiales de mayor granulometría y posiblemente la presencia de fracturas locales y regionales (Kamp, 1994). Los valores de la conductividad hidráulica de los sedimentos lacustres derivados de estudios de mecánica de suelos, varían entre 1×10^{-12} m/s y 3×10^{-9} m/s (Mesri *et al.*, 1975); y para la zona de Chalco se estiman entre 1×10^{-12} y 1×10^{-9} m/s (Ortega *op. cit.*, 1993).

Los sedimentos lacustres consisten de una secuencia estratificada de unidades fundamentalmente arcillosas con capas de arena volcánica de 1 a 3 metros de espesor denominadas "capas duras".

El valor de la conductividad hidráulica para las "capas duras" es de 4×10^{-9} m/s (Rudolph *et al.*, 1989), y ha sido tomado de estudios de mecánica de suelos.

Los valores de la conductividad hidráulica en el acuitardo, han sido aproximados a través de la calibración de modelos matemáticos de flujo en la Cuenca de México para predecir el hundimiento de la Cd. de México. Para los sedimentos lacustres, la conductividad hidráulica reportada por Rudolph *et al.* (1989) varía entre 5×10^{-9} m/s y 2×10^{-6} m/s en los 40m superiores del acuitardo de Texcoco. Maya (1991) realizó pruebas de permeabilidad en minipiezómetros caseros hasta profundidades máximas de 5.4m en aproximadamente una hectárea en la planicie de Chalco, obteniendo

valores de conductividad hidráulica horizontal entre 8.6×10^{-12} y 1.98×10^{-10} m/s y conductividad hidráulica vertical entre 1.5×10^{-9} y 1.18×10^{-7} m/s. Estos valores corresponden a la zona de interperismo y de mayor actividad agrícola, por lo que no pueden considerarse representativos de las condiciones naturales del acuitardo.



Figura 1. Localización de la Subcuenca de Chalco dentro de la Cuenca de México. (Tomado de Ortega, 1993).

Actualmente no existen estudios metodológicos de campo orientados al análisis de la distribución vertical de la conductividad hidráulica del acuitardo lacustre de la Cuenca de México, ni de sus variaciones laterales bajo diferentes condiciones hidrogeológicas, que permitan apoyar estudios de evaluación de la migración de contaminantes y de la interacción acuífero-acuitardo.

Con el fin de conocer la conductividad hidráulica del acuitardo y sus variaciones espaciales hasta profundidades cercanas de 85 metros, se seleccionó el acuitardo lacustre de Chalco debido a que reúne varias condiciones ideales y de interés para realizar éste tipo de pruebas, estas condiciones son:

- Existen alrededor de 200 piezómetros instalados para estudios de migración de contaminantes y respuesta del sistema acuifero-acuitardo por Ortega *et al.*(1993) entre 1 y 85 metros de profundidad, en 25 sitios diferentes en la planicie de Chalco.

- El área no se encuentra muy urbanizada, existiendo zonas extensas y libres , donde es relativamente sencillo el acceso y el trabajo en campo (Fig. 2).

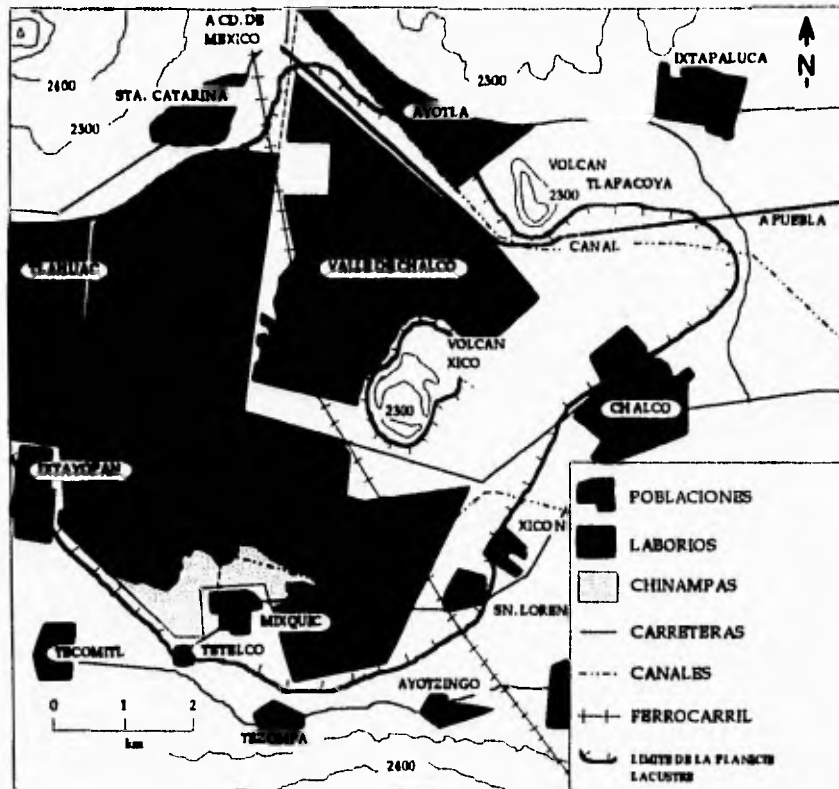


Figura 2. Rasgos culturales de la Planicie Lacustre. (Tomado de Ortega, 1993).

- Las pruebas realizadas no son afectadas por la continua vibración del subsuelo que produce la actividad del transporte pesado.
- Los espesores del acuitardo varían de unos cuantos metros en la margen lacustre, hasta 300 metros en su parte media, por lo que resulta de interés evaluar la variación de la conductividad hidráulica con el espesor,
- Debido a las variaciones de espesor del acuitardo, existen diferentes condiciones hidrogeológicas dentro de la planicie lacustre controladas por la respuesta hidráulica de este acuitardo al bombeo en el acuífero.

1.1.1. Objetivos

El presente estudio se propuso:

- 1) Determinar la conductividad hidráulica del acuitado lacustre de Chalco a través de pruebas de recuperación del nivel piezométrico.**
- 2) Encontrar la variación horizontal y vertical de la conductividad hidráulica en el acuitado.**
- 3) Determinar la conductividad hidráulica de las "capas duras" por medio de pruebas en los piezómetros ubicados en estas unidades.**

1.2. Descripción del área de estudio

La Cuenca de México se localiza dentro del llamado Eje Neovolcánico Transmexicano (Demant, 1978) que atraviesa la parte central de la República Mexicana, y tiene un área de 9,600 km², de los cuales, aproximadamente 1400 km² son ocupados por la Ciudad de México, y zonas conurbadas del D.F. y Edo. de México (Fig. 1). De acuerdo con la división de Regiones Hidrogeológicas que realiza Heath (1988), la Cuenca de México está comprendida en la Región de la Faja Volcánica Transmexicana, y pertenece a la zona climatológica templado-subhúmeda de acuerdo con la clasificación de la Dirección Gral. de Geografía (1981).

La Subcuenca de Chalco forma parte de la Cuenca de México y se encuentra ubicada al Sur de ésta y al Sureste de la Ciudad de México (Fig. 1), cuya mancha urbana se ha extendido en las últimas décadas como consecuencia de su crecimiento demográfico, siendo la planicie de la subcuenca de Chalco una de las zonas directamente afectadas por este fenómeno social (Fig. 2). El acuífero regional de la Subcuenca de Chalco se encuentra cubierto por sedimentos lacustres, en forma similar a las condiciones que existen en la Cd. de México; estas condiciones serán descritas con mayor detalle en el subcapítulo 2.2. Hidrogeología.

Dado que es importante analizar el potencial de generación de contaminantes en la Subcuenca de Chalco, se mencionan las principales actividades que los producen. Aquí, el crecimiento poblacional ha carecido de planeación, por lo que la dotación de servicios públicos ha sido deficiente o nula. Además del problema habitacional, el uso del suelo se inscribe hacia lo que son las actividades económicas en el área, siendo las principales de ellas la agrícola y el pastoreo (Fig. 2), aunque ésta última ha

disminuido en la actualidad, mientras que la actividad industrial ha crecido como resultado del desplazamiento de las industrias de la Cd. de México hacia sus alrededores. Este fenómeno de descentralización se ha traducido en generación y emplazamiento de diversos agentes contaminantes sobre el acuitardo arcilloso que representa la única capa protectora del acuífero.

CAPITULO 2. GEOLOGIA

DEL AREA DE ESTUDIO

2. GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO

2.1. Geología Regional

2.1.1. Estratigrafía

El ambiente geológico en el que se formó la Subcuenca de Chalco está directamente relacionado con el de la Cuenca de México, el cual, varios autores lo han identificado de la siguiente manera:

- En la Cuenca de México se depositaron durante el Período Cretácico varias secuencias calcáreas comenzando a principios del Aptiano con la Formación Xochicalco, siendo ésta, la unidad litológica más antigua reportada para la zona y que consta de capas delgadas calcilutíticas y calcilimolíticas de ambiente marino de cuenca relativamente profunda, seguida de la depositación de calizas y dolomías de la Formación Morelos en una extensa plataforma marina de edad Albiana (Fries, 1960); posteriormente se depositaron las calcarenitas de facies de banco, cuenca y litoral de la Formación Cuautla durante el Cenomaniano tardío al Turoniano tardío; seguida de la depositación de una secuencia turbidítica de grauvacas, limolitas y lutitas durante el Turoniano-Maastrichtiano (Fries *op. cit.*), tiempo en el que culmina el depósito de sedimentos marinos.

- La Era Cenozoica estuvo dominada por eventos volcánicos que modificaron el relieve de la Cuenca de México, como es la formación de sierras y grandes estratovolcanes. En el Eoceno, el Granito Colotepec intrusionó a las secuencias sedimentarias, esta roca ígnea se ha identificado como una monzonita cuarcifera (Fries *op. cit.*). Posteriormente se depositó La Formación Balsas, que consiste de un conglomerado calcáreo con matriz limo-arcillosa y en su parte superior se encuentra una secuencia de capas delgadas de arcilla, limo y arena; la formación se depositó en un ambiente

continental del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano. Del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano se emplazó una secuencia de rocas volcánicas que afloran en la Sierra de Xochitepec y en los cerros Picacho y Púlpito del Diablo, de composición andesítica a riodacítica en la que se incluye a la riolita Tilzapotla (Frias *op. cit.*). Durante el Oligoceno al Plioceno se depositó una secuencia de material clástico en la base, brechas volcánicas, piroclásticos, derrames lávicos y tobas intercaladas en la cima, siendo los productos volcánicos de composición variable de basáltico a riolítico predominando la andesita y la dacita, a este conjunto de materiales se les ha denominado Grupo Pachuca (Segerstrom, 1961). Del Mioceno al Cuaternario, aumentó la actividad volcánica en la Cuenca de México, formándose las Sierras de Guadalupe, de las Cruces, Tepetzotlán, Zempoala, Navajas, Río Frio, Monte Alto, Nevada, los estratovolcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl y por último la sierra Chichinautzin. La composición de estos materiales varía de basáltico (Formación San Cristóbal, Geyne *et al.*, 1963) a riolítico (Riolita Navajas), aunque predominan los derrames andesíticos en gran parte de las sierras (Segerstrom, *op.cit.*). Interdigitados con los productos volcánicos, se encuentran depósitos aluviales y lacustres de edad cuaternaria cuyos espesores máximos alcanzan los 800 m (PEMEX, 1988) en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura. De las unidades estratigráficas mencionadas, solo afloran en superficie las Formaciones del Terciario y Cuaternario. Las unidades mas antiguas fueron identificadas por medio de pozos exploratorios hasta de 2000m de profundidad.

2.1.2. Geotectónica

La sedimentación calcárea del Aptiano cambió a tipo flysh en el Coniaciano-Campaniano por el levantamiento y erosión del Arco Magmático Cretácico del Poniente. En el Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano posterior a la Orogenia Laramide, la sedimentación clástica continental tipo molasa estuvo acompañada por actividad volcánica alcalina (Cserna *et al.*, 1988). Las rocas volcánicas calci-alcalinas de composición andesítica a riolítica forman parte del Arco Volcánico del Terciario medio.

Se han reconocido dos ciclos volcánicos asociados con el origen del Eje Neovolcánico Transmexicano: el primero Oligoceno-Mioceno y otro Plioceno-Cuaternario, ciclos que han sido asociados a la subducción de la Placa de Cocos bajo la corteza continental de México (Negendank, 1972; Mooser *et al.*, 1974; Bloomfield, 1975). Urrutia *et al.* (1977) explican la posición oblicua del ENT con respecto a la trinchera de Acapulco, adjudicándoles una dirección de movimiento no perpendicular a las placas de Cocos y Americana, donde la placa de Cocos se vuelve más densa hacia los extremos Noroeste al Sureste de la trinchera, menos caliente y menos joven, así como de mayor rigidez, lo cual hace que disminuya paulatinamente el ángulo de subducción hacia el extremo sureste de la trinchera, originándose un ángulo subhorizontal de 20° entre la trinchera de Acapulco y el ENT.

Mooser *et al.* (1974) encuentran que las fallas normales del Plioceno al Cuaternario en bloques con dirección preferencial Este-Oeste, tal vez se originaron por esfuerzos compresivos y tensionales orientados S75°W y N15°W, y que el fallamiento normal Plioceno-cuaternario y el emplazamiento de derrames lávicos de la misma edad controlaron la gran sedimentación clástica aluvial en la Cuenca de México.

2.2. Hidrogeología

De acuerdo con Ortega *et al.* (1993), el sistema acuífero de la Subcuenca de Chalco (Fig. 3 y 4) se encuentra definido de la siguiente manera:

Existen sedimentos lacustres que constituyen un grueso acuitardo superficial en la planicie de Chalco, los cuales cubren a depósitos volcánicos cuaternarios que forman un acuífero en rocas basálticas y piroclásticas en la base de las sierras Chichinautzin y Santa Catarina. Los depósitos aluvio-piroclásticos forman un importante acuífero libre

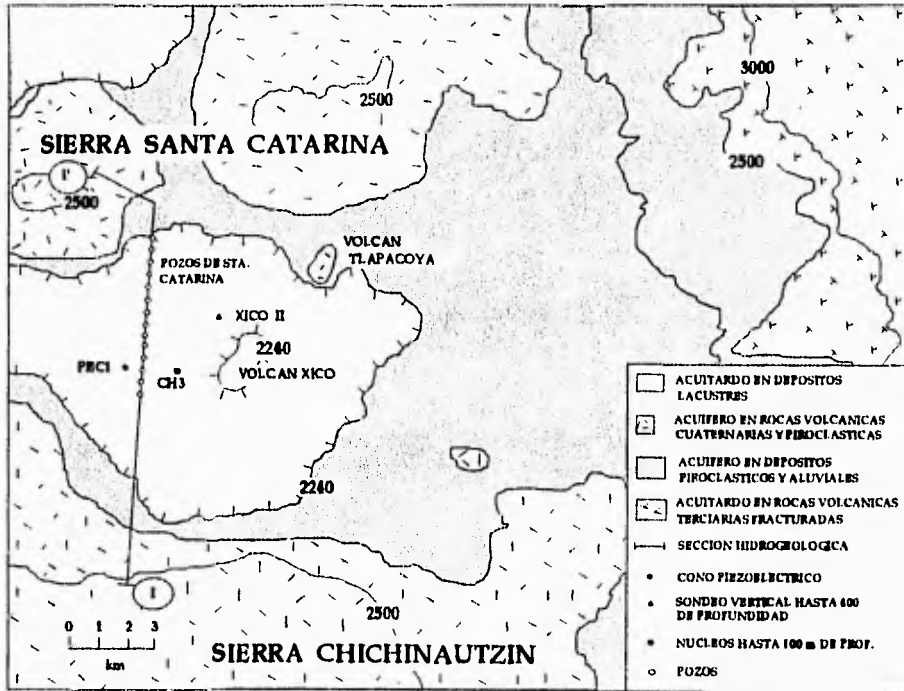


Figura 3. Unidades hidrogeológicas en el área de Chalco. (Tomado de Ortega, 1993).

más allá del borde oriental de la planicie lacustre, y un acuífero semiconfinado bajo el acuitardo lacustre. El basamento del sistema hidrogeológico, está formado por rocas volcánicas terciarias de composición andesítica y dacítica cuya unidad aflora en la Sierra Nevada.

La figura 4 muestra una sección hidrogeológica I-I' y de acuerdo con la ubicación de la figura 3. En la figura 4 se ilustran los espesores y distribución de las unidades hidrogeológicas, así como su posición estratigráfica a lo largo del sistema de pozos de Santa Catarina, perforados a profundidades de 400m en el centro de la planicie.

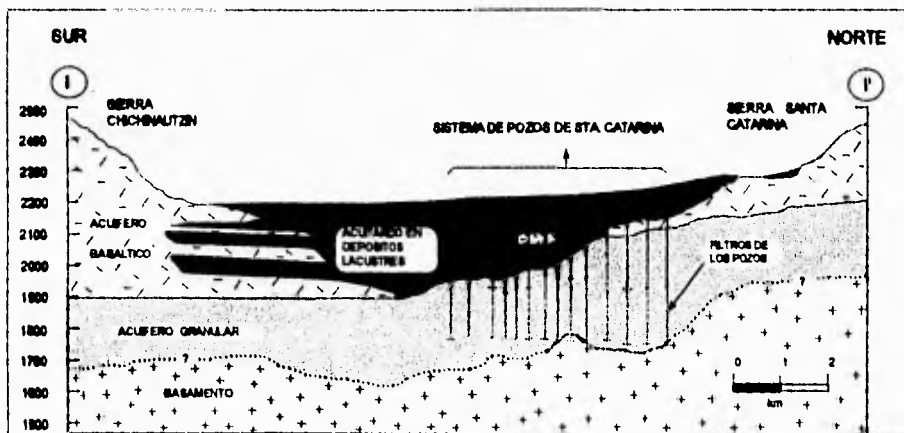


Figura 4. Sección transversal mostrando las unidades hidrogeológicas de la Subcuenca de Chalco. (Tomado de Ortega, 1993).

A partir de los resultados de núcleos (CH3) y de registros geofísicos y geológicos en el pozo profundo Xico II hasta una profundidad de 400m, se muestra la información estratigráfica del subsuelo de la planicie de Chalco en las figuras 5a y 5b.

Como lo indican los autores mencionados, los sedimentos lacustres son principalmente arcillas de baja permeabilidad, cuyos espesores van desde un metro en la margen lacustre, hasta 300 metros en el centro de la planicie (Fig. 6). Estos depósitos arcillosos se encuentran estratificados con capas de arenas finas volcánicas

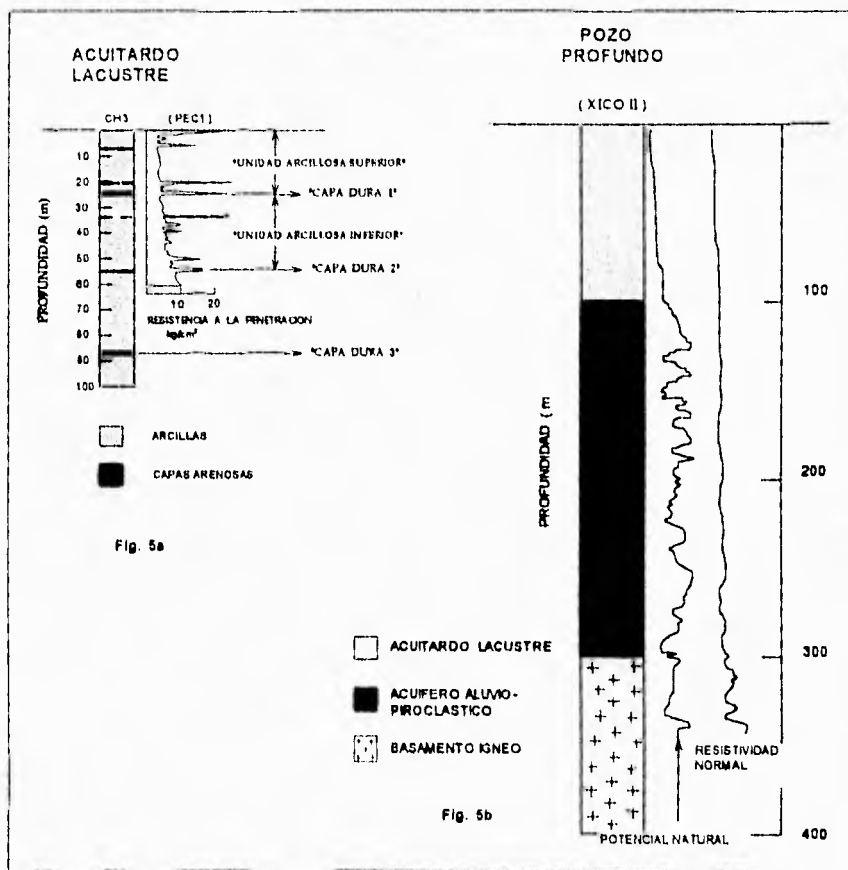


Figura 5a. Perfil de los depósitos lacustres en el centro de la Planicie de Chalco, detallando la estratigrafía y la resistencia a la penetración.

Figura 5b. Perfil de un pozo profundo mostrando la estratigrafía y registros geofísicos en el centro de la planicie de Chalco. (Tomados de Ortega, 1993).

a las que se denomina "capas duras", y están ubicadas aproximadamente a una profundidad de 25 y 54 metros (Fig. 5a). Registros de cono eléctrico indican la presencia de estas capas arenosas, las cuales tienen una alta resistencia a la penetración (Fig. 5a). Al paquete arcilloso ubicado entre 0 y 25m de profundidad, de acuerdo con la nomenclatura geotécnica se le denomina "Unidad Arcillosa Superior" y al ubicado entre 25 y 54m de profundidad, como "Unidad Arcillosa Inferior", teniendo como frontera una de otra, a una "Capa Dura". Estos sedimentos lacustres deben su origen a la formación de seis grandes lagos -Ecatepec, Zumpango, Texcoco, México, Xochimilco y Chalco- en las tierras bajas después de que la Sierra Chichinautzin cerró la Cuenca de México hace aproximadamente 600,000 años (Mooser *et al.*, 1974). A ello se debe que el espesor del acuitardo disminuye hacia las márgenes de la planicie y en la parte central llega a tener los máximos espesores de 300 metros (Fig. 6).

Interdigitados con las arcillas lacustres, se encuentran las rocas basálticas y piroclásticas cuaternarias en la base de las Sierras Chichinautzin y Santa Catarina, lo que demuestra que la actividad volcánica de estas sierras y la depositación de los sedimentos lacustres son contemporáneos (Fig. 4). El acuífero semiconfinado granular llega a tener un espesor de aproximadamente 200 metros o más, y yace bajo los depósitos lacustres (Fig. 4). Este acuífero granular es muy productivo en la Subcuenca de Chalco, y como se mencionó anteriormente, abastece en la actualidad parte de la demanda de la Cd. de México.

De acuerdo con Ortega (*op. cit.*), antes de comenzar a ser explotados los acuíferos libre y semiconfinado durante los años 50's, la planicie de Chalco se comportaba como un área de descarga de agua subterránea con un gradiente hidráulico ascendente a

través del acuitardo lacustre. El bombeo excesivo del acuitardo regional provocó la inversión de dicho gradiente de ascendente a descendente, e través de el espesor total del acuitardo cercano a la periferia, donde este es muy delgado ($< 100\text{m}$). En el centro de la planicie, el acuitardo tiene los mayores espesores, y el gradiente se conserva ligeramente ascendente, en un rango de 5 a 50m superficiales, sin embargo, la magnitud del gradiente ascendente ha disminuído, por lo que en gran parte del acuitardo no se ha logrado el total equilibrio de la presión del agua de poro para el rápido abatimiento de los niveles potenciométricos.

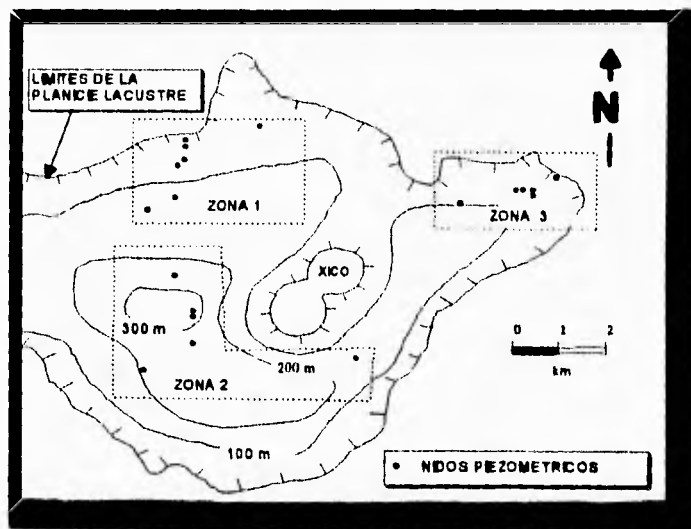


Figura 6. Espesores del acuitardo lacustre de la Subcuenca de Chalco, mostrando la ubicación de algunos piezométricos. (Tomado de Ortega, 1983).

Finalmente Ortega *et al.*, agregan que a principios de los años 60's y antes de 1984, comenzó un intenso bombeo en los acuíferos basáltico y granular libre fuera de la zona lacustre, ocasionando un efecto de subsidencia en la planicie de Chalco, la que

alcanzó en una amplia porción de ella, de 2 a 3 metros de hundimiento. En 1984 se inició la operación del sistema de pozos de Sta. Catarina (14 pozos de abastecimiento de agua potable), ubicados en el centro de la planicie (Fig. 3), desde entonces se registró una subsidencia adicional de dos metros entre 1984 y 1989 en una proporción constante anual de 40 cm. Esta zona de máximo hundimiento está localizada en la parte central de la planicie, precisamente donde se tiene el mayor espesor del acuitardo. El total de la subsidencia en esta parte de la planicie, actualmente es de 6 a 7m. Esta subsidencia extrema en la planicie de Chalco ha provocado la inundación de extensos campos agrícolas y urbanos, dando lugar a la formación de una laguna poco profunda. Comparativamente, la Cd. de México tuvo una máxima subsidencia en el centro de 7.5m de 1945 a 1985 (CNA et. al., 1991). De persistir la actual extracción de agua en la subcuenca de Chalco, y continuar el abatimiento de la superficie potenciométrica al ritmo actual, la subsidencia en esta planicie, excederá a aquella de la Cd. de México. Es probable que la subsidencia total, cerca de la parte central de la superficie de Chalco, finalmente sobrepase de varias decenas de metros en el futuro.

CAPITULO 3. METODOLOGIA

3. METODOLOGIA

3.1. Conceptos Básicos

Henry Darcy, experimentando con un dispositivo simple diseñado por él (fig. 7), desarrolló la ley que lleva su nombre, la cual se conoce de la siguiente forma:

$$v = -K(dh/dl) \quad \dots\dots\dots(1)$$

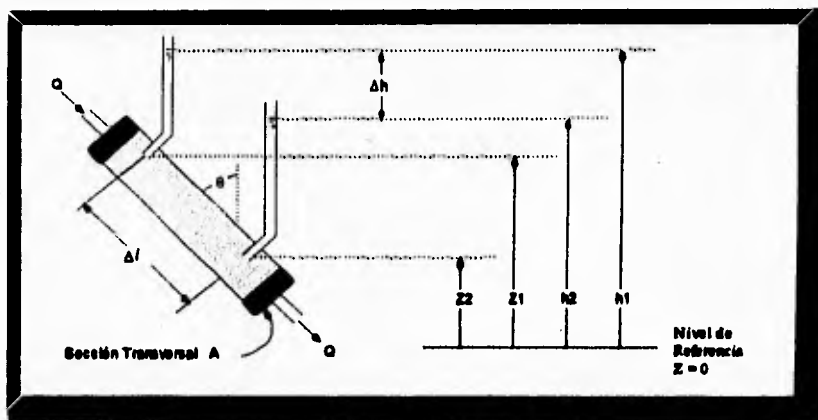


Figura 7. Aparato Experimental para demostrar la Ley de Darcy. (Tomado de Freeze y Cherry, 1979)

Utilizando el mismo dispositivo de la figura arriba mostrada, pero considerando un medio ideal poroso que consta de cuentas de vidrio de diámetro d , y haciendo pasar por este medio, diferentes fluidos de densidad ρ y viscosidad dinámica μ bajo un gradiente hidráulico constante dh/dl , se ha observado que se cumplen las siguientes relaciones:

$$v \propto d^2$$

$$v \propto \rho g$$

$$v \propto 1/\mu$$

y junto con la proporción que encuentra Darcy: $v \propto -dh/dl$, estas tres relaciones conducen a una nueva forma de expresar la ecuación (1):

$$v = -(c \sigma^2 \rho g / \mu) (dh/dl) \dots\dots\dots (2)$$

donde el parámetro c es otra constante de proporcionalidad. Es necesario enfatizar que para suelos reales, se considera la influencia de otras propiedades del medio que afectan al flujo, entre ellas: la redondez, rugosidad y distribución del tamaño de grano, así como la naturaleza del empaquetamiento.

Comparando (1) y (2) se tiene que:

$$K = (c \sigma^2 \rho g / \mu) \dots\dots\dots (3)$$

donde ρ y μ son variables dependientes únicamente del fluido y $c\sigma^2$ es función solamente del medio. De ahí que se define a k , como:

$$k = c \sigma^2 \dots\dots\dots (4)$$

valor conocido como la permeabilidad específica o intrínseca, tiene unidades de (L^2) y caracteriza la capacidad del medio para transmitir cualquier fluido. K es la constante de proporcionalidad en la ley de Darcy, y se le conoce como conductividad hidráulica, aunque algunos autores la denominan simplemente permeabilidad.

Sustituyendo la ecuación (4) en (3), se obtiene:

$$K = (k \rho g) / \mu$$

relación donde se observa que la conductividad hidráulica está afectada tanto por propiedades del medio, como del fluido, y con sus unidades de velocidad (ecuación 1), caracteriza la capacidad del medio para transmitir agua. De esta manera el término conductividad hidráulica (K) se aplica muy frecuentemente en la literatura de aguas subterráneas, mientras que el término permeabilidad (k) es utilizado más propiamente en la industria petrolera, donde los fluidos de interés son: aceite, gas y agua.

3.2. Métodos de Medición de la Conductividad Hidráulica

Existen básicamente dos grupos de métodos de obtención de la conductividad hidráulica; de campo y de laboratorio. Dentro de los métodos de campo se encuentran:

- a) Los de tipo Luggeon.
- b) Lefranc.
- c) Pruebas de bombeo en pozos.
- d) Pruebas en piezómetros.

Entre los métodos de laboratorio se usan los de permeámetro de carga constante y los de carga variable, y en el caso de sedimentos arcillosos, por consolidómetro.

Dentro de las pruebas en piezómetros existen dos tipos -"bailing test" y "slug test"- (Freeze y Cherry, 1979); el "bailing test" (recuperación de nivel), consiste en extraer del piezómetro una columna de agua y llevar una medición de los niveles dinámicos, es decir, en su avance a la recuperación en función del tiempo, hasta alcanzar el equilibrio; mientras que en el "slug test" (abatimiento de nivel) se agrega una columna de agua al piezómetro y se registra, igualmente la recuperación con respecto al tiempo. En el presente estudio se utilizó el método de recuperación descrito por Hvorslev (1951), debido a que se evitó agregar agua extraña que modificara las características químicas en los piezómetros. Cabe mencionar que estos piezómetros también son utilizados para obtener muestras de agua de poro del acuitardo para análisis químicos e isotópicos.

3.3 Descripción del Método de Hvorslev

Hvorslev (*in Freeze y Cherry op. cit.*), considera un medio infinito, homogéneo, isotrópico y en el cual ambos, suelo y agua son incompresibles. Con referencia al método de recuperación de la figura 8, Hvorslev establece que el gasto de entrada, q , que pasa por el filtro del piezómetro en cualquier tiempo t es proporcional a la conductividad hidráulica, K , del suelo y a la diferencia de carga no recuperada, $(H - h)$,

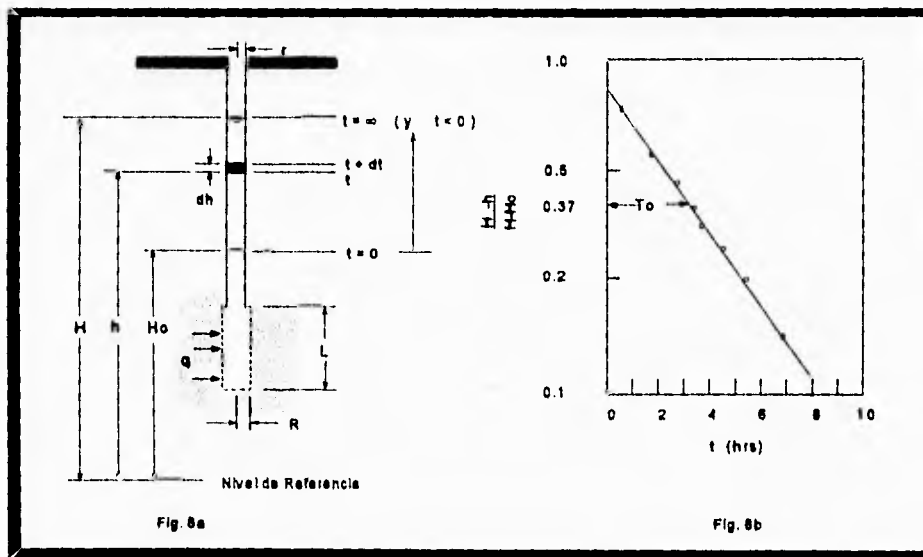


Figura 8a. Geometría en la prueba de recuperación según Hvorslev (1951).

Figura 8b. Método de análisis de la prueba de recuperación. (Tomado de Freeze y Cherry, 1979).

donde:

H - es la altura inicial del nivel piezométrico (Fig. 8a).

h - es la altura del nivel en recuperación.

H_0 - es la altura del nivel en su máximo abatimiento.

Todas estas alturas están relacionadas a un nivel de referencia conocido.

Así se tiene que:

$$q(t) = \pi r^2 (dh/dt) = FK(H-h) \quad \dots\dots (5)$$

donde F es un factor que depende de la geometría y tipo de piezómetro.

Si $q = q_0$ en $t = 0$ resulta que $q(t)$ decrecerá asintóticamente hacia cero conforme transcurra el tiempo.

Por otro lado, Hvorslev define el tiempo básico de retardo T_0 , como

$$T_0 = \pi r^2 / FK \quad \dots\dots (6)$$

de donde $FK = \pi r^2 / T_0 \quad \dots\dots (7)$

sustituyendo (7) en (5):

$$dh/dt = (H-h) / T_0$$

Resolviendo la ecuación diferencial con condiciones iniciales, $h = H_0$ en $t = 0$

$$H-h / H-H_0 = e^{-t/T_0} \quad \dots\dots (8)$$

es de notarse que si:

$$H-h / H-H_0 = 0.367879 \approx 0.37 \quad \dots\dots (9)$$

entonces

$$\ln 0.37 \approx -1$$

$$\ln (H-h / H-H_0) = -1 \quad \dots\dots (10)$$

Obteniendo logaritmos en la ecuación (8) y sustituyendo (10) en (8) queda:

$$-1 = -t/T_0$$

$$T_0 = t$$

Entonces, T_0 puede ser definido por la relación expresada en la ecuación (9).

Luego, el valor de T_0 es medido gráficamente o por una regresión numérica y K es determinado a partir de la ecuación (6).

Para un piezómetro de largo L y radio R , como lo indica la figura 8a, con $L/R > 8$, Hvorslev evaluó el factor F , resultando la expresión para K , como sigue:

$$K = (r^2 \ln(L/R))/2LT_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

Fórmula que se utiliza en el presente trabajo con valores de

$$r = 0.0048 \text{ m}$$

$$L = 0.20 \text{ m}$$

$$R = 0.0125 \text{ m}$$

valores correspondientes al piezómetro, donde se cumple que $L/R > 8$; por lo que el objeto de realizar la prueba de recuperación, es la obtención del valor del tiempo de retardo T_0 , mediante el registro de la prueba y la realización de una regresión lineal confiable (Fig. 8b).

3.4. Descripción de las pruebas de campo

Las pruebas de permeabilidad por recuperación del nivel de agua en los piezómetros, se realizaron, según el método diseñado por M. Juul Hvorslev (1951) en el acuitardo lacustre de la Subcuenca de Chalco, a profundidades que varían de 2 hasta 85 metros, durante los meses de enero a mayo de 1984. Las redes de piezómetros están distribuidos en la planicie del acuitardo lacustre en 25 sitios diferentes, según se aprecia en la figura 6.

Para la realización de las pruebas, se utilizó en campo un muestreador tipo "bailer" de 6mm de diámetro que se introduce al piezómetro para extraer el agua. La recuperación del nivel piezométrico se midió con una sonda eléctrica. Se llevó un registro de los datos en hojas de formato diseñado para llevar el control de la prueba. Los datos se graficaron de acuerdo con el método de Hvorslev, en escala semilogarítmica (Fig. 8b).

La prueba tiene comienzo en el momento de extraer la columna de agua, que para este trabajo fué de 1 metro, instante que es marcado en la Hoja de Registro como $t_0 = 0$ y el avance de recuperación, se anota en porcentaje no recuperado contra el tiempo a partir del inicio de la extracción de agua (Fig. 8a y 8b). Es decir, cuando $h = H_0$ se tiene $(H-h/H-H_0) = 100\%$ que es el porcentaje que falta por recuperarse para que el nivel alcance su altura original, esto sucede cuando $t_0 = 0$. De igual manera, cuando $h = H$ se tiene $(H-h/H-H_0) = 0\%$, que puede suceder en dos casos, uno cuando $t < 0$, es decir no se ha extraído el agua del piezómetro, y cuando $t = \text{infinito}$ (Fig. 8a). Estas parejas de valores (tiempo vs $(H-h / H-H_0)$) se grafican, en el eje de las abscisas el tiempo, y en el de las ordenadas a escala logarítmica, el porcentaje que

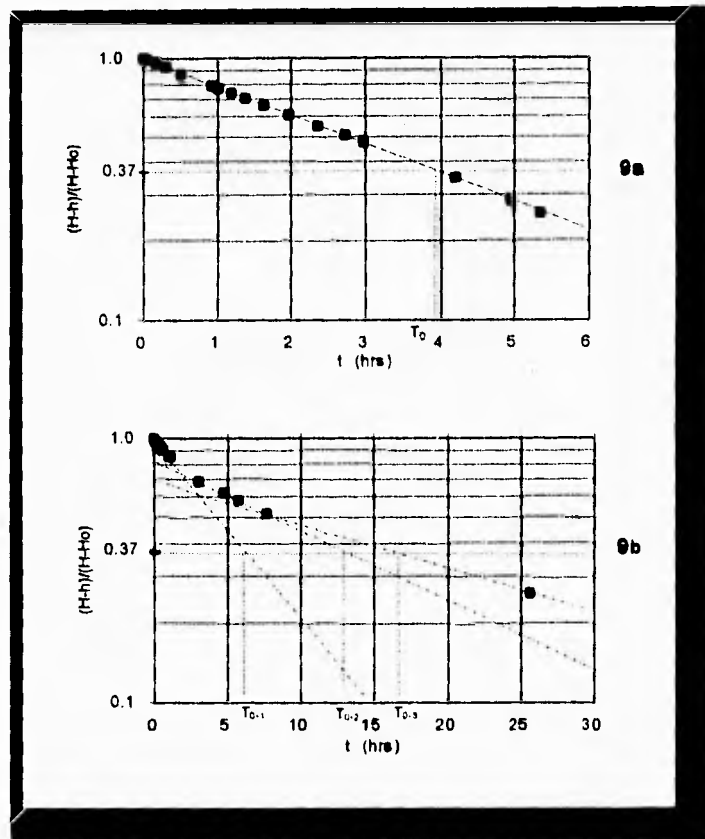


Figura 9a. Prueba tipo de recuperación según la propuesta por Hvorslev (1951), obtenida en la Subcuenca de Chalco.

Figura 9b. Prueba de recuperación característica obtenida en la Subcuenca de Chalco.

Vargas-Cabrera, Carlos., Tesis Profesional, 1995.

falta por recuperar. De acuerdo con Hvorslev, la gráfica ideal resultante sería una línea recta con pendiente negativa (Figs. 8b y 9a). Al graficar los datos, para algunas pruebas no se obtiene una tendencia lineal recta, por lo que los puntos se ajustaron

mediante regresiones lineales para obtener el valor de T_0 . En el presente trabajo se aplicaron tres tipos de correlación, éstas son:

- 1) Gráfica, realizada *in situ* en las hojas de registro;
- 2) Por calculadora de bolsillo, igualmente *in situ*, y;
- 3) Mediante el programa de computadora Qpro 4.0, realizada en gabinete.

Una vez obtenidos estos valores de T_0 para cada prueba, se realizaron los cálculos de K de acuerdo con la ecuación (11). Los cálculos para obtener la conductividad hidráulica se realizaron en los programas de computadora Excel 5.0 y Qpro 4.0.

CAPITULO 4. DISCUSION DE RESULTADOS

4. DISCUSION DE RESULTADOS

Se realizaron un total de 136 pruebas de permeabilidad en la planicie de Chalco, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

Las figuras 9a y 9b, muestran los resultados de dos pruebas representativas de recuperación del nivel de acuerdo con el método gráfico de Hvorslev. La figura 9a muestra una tendencia de los puntos similar a la propuesta por Hvorslev (*op. cit.*) (Fig. 8b), sin embargo, también se obtuvieron curvas como las de la figura 9b, donde se observan tres segmentos diferentes en la tendencia de la curva. De acuerdo con este método, únicamente son útiles específicamente los valores de t para definir el valor de T_0 para $(H-h)/(H-H_0) = 0.37$. Según Freeze y Cherry (1979), cuando el factor $((H-h)/(H-H_0))$ es menor a 0.01 (10%), se hace asintótica en el tiempo. Sin embargo, para las pruebas realizadas en la subcuenca de Chalco, se obtuvieron líneas compuestas por dos o más segmentos de recta con pendiente variable y algunas veces ligeramente curvadas antes de llegar al 60% de recuperación, siendo al final de la prueba, asintóticas entre el 40% y 20% por recuperar (Fig. 9b). De acuerdo con Van der Kamp (comunicación personal, SRC, Saskatoon Saskatchewan, Canadá, 1994), este comportamiento es común en este tipo de materiales de baja permeabilidad, donde el primer segmento de la prueba es el que se considera para el cálculo de la conductividad hidráulica.

La última etapa de la curva no tiene relevancia en la aplicación del método, ya que el objeto de tener un listado de parejas t vs $(H-h/H-H_0)$, es obtener una gráfica con una recta en donde podamos calcular el valor T_0 cuando $(H-h/H-H_0) = 0.37$, lo que se puede lograr realizando una interpolación, ya sea gráfica (Figs. 9a y 9b) o numérica.

Hvorsiev fundamenta la búsqueda de este valor de acuerdo a lo descrito en la sección anterior.

De entre los diferentes métodos de correlación, se observó que el más confiable es el obtenido a través del método gráfico, pues los datos obtenidos mediante la regresión de calculadora no correspondían con los que en ese momento se estaban obteniendo de la prueba, debido a las diferentes tendencias. Igual comportamiento tuvo la regresión efectuada con el programa Qpro 4.0. Es por ello que se trabajó con los valores de T_0 obtenidos por métodos gráficos.

Del total de las 136 pruebas, la conductividad hidráulica de los sedimentos lacustres, varía entre 9×10^{-12} m/s y 5×10^{-6} m/s, incluyendo unidades arcillosas y "capas duras", con un promedio aritmético de 5×10^{-8} m/s (Tabla 1). Los resultados obtenidos quedan incluidos dentro del rango de valores reportados en mecánica de suelos por Mesrie y Bohor (1975) y por Juárez-Badillo (1987).

La figura 10, muestra la distribución de frecuencias para las 136 pruebas. En esta figura se observa una distribución cercana a la normal con moda de 1×10^{-8} m/s, una mediana de 2×10^{-9} m/s, un promedio aritmético de 1×10^{-9} m/s y una desviación estandar de 4.5×10^{-7} m/s, obtenidos mediante el programa Excel 5.0 (Tabla 1).

Las figuras 11a a 11c muestran la variación de la conductividad hidráulica contra la profundidad en tres áreas representativas dentro de la planicie lacustre (Fig. 6). La zona 1 corresponde a la zona de pozos de Sta. Catarina, donde el espesor del acuitardo es de 56m y sobreyace a basaltos cuaternarios. La zona 2 se ubica en el centro de la planicie lacustre, donde el espesor total de los sedimentos lacustre es de 300m. Por último, la zona 3 se ubica cerca de las márgenes lacustres al NE de la planicie, donde el acuitardo tiene un espesor de 16m y sobreyace al acuífero granular.

LOCALIDAD	ZONA	PROF. (m)	DISTRIBUCION	n	PROM.	MEDIANA	MODA	MAX.	MIN.	ESV. ES	VAR.
A. TOTAL	CHALCO	0-85	NORMAL	136	5E-08	1.9E-09	1E-09	5.2E-06	1E-11	4.5E-07	2E-13
	UAS	0-20	NORMAL	101	7E-08	2.7E-09	1E-09	5.2E-06	5E-11	5.2E-07	2.7E-13
	CAPA DURA	20-25	BIMODAL	7	2E-08	5.5E-09	---	5.3E-08	2E-09	2.0E-08	4E-16
	UAI	25-56	BIMODAL	26	3E-10	1.5E-10	---	3.0E-09	3E-11	5.8E-10	3.3E-19
	ARCILLAS	0-85	NORMAL	128	5E-08	1.8E-09	1E-09	5.2E-06	9E-12	4.6E-07	2E-13
ZONA 1	STA. CATARINA	0-85	NORMAL	51	1E-07	1.9E-09	1.8E-08	5.2E-06	3E-11	7.3E-07	5.3E-13
ZONA 2	XICO	0-85	BIMODAL	39	1E-08	1E-09	---	1.7E-07	9E-12	2.9E-08	8.3E-16
ZONA 3	IZTAPALUCA	0-85	NORMAL	46	9E-09	2.4E-09	1.7E-09	7.8E-08	5E-11	1.6E-08	2.6E-16

Tabla 1. Estadísticos de diferentes zonas hidrogeológicas de la planicie de Chalco.

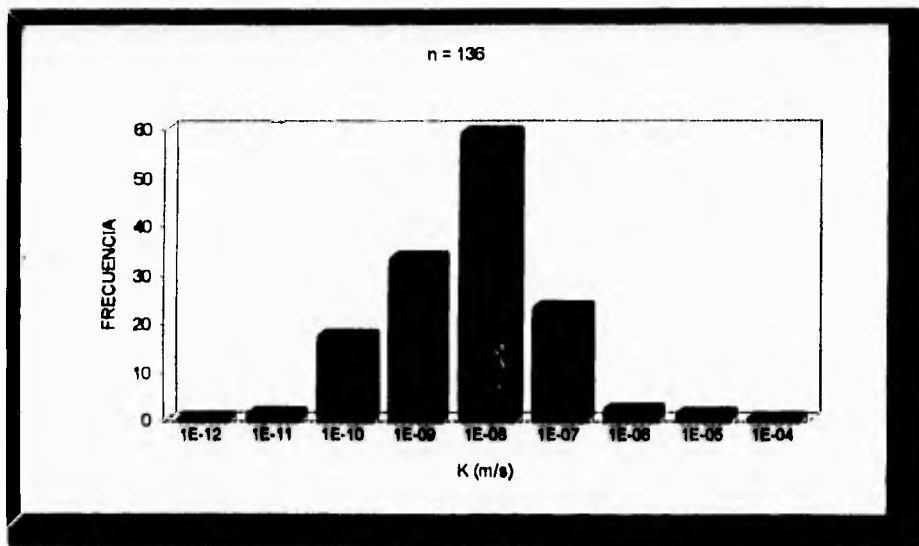


Figura 10. Distribución de frecuencias para la conductividad hidráulica del acuífero lacustre de la Subcuenca de Chalco.

Vargas-Cabrera, Carlos., Tesis Profesional, 1995.

En estas figuras (11a, 11b y 11c) se muestra una disminución de la conductividad hidráulica a medida que se incrementa la profundidad. En general se observa que los valores de conductividad hidráulica más altos se encuentran en la unidad arcillosa superior, arriba de la primer "capa dura"; mientras que las conductividades hidráulicas más bajas se encuentran por debajo de ésta.

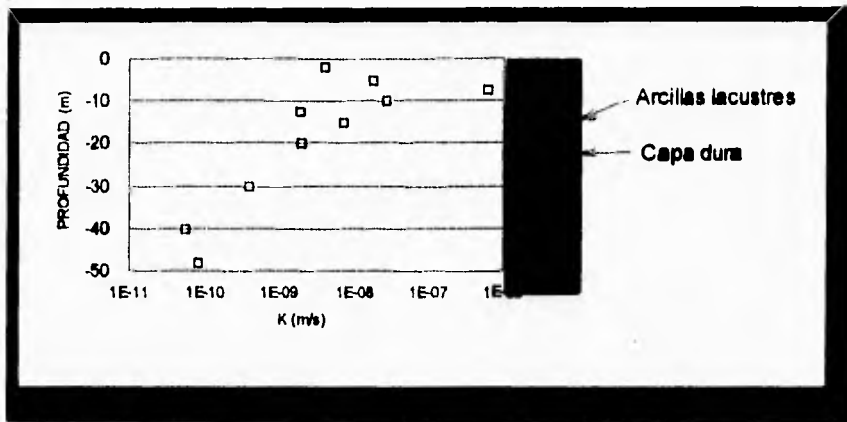


Fig. 11a. Perfiles característicos por zona de la Subcuenca de Chalco: Zona 1 (Sta. Catarina).

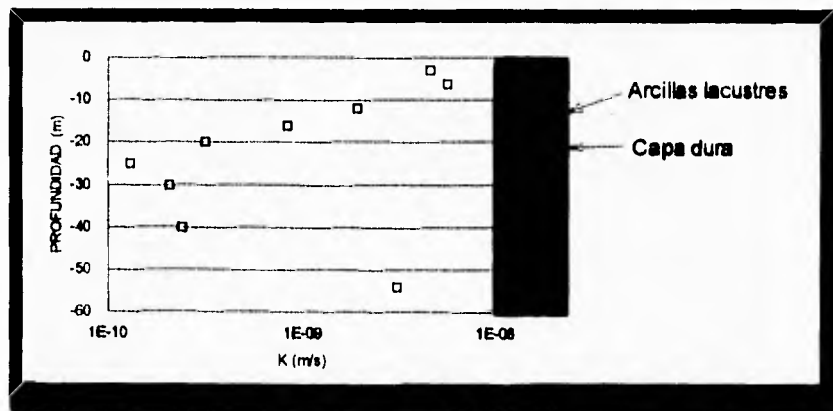


Fig. 11b. Perfiles característicos por zona de la Subcuenca de Chalco: Zona 2 (Xico).

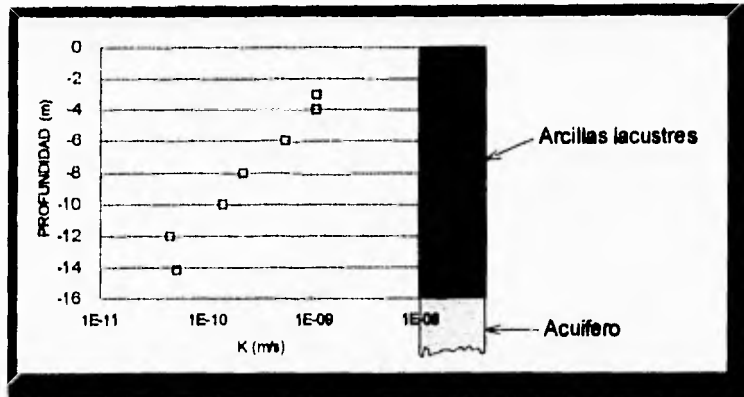


Fig. 11c. Perfiles característicos por zona de la Subcuenca de Chalco: Zona 3 (bdapaluca).

Con el fin de determinar las variaciones estadísticas de la conductividad hidráulica en la unidad arcillosa superior con respecto a la unidad arcillosa inferior, se llevó a cabo un análisis de distribución de frecuencias para cada unidad. La figura 12a muestra la distribución de frecuencias para la unidad arcillosa superior, para todas las pruebas realizadas entre 2 y 20m de profundidad. La Figura 12c, ilustra dicha distribución para la unidad arcillosa inferior, comprendida entre 25 y 50m de profundidad. Ambas figuras muestran una distribución cercana a la normal. Para la unidad arcillosa superior (Fig 12a) se obtuvo una media de 6×10^{-8} m/s, una mediana de 2.8×10^{-9} , una moda de 1×10^{-9} y una desviación estándar de 5×10^{-7} m/s (Tabla 1). Para las "capas duras" (Fig. 12b) se obtuvo distribución bimodal con valores de mayor frecuencia de 1×10^{-8} y 1×10^{-7} m/s, y una desviación estándar de 2×10^{-8} m/s (Tabla 1). Para la unidad arcillosa inferior se obtuvo una mediana de 1.5×10^{-10} m/s, con dos modas: una dominante de 1×10^{-9} y la otra de 1×10^{-10} m/s. La mediana de la unidad arcillosa superior es mayor en un orden

de magnitud que la obtenida para la unidad arcillosa inferior y con respecto a la frecuencia del total de pruebas. El hecho de que la unidad arcillosa superior y hasta la

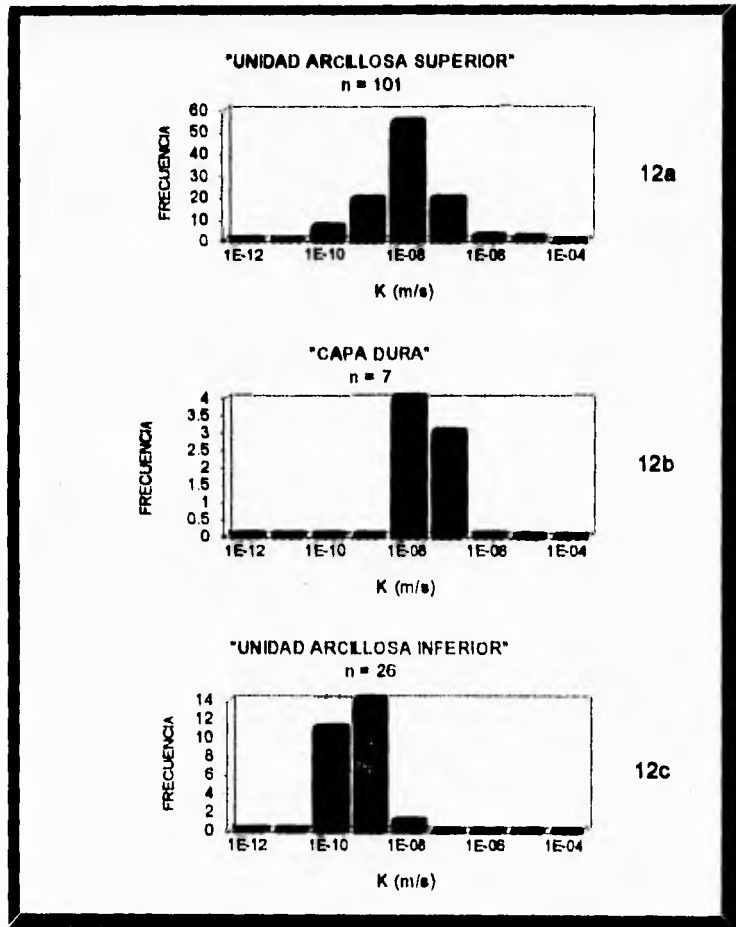


Figura 12. Distribución de frecuencias para la conductividad hidráulica, por unidades del acuífero lacustre de Chalco. Profundidades: 12a) 0-20m; 12b) 20-25m; 12c) 25-50m.

Vargas-Cabrera, Carlos., Tesis Profesional, 1995.

primer "capa dura" presenten las conductividades hidráulicas mayores, puede atribuirse a la presencia de fracturas más que a la presencia de lentes de arena, que también existen en la unidad arcillosa superior, lo cual es consistente con los resultados de migración de solutos realizados por Ortega (1993). Este autor concluye, a partir de la simulación numérica de perfiles químicos e isotópicos en diversas zonas de la planicie lacustre de Chalco, que los primeros 20-25 metros de profundidad, están fracturados. Kamp (1994) reporta que los valores de la conductividad hidráulica puede evidenciar la presencia de fracturas. Este autor reporta valores para la conductividad hidráulica con dos órdenes de magnitud mayores a los obtenidos en zonas no fracturadas. Keller *et al.* (1989) reportan valores de conductividad hidráulica entre 1.7×10^{-11} m/s y 8.5×10^{-11} m/s para formaciones arcillosas glacio-lacustres en Canadá; mientras que para zonas afectadas por fracturamiento reportan conductividades hidráulicas entre 1.4×10^{-11} m/s y 8×10^{-9} m/s. Estos datos obtenidos en otros sedimentos de baja permeabilidad en Norteamérica son consistentes con los obtenidos en el acuitardo de Chalco, tanto para las arcillas no fracturadas como para las fracturadas. Esto indica que el comportamiento de los sedimentos arcillosos de la Subcuenca de Chalco es similar a otros sedimentos arcillosos en el mundo. Con base en estos resultados, puede sugerirse que los valores de conductividad hidráulica para las arcillas no fracturadas corresponden a los intervalos medidos en la unidad arcillosa inferior y los valores de conductividad hidráulica por encima de esta unidad, corresponden en su mayor parte a valores influenciados por la presencia de fracturas. En este trabajo se propone que el límite superior de conductividad hidráulica para arcillas fracturadas es de 1×10^{-9} m/s. Conductividades hidráulicas mayores a éste valor, pueden indicar la presencia de fracturas, o bien, horizontes de arena. Asimismo, los valores menores de 1×10^{-9} m/s y

obtenidos a profundidades por arriba de la primer capa dura, podrían provenir de zonas no afectados por fracturas, al menos en donde está ubicado el piezómetro.

Con el fin de mostrar la distribución de frecuencias de la conductividad hidráulica en las tres diferentes zonas hidrogeológicas definidas anteriormente se presentan las Figuras 13a, 13b y 13c. En estas tres figuras se ilustra como en las zonas de Sta. Catarina (zona 1, Fig. 13a) e Ixtapaluca (zona 3, Fig. 13c) la moda es de 1×10^{-6} m/s. Las frecuencias para la conductividad hidráulica para 1×10^{-10} , 1×10^{-9} y 1×10^{-7} m/s son muy semejantes en la zona de Sta. Catarina; mientras que en la zona de Ixtapaluca domina la frecuencia de 1×10^{-7} sobre 1×10^{-10} y 1×10^{-9} m/s.

En el caso de la zona de Xico (Fig. 13b) se presenta una distribución bimodal con conductividad hidráulica de 1×10^{-9} y 1×10^{-6} m/s. De estos valores se observa que la media de K para la zona de Sta. Catarina (1.83×10^{-7} m/s), es dos órdenes de magnitud menor que el valor correspondiente para Ixtapaluca (8.96×10^{-9} m/s) , siendo un valor intermedio la media de K de la zona de Xico (1.05×10^{-8} m/s).

La alta conductividad hidráulica del acuitardo debido principalmente a la presencia de fracturas, que es de dos a tres órdenes de magnitud mayores en los primeros 20-25 metros de profundidad arriba de la primer "capa dura" con respecto a la unidad arcillosa inferior, tiene implicaciones hidrogeológicas importantes, como es el hecho de que no representa una barrera a la migración de contaminantes disueltos en la superficie de la planicie de Chalco, principalmente en todas aquellas zonas periféricas a la planicie. Este comportamiento posiblemente es similar a otras zonas lacustres de la Cuenca de México, ya que todos los contaminantes provenientes de la práctica agrícola, industrial y urbana migrar a velocidades de dos a tres órdenes de

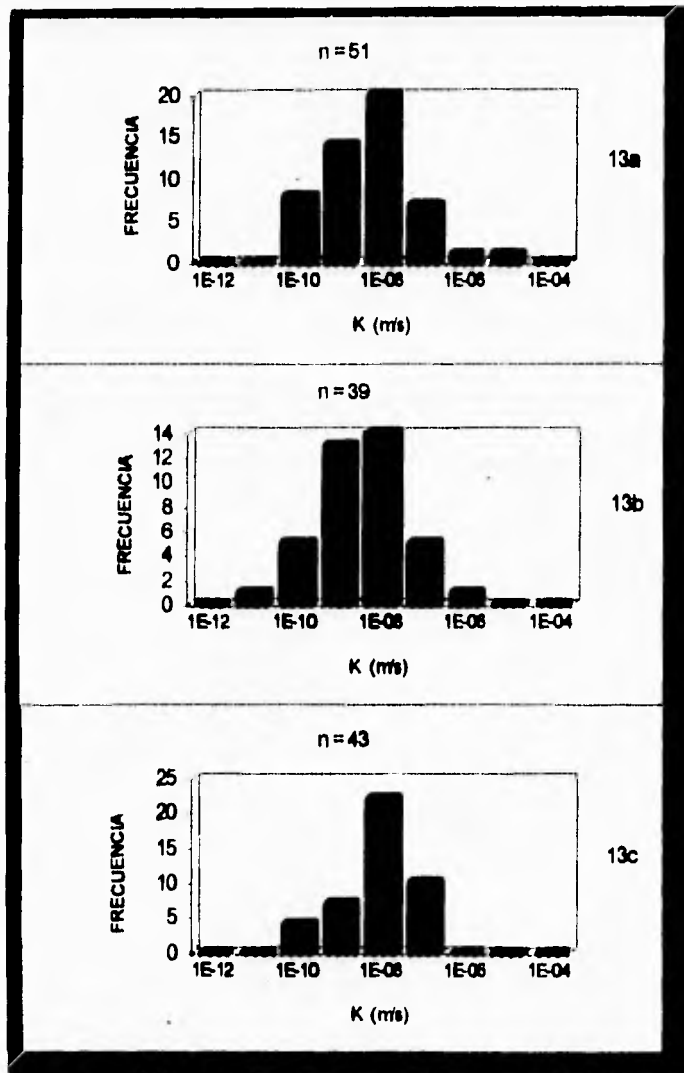


Figura 13. Distribución de frecuencias de conductividad hidráulica por zonas: 13a) Zona 1 (sta. Catarina); 13b) Zona 2 (Mco); 13c) Zona 3 (Ixtapaluca).

Vargas-Cabrera, Carlos., Tesis Profesional, 1995.

magnitud mayores que lo que podría estimarse si se consideran las arcillas como no fracturadas. Por ejemplo, aplicando la ecuación

$$v = Ki/\phi \quad (\text{Freeze y Cherry, 1979}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

donde v -es la velocidad promedio lineal del agua subterránea

K - la conductividad hidráulica

i - el gradiente hidráulico

ϕ - la porosidad efectiva

y si consideramos la migración de un contaminante no reactivo para dos situaciones diferentes, una en la cual el medio lacustre no está fracturado y otra en la que si existen fracturas, se tendrían las siguientes velocidades de migración de este soluto:

1) Para una unidad arcillosa no fracturada:

$$K_{\text{no fract.}} = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$\phi = 0.8 \quad (\text{Ortega et al., 1993})$$

$$i = -0.08 \quad (\text{Ramírez, 1995})$$

$$v_{\text{no fract.}} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s} = 3.1 \times 10^{-3} \text{ m/a} = 0.3 \text{ cm/a}$$

2) Para valores de K de un sitio fracturado :

$$K_{\text{fract.}} = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$\phi = 0.8 \quad (\text{Ortega, op. cit.})$$

$$i = -0.08 \quad (\text{Ramírez, op. cit.})$$

$$v_{\text{fract.}} = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s} = 3.1 \times 10^{-1} \text{ m/a} = 31.1 \text{ cm/a}$$

CAPITULO 5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

1.- La conductividad hidráulica medida a través de 136 pruebas de recuperación del nivel piezométrico en piezómetros individuales ubicados a profundidades que varían entre 1 y 85 metros en el acuitardo lacustre de Chalco, varía entre 9×10^{-12} m/s y 5×10^{-6} m/s interpretadas por el método de Hvorslev. La conductividad hidráulica sigue una distribución normal o Gaussiana cuya mediana tiene un valor de 2×10^{-9} m/s, mientras que la media aritmética es de 5×10^{-8} m/s .

2.- La conductividad hidráulica en los primeros 20 metros de profundidad del acuitardo, arriba de la primer capa dura, varía entre 2.7×10^{-11} m/s y 5.2×10^{-6} m/s, con mediana de 2.8×10^{-9} m/s y una media aritmética de 6.3×10^{-8} m/s. Abajo de la primer capa dura, la conductividad hidráulica varía entre 1.1×10^{-9} m/s y 9×10^{-12} m/s con una mediana de 1.5×10^{-10} m/s y un promedio aritmético de 2×10^{-10} m/s. La diferencia de la conductividad hidráulica entre los primeros 20m de profundidad con respecto a la medida a profundidades entre 20 y 85m es de dos a tres órdenes de magnitud mayor. Se sugiere que los valores de la conductividad hidráulica menores a 1×10^{-9} m/s corresponden a arcillas no fracturadas, mientras que los valores mayores corresponden a arcillas fracturadas.

3.- En general la conductividad hidráulica en el acuitardo lacustre disminuye a medida que se incrementa la profundidad. Los altos valores de la conductividad hidráulica en los primeros 20 metros de profundidad deben estar asociados con la presencia de fracturas en el acuitardo lacustre, lo cual es consistente con los resultados de estudios de transporte de solutos en el acuitardo y de la respuesta

hidráulica del mismo evaluada con piezómetros electrónicos que muestran evidencias de fracturamiento hasta esa profundidad.

4.- En general se identifica que la conductividad hidráulica en las capas duras ubicadas a 20 y 50 metros de profundidad, aproximadamente, es de dos a tres órdenes de magnitud mayor que en las zonas predominantemente arcillosas.

5.- La presencia de fracturas en el acuitardo, evidenciada por alta conductividad hidráulica entre la superficie y la primer capa dura, pueden representar una vía rápida para la migración de contaminantes hacia el acuífero subyacente en áreas donde el espesor del acuitardo es menor a 20 metros de profundidad.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

6. RECOMENDACIONES

Dado que el acuitado de la Subcuenca de Chalco no representa una barrera segura contra la migración de contaminantes, se propone enfatizar en reglamentar la colocación de desechos contaminantes sobre la superficie de la planicie lacustre, evitar vertir desechos líquidos sobre canales de riego, trasladar el pastoreo a la parte central de la planicie, utilizar aguas tratadas para el riego, así como no permitir la instalación de industrias generadoras de contaminantes sobre la planicie en cuestión.

De igual manera, conviene regularizar los asentamientos humanos en la zona, dotándolos de servicios públicos que canalicen los desechos domésticos hacia instalaciones seguras; así como llevar a cabo, por parte de las autoridades correspondientes, una revisión y adecuación de las políticas de uso del suelo.

Por otro lado, se sugiere realizar estudios encaminados a encontrar el origen del fracturamiento en la planicie, con el fin de tomar las medidas necesarias y evitar la generación de estas fracturas con el respectivo aumento de la conductividad hidráulica y consecuente vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. De la misma manera, es necesario realizar este tipo de estudios en la totalidad de la Cuenca de México, donde los problemas de abastecimiento de agua y subsidencia del terreno son mayores en una de las ciudades más grandes del mundo.

BIBLIOGRAFIA

- BLOOMFIELD, K., 1975, *A Late-Quaternary Monogenetic Volcano Field in Central Mexico.*, Geol. Rundschau, 64 (2), pp. 478-497.**
- BOUWER, H. y RICE, R. C., 1976, *A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers With Completely or Partially Penetrating Wells.*, Water Resources Research, v. 12, No. 3.**
- CNA-CAVM., 1991, *Boletín de Mecánica de Suelos.*, v. 10, 281 pp. México.**
- COOPER, H. H. Jr., BREDEHOEFT, J. D. y PAPADOPULOS Y. S., 1967, *Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water.* Water Resources Research., v. 3, No. 1, pp. 283-289. Water Resources Division, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.**
- CISNEROS, Z. DE, DE LA FUENTE-DUCH, M., PALACIOS-NIETO, M., TRIAY, L., MITRE-SALAZAR, L. M. y MOTA-PALOMINO, R., 1988, *Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México.*, Bol. 104, Instituto de Geología, UNAM, México.**
- DEMANT, A., 1978, *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación.*, Revista del Instituto de Geología, UNAM, México. Vol. 2, No. 2, pp. 70-83.**
- DIRECCION GENERAL DE GEOGRAFIA, 1981, *Carta de Climas. Cd. de México.*, 1ª Ed., Esc. 1:1000000.SPP., México.**
- DOMENICO, P. A. y SCHWARTZ, F. W., 1976, *Physical and Chemical Hydrogeology.*, Hamilton Printing Company.**
- DURAZO, J. y FARVOLDEN, R. N., 1989, *The Groundwater Regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations.*, Joul. Hydrol., v. 112, pp. 171-190.**
- EL COLEGIO DE MEXICO Y D.D.F., 1987, *Atlas de la Cd. de México.* Ed. El Colegio de México, México, 431 pp.**
- FREEZE, R. A. y CHERRY J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 604 pp.**

- FRIES, C. Jr., 1960, *Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México.*, Bol. del Instituto de Geología, No. 80, UNAM.
- GEYNE, R. V., FRIES, C. Jr., SEGERSTROM, K., BLACK, F. R. y WILSON, F. Y., 1963, *Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Edo. de Hidalgo, México.*, CRNR, México, D.F.
- HEATH, RALPH C., 1988, *Hydrogeologic Setting of Regions: The Geology of North America.*, in *Hidrogeology: Boulder.*, The Geological Society of America. Colorado. v. O-2, pp. 15-23.
- HVORSLEV, M. J., 1951, *Time lag and soil Permeability in Ground-water observations.*, *Waterways Experiment Station Corps. of Engineers, U.S. Army.*, Bol. No. 36., 50 pp., Vicksburg, Missisippi.
- JAME, A. P. y ROMO M. P., 1967, *Sondeos de cono eléctrico en los sitios de Chalco, Chalco II y Cuernavaca.* Instituto de Ingeniería, UNAM, México. 6 pp.,
- JUAREZ-BADILLO, E. y RICO-RODRIGUEZ, A., 1984, *Mecánica de Suelos*, T. 1, Ed. Limusa, México.
- JUAREZ-BADILLO, E., 1987, *Mechanical Characterization of Mexico City Clay.*, *Memorias del Simposio Internacional de Suelos Blandos.*, México, v. 1 pp. 65-69
- KAMP, G. V. DER, 1994, *Contaminant Transport in Clays: Detection of Open Fractures by Means of Permeability Tests.*, *The Twentieth Nabor Carrillo Lectures of the Mexican Society for Soil Mechanics.*, Jalapa, Veracruz, México. 19 pp.
- KELLER, C. K., KAMP G. V. DER, CHERRY J. A., 1989, *A Multiscale Study of the Permeability of a Thick Clayey Till.*, *Water Resources Research.*, v. 25., No. 11, pp. 2289-2317.
- MAYA-CORTEZ, V., 1991, *Estudio de las Propiedades Hidrodinámicas de una porción del Acuitardo de Tláhuac, D.F.*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- MARSAL, R. J. y MAZARI M., 1959, *The subsoil of Mexico City.*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, v. 1 y 2,
- MESRI, G., ROKHSAR A. y BOHOR, B. F., 1975, *Composition and Compressibility of Typical Samples of Mexico City clay.*, *Geotechnique* 25, No. 3, pp. 527-554.

- MOOSER, F., NAIRN, M. E. A. y NEGENDANK, F. W. J., 1974, *Paleomagnetic Investigations of the Tertiary and Quaternary Igneous Rocks: VII A Paleomagnetic and Petrologic Study of the Valley of Mex.*, Geol. Rundschau, 63 (2), pp. 451-483.
- NEGENDANK, J. F. W., 1972, *Volcanics of the Valley of Mexico.*, N. Jb. Miner. Abh.; 116, pp. 308-320.
- ORTEGA-GUERRERO M. A., 1988, *Analysis of Regional Groundwater Flow and Boundary Conditions in the Basin of Mexico.*, 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 Mexico.*, Joul. Hydrol., v. 110, pp. 271-294.
- ORTEGA-GUERRERO M. A., CHERRY, J. A. y RUDOLPH, D. L., 1993, *Large Scale Aquitard Consolidation Near Mexico City.*, Ground Water, v. 31, No 5, pp. 708-718
- 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.
- PEMEX., 1988, *Cortes Litológicos y registros geofísicos de los pozos profundos exploratorios Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco-1 y Copilco-1.*, Información consultada en la Fundación J. Barros Sierra A.C., México.
- RAMIREZ-R., A., 1978, *Ejercicios Sobre el Comportamiento de los Suelos.*, Depto. de Ing. Civil, Fac. de Ing., UNAM, México.
- RAMIREZ-ESQUIVEL, W. G., 1995, *Variación Horaria de la Carga Hidráulica en el Acuitardo Lacustre del Ex-Lago de Chalco D.F. y Edo de México.*, Tesis de Licenciatura (en prensa)., Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- RUDOLPH, D. L., CHERRY, J. A. y FARVOLDEN, R. N., 1991, *Field Investigations and solute transport in a lacustrine aquitard near Mexico City.*, Water Resources Res., v. 27, No. 9, pp. 2187-2201.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

RUDOLPH, D. L., HERRERA, I. y YATES, R., 1989, *Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City.*, *Geofísica Internacional* 28(2), pp. 363-408.

SAHAB-HADAD, E., 1992, *Acciones de la Gerencia de Aguas del Valle de México dentro del Programa Nacional de Agua Potable y Alcantarillado.*, *Agua Potable.*, Vol. 8.

SEGERSTROM, K., 1961, *Geología del SW del Edo. de Hidalgo y del EN del Edo. de México.*, *Bol. Asoc. Mex. de Geólogos Petroleros*, Vol. XIII, No. 3 y 4..

URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., y CASTILLO, L. DEL, 1977, *Un modelo del Eje Volcánico Mexicano.*, *Bol. de la Soc. Geol. Mex.*, Vol. 38, pp. 18-28.