

03090

2.
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONALES Y
POSGRADO DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
POSGRADO EN GEOFÍSICA**

**MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO Y
CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL ACUÍFERO EN
EXPLOTACIÓN EN LA PARTE MERIDIONAL
DE LA CUENCA DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
P R E S E N T A :**

ELISEO VÁZQUEZ SÁNCHEZ

4/75

MÉXICO, D.F.

1995

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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

**Esta tesis se la dedico a mi esposa
Alicia García Tovar
a mi hijo
Eliseo Vázquez García
y a mis padres
Leonor Sánchez Hernández[†]
Rogelio Vázquez Jaimes**

FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	1
1.0 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Estudios Previos	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Métodos de Estudio	4
1.4 Descripción General de la Región Estudiada	6
2.0 GEOLOGÍA	9
2.1 Historia Geológica	9
2.2 Estructura Geológica Regional	12
3.0 MARCO HIDROGEOLOGICO	13
3.1 Unidades Hidrogeológicas	13
3.1.1 Unidades Permeables	13
3.1.2 Unidades de Baja Permeabilidad	25
3.2 Modelo Conceptual	30
3.2.1 Acuitardo Superior	30
3.2.2 Acuífero Superior	30
3.2.3 Acuitardo Inferior	33
3.2.4 Acuífero Inferior	35
4.0 ANÁLISIS DE PRUEBA DE BOMBEO	37
4.1 Comportamiento Hidráulico del Acuífero Superior	37
4.2 Transmisividad y Conductividad Hidráulica del Acuífero Superior	43
5.0 MODELACIÓN NUMÉRICA DE PRUEBAS DE BOMBEO	53
5.1 Implementación del Modelo	55
5.2 Características Hidráulicas del Acuífero Superior	58
6.0 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
7.0 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS	72
7.1 Conclusiones	72
7.2 Estudios Futuros	75
AGRADECIMIENTOS	77
REFERENCIAS	78

FIGURAS

	Página
1.3.1 Localización de la región estudiada	7
3.1.1 Localización de pozos con registros litológicos y geofísicos, considerados para determinar la geología del subsuelo en la parte meridional de la Cuenca de México.	14
3.1.2 Localización de sondeos geofísicos de superficie considerados para determinar la geología del subsuelo en la parte meridional de la Cuenca de México.	15
3.1.3 Plano que muestra los afloramientos de las unidades hidrogeológicas en la parte meridional de la Cuenca de México.	16
3.1.4 Secciones geológicas (A-A', B-B') que muestran el modelo conceptual hidrogeológico en la parte meridional de la Cuenca de México.	17
3.1.5 Registros litológicos y geofísicos de pozos representativos a lo largo de la sección geológica B-B'. Incluye información de sondeos geofísicos de superficie.	18
3.1.6 Variación de la temperatura y contenido de STD en el agua subterránea durante la prueba de bombeo en el pozo P-P3 localizado en el centro de la planicie de Texcoco (Adaptada de Proyecto Texcoco, 1969).	20
3.1.7 Resultados de los aforos realizados por tramos acumulativos en el pozo profundo P-P1, localizado en el centro de la planicie de Texcoco (Adaptada de Proyecto Texcoco, 1969).	24
3.1.8 Registros de temperatura y velocidad de flujo de agua subterránea, durante aforos por tramos selectivos en el pozo profundo P-P1 (Adaptada de Proyecto Texcoco, 1969).	28
3.2.1 Espesores del acuitardo superior (depósitos lacustres del Cuaternario).	31
3.2.2 Profundidad a la base del acuífero superior.	32
3.2.3 Límite entre zonas de acuífero superior libre y semiconfinado en las planicies lacustres.	34
3.2.4 Profundidad a la cima del acuífero inferior (rocas carbonatadas del Cretácico).	36
4.1.1 Localización de pruebas de bombeo analizadas y evaluadas con métodos estándar y simuladas numéricamente con el modelo de flujo de agua radial hacia un pozo.	38
4.1.2 Comportamiento hidráulico y naturaleza del medio poroso del acuífero superior, determinados con base en el análisis de pruebas de bombeo a caudal constante.	39
4.1.3 Pruebas de bombeo a caudal constante representativas del comportamiento libre del acuífero superior en los medios porosos granulares de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario (A) y de los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario (B).	40

4.1.4	Pruebas de bombeo a caudal constante representativas del comportamiento libre y fracturado de doble porosidad del acuífero superior en las rocas basálticas del Cuaternario. Respuesta elástica de fracturas y flujo interporosidad (A), respuesta elástica de fracturas y matriz (B).	42
4.1.5	Pruebas de bombeo a caudal constante representativas del comportamiento semiconfinado del acuífero superior. Medio granular en los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario (A) y medio de doble porosidad en los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario y rocas basálticas del Cuaternario (B).	44
4.2.1	Conductividad hidráulica del acuífero superior evaluada de pruebas de bombeo con métodos estándar y modelación numérica de flujo de agua radial hacia un pozo.	51
5.1	Esquema hidrogeológico que representa el modelo de flujo de agua radial hacia un pozo (Rushton y Redshaw, 1979; Rathod y Rushton, 1984).	56
5.2.1	Prueba de bombeo a caudal constante modelada numéricamente que representa el comportamiento libre del acuífero superior en el medio granular de los sedimentos aluvio-lacustres del cuaternario (Qall). Depósitos lacustres del Cuaternario (Qla) y depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior (Tpal).	60
5.2.2	Prueba de bombeo a caudal constante modelada numéricamente bajo condiciones de acuífero superior libre en el medio fracturado de doble porosidad de las rocas basálticas del Cuaternario (Qb). Depósito lacustres del Cuaternario (Qla) y depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior (Tpal).	61
5.2.3	Prueba de bombeo a caudal constante simulada numéricamente que representa el comportamiento libre del acuífero superior en el medio granular de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario (Qall). Depósitos lacustres del Cuaternario (Qla), y depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior (Tpal).	62
5.2.4	Prueba de aforo representativa modelada numéricamente bajo condiciones de acuífero superior libre en el medio fracturado de las rocas basálticas del Cuaternario (Qb). Depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior (Tpal).	63
5.2.5	Secciones geológicas que muestran los valores de la conductividad hidráulica horizontal (K_h), obtenidos de la simulación numérica de pruebas de bombeo.	64
5.2.6	Rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c) del acuífero superior, obtenidos de la simulación numérica de pruebas de bombeo.	65
6.1	Relación caudal de extracción (Q) vs caudal específico (Q_s).	69

FALLA DE ORIGEN

TABLAS

	Página	
2.1	Procesos geológicos y régimen hidrológico en la Cuenca de México	10
4.2.1	Características hidráulicas del acuífero superior (medio granular-comportamiento libre).	45
4.2.2	Características hidráulicas del acuífero superior (medio granular-comportamiento semiconfinado).	46
4.2.3	Características hidráulicas del acuífero superior (medio fracturado-condición libre).	47
4.2.4	Características hidráulicas del acuífero superior (medio de doble porosidad-condición libre).	48
4.2.5	Características hidráulicas del acuífero superior (medio de doble porosidad-condición libre).	49
4.2.6	Resumen de las características hidráulicas del acuífero superior.	50
5.1	Archivo de datos para el modelo numérico de flujo radial hacia un pozo.	57

ANEXOS

1	Registros litológicos y geofísicos de pozos productores y exploratorios. Incluye correlación estratigráfica entre pozos e información de sondeos geofísicos de superficie.	82
2	Análisis y evaluación de pruebas de bombeo con métodos estándar y con modelación numérica de flujo de agua radial hacia un pozo. El mecanismo de flujo en cada prueba de bombeo simulada, es obtenido con los resultados del modelo numérico	85

FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

En la presente tesis se define el modelo conceptual hidrogeológico y las características hidráulicas (K , S_y , S_c) del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. La naturaleza y distribución superficial y subsuelo de los acuíferos y acuitardos de la región, se determinaron con base en información de mapas geológicos, registros de pozos y sondeos geofísicos de superficie. Las características hidráulicas, se evaluaron de la información de pruebas de bombeo con la aplicación de métodos estándar y con un modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo.

Se ha reconocido un acuífero superior en explotación y un acuífero inferior profundo. El acuífero superior de espesor variable entre 400 y 600 m, está integrado por varias unidades volcánicas y sedimentarias de edad Plioceno superior al Cuaternario. El acuífero inferior que contiene agua salina ($STD \approx 11,200$ mg/l) y que se encuentra a 2,000 y 3,900 m de profundidad, es formado por rocas carbonatadas del Cretácico permeables por fracturamiento y disolución. Los dos acuíferos se encuentran separados hidráulicamente por un potente acuitardo inferior de 830 a 2,600 m de espesor, el cual es formado por varias unidades volcánicas y sedimentarias de baja permeabilidad y edad Cretácico superior al Plioceno inferior. En las zona montañosas, el acuífero superior se comporta como libre en medios volcánicos granulares y fracturados de doble porosidad. En el interior de las planicie lacustres es semiconfinado en su cima por el acuitardo superior constituido por arcillas lacustres del Cuaternario. También es libre en las márgenes de las planicies en donde su nivel piezométrico se encuentra por debajo el acuitardo superior. El comportamiento hidráulico del acuífero superior en las márgenes de las planicies, se ha transformado de semiconfinado a libre por efecto de la concentración del bombeo y limitada transmisión de la recarga a través de los depósitos piroclásticos considerados como la unidad menos permeable del acuífero superior.

El rango de valores de la conductividad hidráulica obtenidas con los métodos estándar ($8.6 \times 10^{-6} < K < 3.7 \times 10^{-5}$ m/s) y con el modelo numérico ($1.7 \times 10^{-5} < K_h < 4.9 \times 10^{-5}$ m/s), están en acorde con la naturaleza de los medios porosos en el acuífero superior. Los valores más bajos se presentan en los depósitos piroclásticos compactos mal clasificados y los más altos en las rocas basálticas fracturadas y autobrechadas. La variación de los valores de K y K_h en la secuencia aluvio-lacustre, es controlada por el patrón de sedimentación de esta unidad. La distribución espacial de los valores del rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c), también es congruente con el tipo de medio poroso y comportamiento hidráulico del acuífero superior, los cuales se fundamentan en la configuración de las curvas de abatimiento de las pruebas de bombeo a caudal constante, y en la posición del nivel piezométrico del acuífero con respecto a la base del acuitardo superior. En las zonas de acuífero libre el valor de S_y más alto (0.17), se presenta en los sedimentos aluvio-lacustres y el más bajo (0.08) en las rocas basálticas fracturadas. En las zonas de acuífero semiconfinado, el S_c varía entre 2.4×10^{-4} y 2.1×10^{-3} .

Los resultados de la simulación numérica de pruebas de bombeo en los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior ($K_h = 2.7 \times 10^{-5}$ m/s, $S_c = 3 \times 10^{-4}$), los cuales no son explotados a gran escala, indican que esta unidad permeable representa gran importancia desde el punto de vista de recursos disponibles de agua subterránea.

1.0 INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en la parte meridional de la Cuenca de México tiene gran importancia si se considera que el 70% de la demanda de agua potable, la cual es del orden de $63 \text{ m}^3 / \text{s}$ (GAVM, 1991), para la Ciudad de México, es sustentada por el bombeo del acuífero que subyace a arcillas lacustres altamente compresibles. La explotación del agua subterránea ha causado el hundimiento del terreno que por muchas décadas ha afectado significativamente a la infraestructura urbana de la Ciudad de México. También ha causado excesivos abatimientos del nivel piezométrico en el acuífero a razón de 1 m/año (DGCOH, 1992a) y recientemente el deterioro de la calidad del agua para uso potable en especial en pozos cercanos al centro de la planicie de Texcoco (DGCOH, 1994a). El conocimiento de la naturaleza, límites hidrogeológicos, comportamiento y características hidráulicas del acuífero en explotación, así como su interacción con otros acuíferos y/o acuitardos, es fundamental para lograr un manejo adecuado de los recursos de agua subterránea en la parte meridional de la Cuenca de México.

1.1 Estudios Previos.

La geología superficial de la parte meridional de la Cuenca de México ya ha sido definida en varios estudios (Schlaepfer, 1968; Mooser, 1975, De Cserna, et al., 1988; Vázquez y Jaimes, 1989). Sin embargo existen varios modelos geológicos del subsuelo basados en estudios geofísicos que no incorporan información de pozos en su interpretación. Entre estos estudios destacan los sondeos de sismica de reflexión realizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX, 1987); los sondeos de sismica de refracción realizados por Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1988) en la mayor parte de la planicie de la Ciudad de México, y los realizados en la planicie de Texcoco (Proyecto Texcoco, 1969). También se han realizado sondeos eléctricos verticales realizados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (GAVM, 1986) y por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH, 1993) en la planicie de Chalco; y por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH, 1991) al oriente de la planicie de Texcoco. Pérez-Cruz (1988) y Mooser (1993) reinterpretaron los perfiles de sismica de reflexión realizados por PEMEX (1987), pero de igual manera no integran de manera suficiente y convincente la información de pozos.

Se han realizado una gran cantidad de pruebas de bombeo a caudal constante en pozos municipales y privados, para obtener las características hidráulicas del acuífero en explotación (DGCOH, 1983, 1992b, 1993). Sin embargo la interpretación cuantitativa de

estas pruebas de bombeo, se considera poco confiable en virtud de que el método estándar de interpretación empleado, no es el adecuado para las condiciones geológica e hidrogeológicas y comportamiento hidráulico del acuífero durante la prueba de bombeo. Además de que los métodos aplicados no toman en cuenta aspectos constructivos del pozo de bombeo. Por otra parte se han realizado algunas pruebas de bombeo de corta duración en la planicie de Chalco (Huizar, 1989), en las cuales no se alcanza a observar el comportamiento hidráulico del acuífero.

Varios modelos numéricos se han aplicado al acuífero en explotación con la finalidad de predecir sus abatimientos, calidad de su agua y la subsidencia del terreno (Cruickshank, et al. 1982; Herrera, et al. 1982, 1989; Rivera, 1990; DGCOH, 1991, 1994a). Los resultados de estos modelos numéricos, son discutibles debido a que consideran valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, que fueron obtenidos de pruebas de bombeo inadecuadamente interpretadas (DGCOH, 1983, 1992b, 1993). Además de que se fundamentan en modelos conceptuales hidrogeológicos débilmente documentados.

Las conductividades hidráulicas (K) y almacenamiento específico (S_s) de las arcillas lacustres que sobreyacen al acuífero en explotación, han sido determinadas indirectamente por medio de una gran cantidad de pruebas en laboratorio de consolidación en núcleos recuperados en pozos exploratorios de hasta 80 m (Marsal y Mazari, 1959). Rudolph, et al. (1991) y Pitre (1994), obtuvieron la K para estas arcillas lacustres por medio de pruebas de recuperación en piezómetros hincados hasta profundidades del orden de 25 m en el centro de la planicie de Texcoco y noroeste de la misma planicie respectivamente. Los valores de la K resultantes de las pruebas de consolidación en laboratorio y en los piezómetros, son del mismo orden de magnitud.

1.2 Objetivos

Para proponer esquemas de rendimiento seguro de extracción de agua subterránea del acuífero en explotación, se tienen que definir primeramente los siguientes aspectos básicos, los cuales son los objetivos de la presente tesis.

- 1) Definir la naturaleza y distribución superficial y subsuelo de los acuíferos y acuitardos de la parte meridional de la Cuenca de México.
- 2) Determinar el comportamiento hidráulico del acuífero en explotación.
- 3) Evaluar las características hidráulicas (K , S_y , S_c) del acuífero en explotación.

1.3 Métodos de Estudio.

La distribución de las unidades geológicas en el subsuelo, se determinó en dos secciones geológicas longitudinales rumbo este-oeste y norte-sur. Las secciones geológicas se construyeron con base en la interpretación estratigráfica que se realizó con los registros litológicos y geofísicos de pozos productores municipales y privados con profundidades de hasta 400 m (CEAS, 1989; GAVM, 1989; DGCOH, 1994c), de pozos profundos exploratorios con profundidades de entre 2,000 y 3,000 m (Proyecto Texcoco, 1969; PEMEX, 1987), y de pozos someros perforados hasta 100 m de profundidad, los cuales en su mayor parte se aditaron como estaciones multipiezométricas (Proyecto Texcoco, 1969; GAVM, 1953 a 1986; Rudolph, et al., 1991; Ortega, et al., 1993; Pitre, 1994). La distribución superficial de las unidades, se obtuvo tomando como referencia los mapas geológicos publicados (Schlaepfer, 1968; Mooser, 1975; Vázquez y Jaimes, 1989).

Las unidades geológicas se agruparon en unidades hidrogeológicas de acuerdo a su permeabilidad relativa determinada con base en su composición litológica y características estructurales. La permeabilidad relativa de las unidades geológicas, se comprobó con caudales de extracción de aflors en pozos productores (CEAS, 1989; GAVM, 1989; DGCOH, 1992b). De esta manera se definieron las unidades que integran a los acuíferos y acuitardos de la región. Mapas estructurales de los acuíferos y acuitardos, se elaboraron con la información de pozos y con información de sondeos geofísicos de superficie, especialmente de sísmica de refracción (CFE, 1988; Proyecto Texcoco, 1969) y sísmica de reflexión (Pérez-Cruz, 1988; Mooser, 1993). La composición litológica y características

estructurales de las unidades geológicas en el subsuelo, se correlacionó con los resultados de los sondeos eléctricos verticales realizados por la GAVM (1986) y DGCOH (1993) en la planicie de Chalco, y por la UACH (1991) al oriente de la planicie de Texcoco.

El comportamiento hidráulico del acuífero en explotación, se determinó considerando la geología del subsuelo previamente establecida y la configuración de las curvas de abatimiento *vs* tiempo que se elaboraron en gráficas doble logarítmicas con la información de pruebas de bombeo a caudal constante (DGCOH, 1983, 1992b, 1993; Huizar, 1989). También se consideró la ubicación del nivel piezométrico en el acuífero con respecto a la base de las arcillas lacustres sobreyacentes. Para esto, en cada pozo piloto, se tomó en cuenta la profundidad al nivel estático correspondiente a los meses de junio y julio de 1992 (DGCOH, 1992b), su registro litológico - geofísico y diseño constructivo (DGCOH, 1994c). El comportamiento hidráulico del acuífero en explotación en las planicies de Texcoco y Chalco, se infirió, por falta de información de pozos piloto, comparando el plano de espesor de las arcillas lacustres elaborado con la información de pozos, con el plano de la profundidad al nivel estático para el mismo periodo publicado por la DGCOH (1992b).

La conductividad hidráulica del acuífero en explotación, primeramente se obtuvo, interpretando cuantitativamente la información de pruebas de bombeo a caudal constante realizadas por las DGCOH (1983, 1992b, 1993), con la aplicación de métodos estándar seleccionados de acuerdo a las siguientes consideraciones en cada prueba de bombeo: *a*) comportamiento hidráulico del acuífero definido de la configuración de las curvas de abatimiento *vs* tiempo en gráficas doble logarítmicas, *b*) naturaleza del medio poroso determinada con el registro litológico del pozo de bombeo y *c*) posición del nivel estático durante la prueba con respecto a la base de las arcillas sobreyacentes. Con los métodos estándar seleccionados, Boulton (1954) para condiciones de acuífero libre, Walton (1962, en Kruseman y Ridder, 1990) para condiciones de acuífero semiconfinado, y Boulton y Streltsova (1978) para condiciones de acuífero libre con doble porosidad, el rendimiento específico (S_y) y el coeficiente de almacenamiento (S_c), no se pudieron evaluar con la información de estas pruebas de bombeo, ya que en su mayoría se realizaron sin pozo de observación.

Las características hidráulicas (K , S_y , S_c), también se obtuvieron por medio de la simulación numérica de las pruebas de bombeo a caudal constante realizadas por la DGCOH (1983, 1992b, 1993; Huizar, 1989). La modelación numéricamente de las pruebas de bombeo, se realizó con la implementación de un modelo de flujo radial de agua hacia un pozo (Kushton

y Redshaw, 1979; Rathod y Rushton, 1984). Este método numérico de interpretación se aplicó debido a que en la mayoría de las pruebas de bombeo, se presentan las siguientes condiciones importantes que limitan los resultados de la interpretación con los métodos estándar: *a)* pozo de bombeo parcialmente penetrante en el acuífero que causa flujo vertical ascendente, *b)* pérdidas de carga hidráulica en el pozo de bombeo, manifestadas al principio de las pruebas por un excesivo abatimiento, *c)* heterogeneidad y anisotropía existente en los medio poroso, determinadas con el corte geológico del pozo de bombeo y *d)* pruebas de bombeo en medios fracturados, entre otras. Este modelo numérico de flujo radial hacia un pozo, también se aplicó por la ventaja de obtener el rendimiento específico (S_y) y el coeficiente de almacenamiento (S_c) sin pozos de observación, situación que se presenta en casi todas las pruebas. También el modelo numérico permitió interpretar pruebas de bombeo a caudal variable (aforos) (CEAS, 1989; GAVM, 1989), y en las pruebas en donde el pozo de bombeo extrae el agua de dos unidades diferentes, permitió determinar las características hidráulicas de cada unidad.

1.4 Descripción General de la Región Estudiada.

La región estudiada se localiza en la parte meridional de la Cuenca de México (Figura 1.3.1), la cual a su vez se ubica en la parte oriental del Cinturón Neo-volcánico Transmexicano (Raisz, 1964). La región está limitada por una serie de sierras formadas por diferentes aparatos volcánicos, entre los que destacan al sureste, los estratovolcanes del Iztaccihuatl y Popocatepetl por su gran elevación de 5,000 y 5,400 metros sobre el nivel del mar (m snm) respectivamente. Las partes bajas de la región estudiada, se caracterizan por una extensa planicie lacustre en donde la elevación del terreno es del orden de 2,240 m snm. La planicie lacustre ha sido dividida con fines descriptivos en la presente investigación, en las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco.

La Cuenca de México es naturalmente endorreica, caracterizada en el pasado por un enorme lago que tenía aportaciones superficiales y subterráneas. Ante el desarrollo de la Ciudad de México, la cuenca empezó en 1789 a ser drenada artificialmente hacia el norte (Bribiesca, 1960). Actualmente, algunos de los escurrimientos que se originan en las zonas montañosas son almacenados para su uso en un sistema de presas y/o conducidos hacia el norte fuera de la cuenca, a través del sistema del drenaje profundo.

El clima que predomina en la región es templado moderado con lluvias en verano entre los meses de junio y septiembre (García, 1981). La temperatura media anual normalmente varía

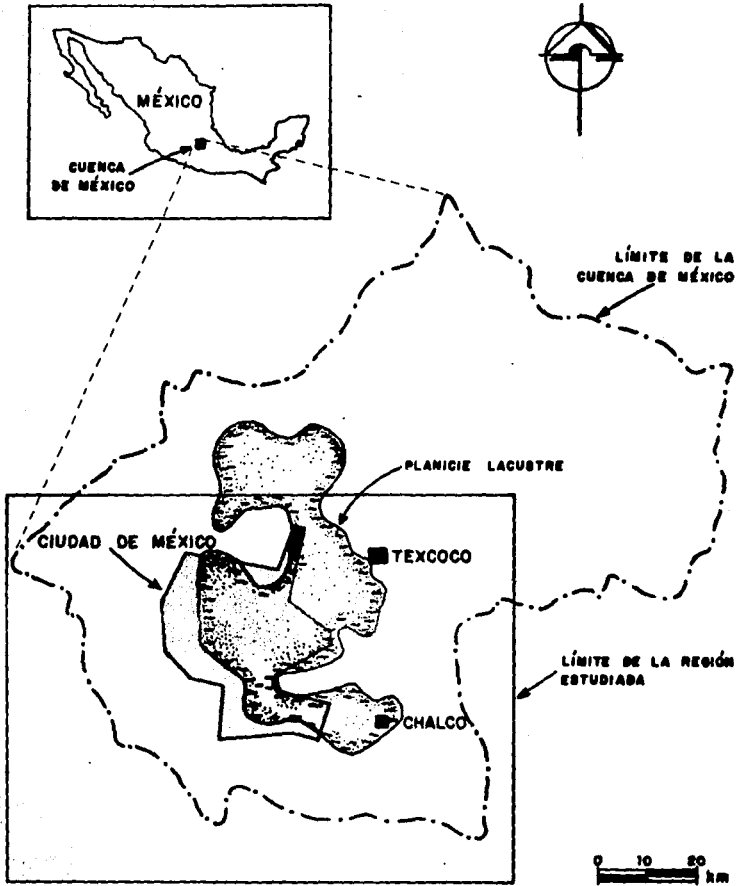


Figura 1.31 Localización de la región estudiado.

entre 16 °C en las partes bajas y 6 °C en las partes altas (INEGI, 1986a). La distribución de la precipitación es controlada por la orografía de las montañas y por el movimiento de las masas de aire. La precipitación media anual varía entre 600 mm en la planicie de Texcoco y entre 1,500 mm. en la parte sur de la sierra Las Cruces y poniente de la sierra Chichinautzin (INEGI, 1986a). La evaporación potencial media anual es del orden de 1,600 mm. en las partes bajas de las planicies (Durazo y Farvolden, 1989). Los planos topográficos (INEGI, 1986b) muestran una red de avenamiento superficial bastante desarrollada en las sierras volcánicas Las Cruces y Río Frio-Nevada; por lo contrario dicha red está incipientemente desarrollada en la sierra Chichinautzin.

2.0 GEOLOGÍA

2.1 Historia Geológica

Los procesos geológicos más importantes que ocurrieron en la Cuenca de México se resumen en la Tabla 2.1. El primer evento geológico reconocido en el área geográfica que hoy ocupa la Cuenca de México, prevaleció en el Cretácico. Este fue caracterizado por la sedimentación marina de carbonatos puros principalmente en un ambiente de plataforma, los cuales son representados por las rocas carbonatadas del Cretácico. A fines del Cretácico la sedimentación de carbonatos cambió a la de terrígenos finos pre-orogénicos compuestos por lutitas y areniscas arcillosas de la Formación Mezcala. Las secuencias cretácicas durante el Terciario temprano fueron plegadas en diferentes estilos, falladas en forma inversa y fracturadas como consecuencia de la Orogénia Laramide. Grandes espesores de sedimentos continentales arcillosos y evaporíticos de la Formación Balsas se acumularon en extensas depresiones originadas por la deformación tectónica anterior (Fries, 1960; De Cserna, et al., 1988; Vázquez y Jaimes, 1989).

La composición de las rocas volcánicas del Oligoceno indica que representan un volcanismo bimodal riolítico explosivo y basáltico efusivo, muy probablemente correlacionado genéticamente con la secuencia ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental reconocida por McDowell y Clabaugh (1979).

Un hiato volcánico y fallamiento normal de edad Oligoceno, el cual originó una serie de pilares y fosas (fosa Mixhuca) orientado al NW-SE, antecede al inicio de la actividad magmática del Eje Neovolcánico (ENV). La actividad del ENV en la Cuenca comenzó en el Mioceno y se caracterizó por un volcanismo andesítico representado por las rocas volcánicas del Mioceno (Vázquez y Jaimes, 1989, Mooser, 1990). El volcanismo del Mioceno, preferentemente se emplazó sobre pilares tectónicos del Oligoceno en las sierras Guadalupe, Las Cruces y Río Frío-Nevada. Las arcillas de los depósitos lacustres Plioceno inferior, las cuales fueron primeramente reconocidas por Mooser (1990 y 1993) indican un antiguo régimen hidrológico de la cuenca parcial o totalmente cerrado por las elevaciones volcánicas del Mioceno, y/o bien por el patrón tectónico inicial del ENV. La reactivación del ENV fue paulatina y explosiva, tal y como lo señala las intercalaciones de sedimentos lacustres con piroclásticos en la parte superior de esta misma unidad del Plioceno inferior.

TABLA 2.1 PROCESOS GEOLOGICOS Y REGIMEN HIDROLOGICO EN LA CUENCA DE MEXICO

PERIODO EPOCA	PROVINCIA GEOLOGICA			REGIMEN HIDROLOGICO
	PLATAYOMA GUERRERO MORELOS	SIERRA MADRE OCCIDENTAL	EJE NEOVOLCANICO	
CUATERNARIO				ENDORREICO
PLIOCENO SUPERIOR				EXORREICO
PLIOCENO INFERIOR				ENDORREICO
MIOCENO TARDIO				EXORREICO?
MIOCENO TEMPRANO				ENDORREICO?
OLIGOCENO				EXORREICO?
EOCENO				EXORREICO?
PALEOCENO				
CRETACICO SUPERIOR				
CRETACICO MEDIO				

EXPLICACION:

ORIENTACION PREFERENCIAL DE RASGOS TECTONICOS	
ESFUERZOS TECTONICOS TENSIONALES	
ESFUERZOS TECTONICOS COMPRESIONALES	
SEDIMENTACION MARINA DE CARBONATOS	
SEDIMENTACION MARINA DE TERRIGENOS FINOS	
SEDIMENTACION CONTINENTAL POST-CROGENICA	
VOLCANISMO BASALTICO Y RIOLITICO	
VOLCANISMO ANDESITICO	
VOLCANISMO BASALTICO	
SEDIMENTACION FLUVIAL	
SEDIMENTACION LACUSTRE	

En el Plioceno superior acontecieron dos grandes periodos volcánicos andesíticos, caracterizados por grandes estratovolcanes, cuya distribución en parte es controlada por estructuras volcánicas preexistentes del Mioceno y en parte por el estilo tectónico contemporáneo definido por dos sistemas de fallas normales: fallas orientadas E-W y un sistema conjugado de fallas orientadas NW-SE y NE-SW (Vázquez y Jaimes, 1989).

El primer periodo volcánico del Plioceno superior, representado por las rocas andesíticas del Plioceno superior, se emplazó principalmente sobre estructuras preexistentes en las Sierras Guadalupe y Patlachique del norte y en la base de las sierras Las Cruces y Río Frio-Nevada. En el caso de las sierras del norte, existe una zona de fallas normales orientadas E-W con desplazamiento vertical hacia el sur. En el caso de las sierras Las Cruces y Río Frio-Nevada, se infiere la presencia de fosas orientadas NW-SE. El segundo periodo volcánico de edad Plioceno superior, se emplazó sobre las fosas tectónicas preexistentes de las sierras Las Cruces y Río Frio-Nevada.

Contemporáneamente al volcanismo del Plioceno superior, el régimen de la cuenca se volvió exorreico con salida hacia el sur transportando y depositando clásticos de origen volcánico característicos de los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior. A principios del Cuaternario el régimen exorreico fue gradualmente bloqueado en el sur por sucesivos episodios volcánicos basálticos efusivos-explosivos controlados estructuralmente por fallas normales orientadas E-W con desplazamiento regional hacia el norte. Primeramente, la actividad de los volcanes de los cerros La Estrella, Peñón del Marqués, Chimalhuacán y El Pino, bloquearon parcialmente la cuenca creando un lago central en la planicie de Texcoco. Posteriormente, como consecuencia del volcanismo en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina, se bloqueó totalmente la cuenca y el lago central se extendió hacia las planicies de la Ciudad de México y Chalco.

Ante esta situación geológica del Cuaternario es de esperarse una sedimentación fluvio lacustre compleja típica de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, la cual en la planicie de Texcoco inició con carbonatos de calcio y finalizó con arenas y arcillas. Mientras que en las márgenes lacustres se depositaban gravas y arenas aluviales. Indudablemente fluidos volcánicos se acumularon entre espacios intersticiales de los sedimentos lacustres. La sedimentación lacustre finalizó con el depósito de arcillas que predominan en los depósitos lacustres del Cuaternario. Por otra parte, prevalecía actividad volcánica efusiva y explosiva en los estratovolcanes del Iztaccihuatl y Popocatepetl.

2.2 Estructura Geológica Regional

La parte sur de la Cuenca de México es una fosa de origen tectónico y volcánico; está limitada al sur por el macizo volcánico de la sierra Chichinautzin y por fallas normales regionales orientadas E-W en la sierra Guadalupe. En el norte está limitada por fallas normales regionales también orientadas E-W (Figura 3.1.4). Hacia el oriente y poniente está limitada por los grandes estratovolcanes de las sierras Las Cruces y Río Frio-Nevada. La fosa en el centro es rellenada por depósitos aluviales, lacustres y piroclásticos de edad Plioceno al Cuaternario, depositados sobre un paleo-relieve en las rocas volcánicas del Mioceno. El peso de las rocas volcánicas acumuladas en la Cuenca de México y la actividad tectónica, produjo un gran hundimiento de las rocas carbonatadas del Cretácico las cuales de acuerdo con las perforaciones exploratorias profundas de PEMEX (1987), se encuentran hasta 1,500 m por debajo el nivel del mar en la parte meridional de la Cuenca de México (Figura 3.1.4), y fuera de la cuenca al norte y sur se encuentran a 2,500 m snm y 1,500 m snm respectivamente.

3.0 MARCO HIDROGEOLÓGICO

3.1 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades geológicas, se agruparon en unidades hidrogeológicas, de acuerdo a su permeabilidad determinada cualitativamente de sus características litológicas y estructurales, rasgos geomorfológicos y caudales de producción en pozos. Los pozos con registros y sondeos geofísicos de superficie considerados para determinar la naturaleza y distribución en el subsuelo de las unidades geológicas, se presentan respectivamente en las figuras 3.1.1 y 3.1.2. En las figuras 3.1.3, se muestra las zonas de afloramiento de las unidades y en la Figura 3.1.4 su distribución en el subsuelo.

3.1.1 Unidades Permeables

Sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario. Afloran al oriente y poniente de las planicies lacustres (Figura 3.1.3) y en el subsuelo de las planicies, se encuentran subyaciendo a los depósitos lacustres del Cuaternario y sobreyaciendo a los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior. Hacia las zonas montañosas, se interdigita con las rocas basálticas del Cuaternario y depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario (Figura 3.1.4).

Muestran un patrón regional de sedimentación caracterizado por gravas y arenas aluviales hacia los márgenes de las planicies y por sedimentos lacustres más finos (arenas y arcillas) hacia el centro de las mismas planicies (Figura 3.1.5, Anexo 1). La secuencia aluvio-lacustre en el centro de la planicie de Texcoco, comienza desde su base con calizas arcillosas seguida de tobas con intercalaciones de arcillas y arenas, y finaliza con arenas calcáreas (pozos PP1 y PP3). En el centro de la planicie de Chalco, se caracterizan por intercalación de arenas y arcillas lacustres (pozo MSC-6, Anexo 1). Su espesor se incrementa hacia el centro de las planicies, alcanzando espesores máximos del orden de 150 m en la planicie de Chalco y de 410 m en la planicie de Texcoco.

En la planicie de la Ciudad de México sus límites superior e inferior, tienden a coincidir con los horizontes reflectores sísmico I y III identificados por Pérez-Cruz (1988) y su base con el horizontes de la misma naturaleza sísmica I reconocido por Mooser (1993) (Figura 3.1.5, Anexo 1). Su límite inferior en la planicie de Texcoco, se correlaciona con el horizonte refractor sísmico A' (Proyecto Texcoco, 1969). La segunda capa refractora, cuyas velocidades de propagación sísmica (V_p) varían entre 1,200 y 1,900 m/s (CFE, 1988), se

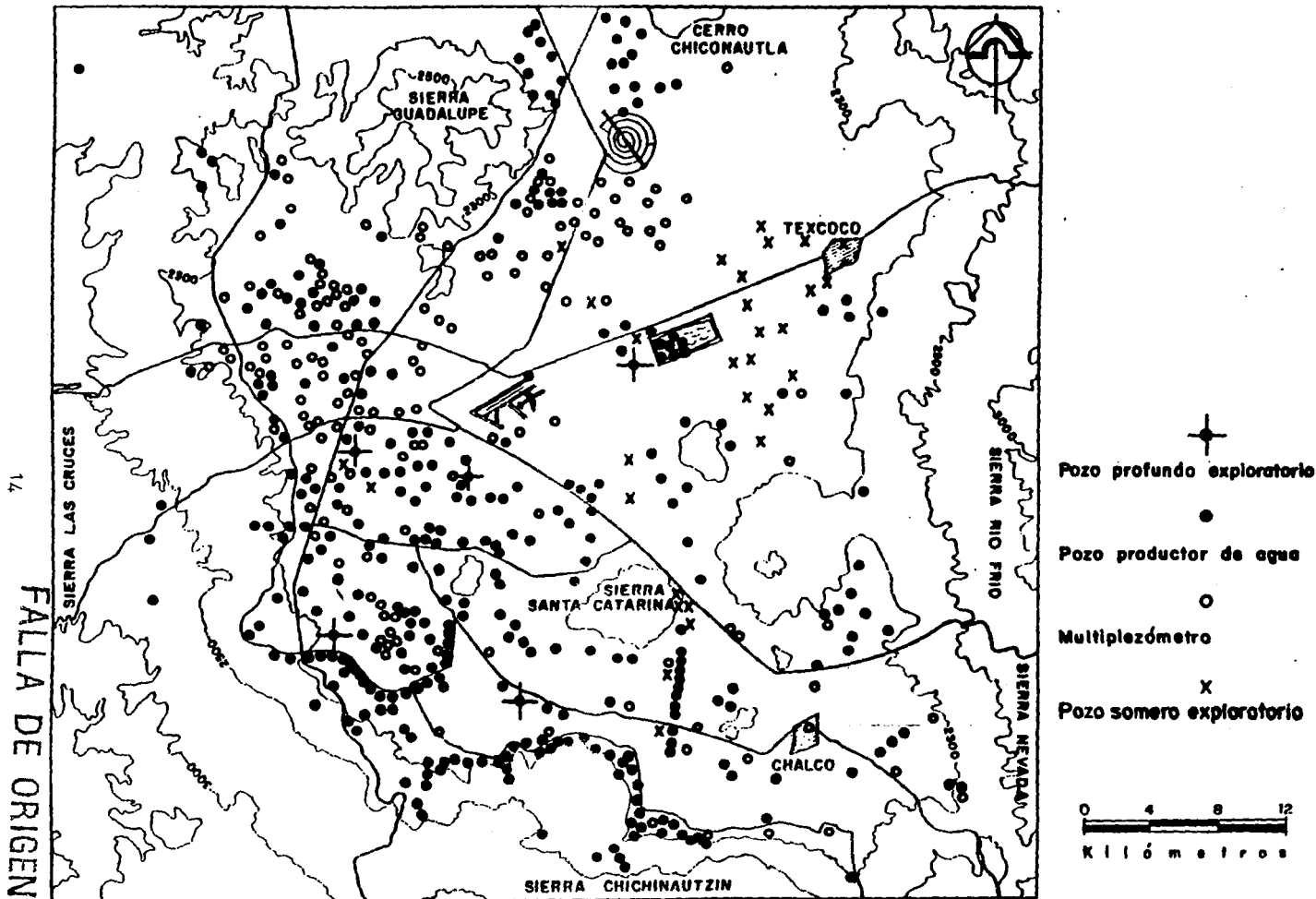
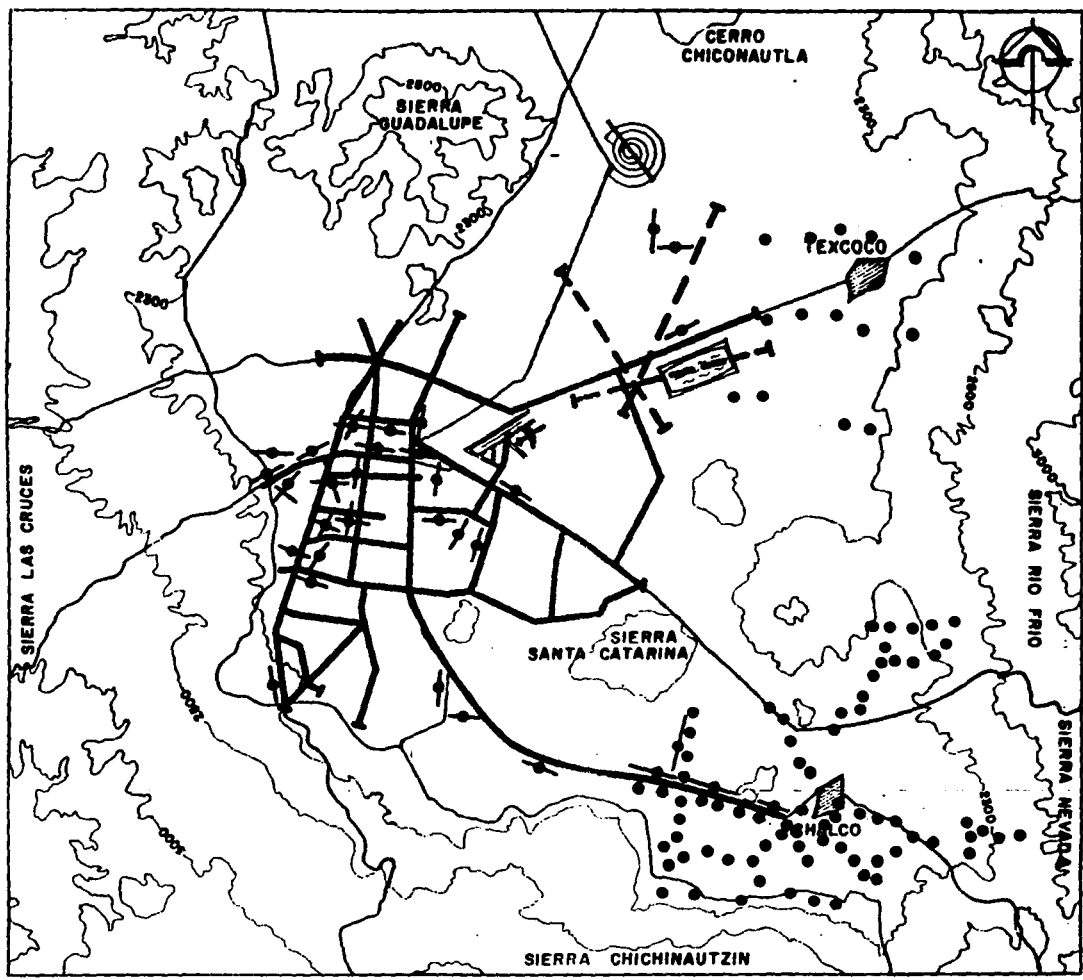


Figura 3.1.1 Localización de pozos con registros litológicos y geofísicos, considerados para determinar la geología del subsuelo en la parte meridional de la Cuenca de México.



—●— Línea sísmica de reflexión (PEMEX, 1987)

--- Línea sísmica de refracción (Proyecto Texcoco, 1969)

—●— Línea sísmica de refracción (CFE, 1988)

● Sondéo eléctrico vertical (GAVM, 1986; DGCOR, 1993; UACH, 1991)

0 4 8 12
Kilómetros

Figura 3.1.2 Localización de sondeos geofísicos de superficie considerados para determinar la geología del subsuelo de la parte sur de la Cuenca de México.

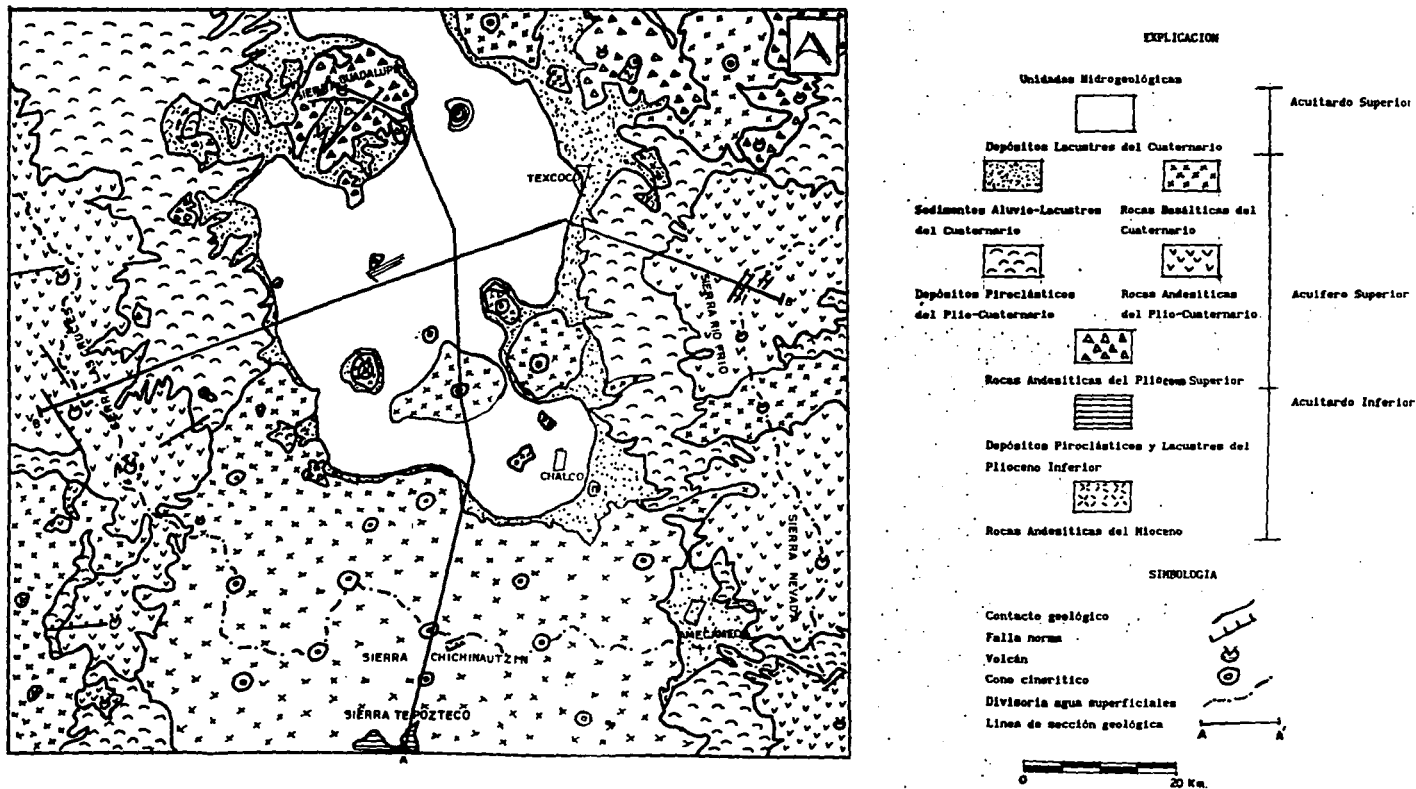


Figura 3.1.3 Plano que muestra los afloramientos de las unidades hidrogeológicas en la parte meridional de la Cuenca de México.

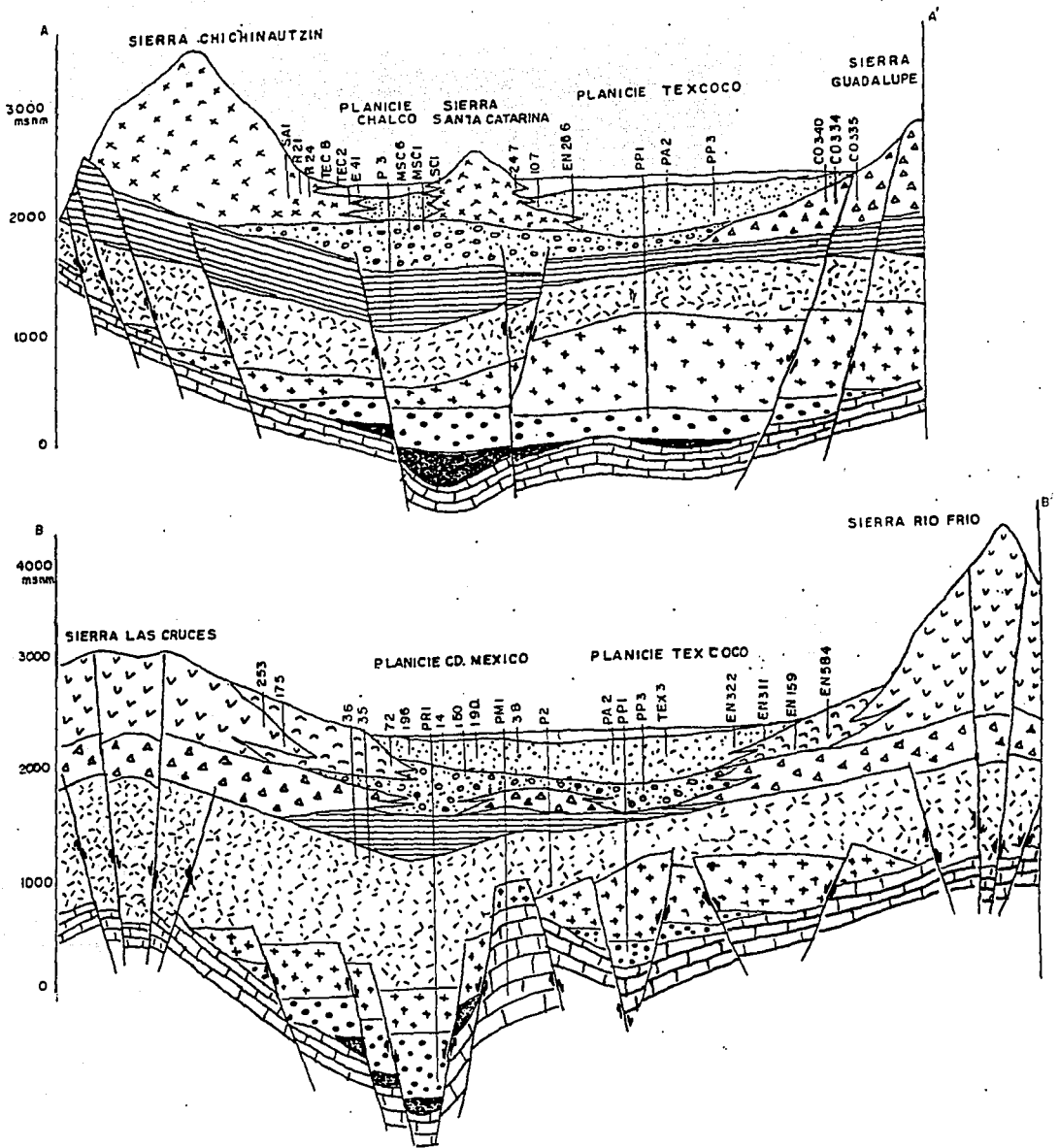
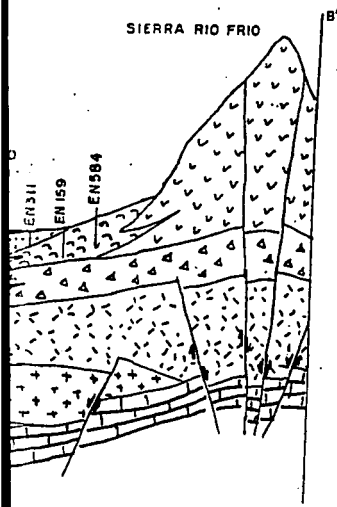
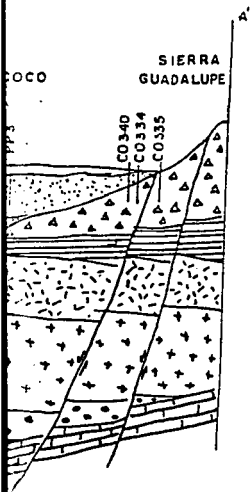
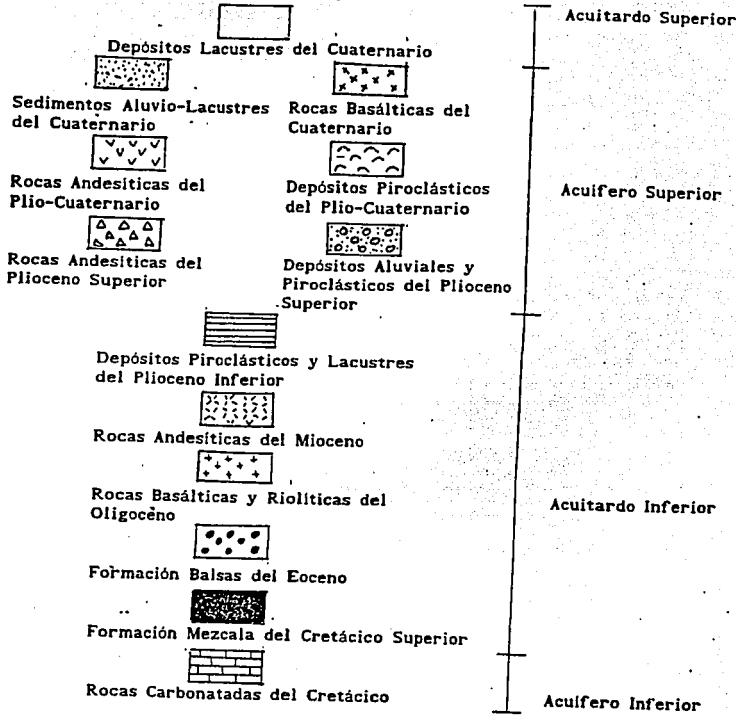


Figura 3.1.4 Secciones geológicas (A-A', B-B') que muestran el modelo conceptual hidrogeológico de la parte meridional de la Cuenca de México.



EXPLICACION

Unidades Hidrogeológicas



ESCALA VERTICAL



ESCALA HORIZONTAL



FALLA DE ORIGEN

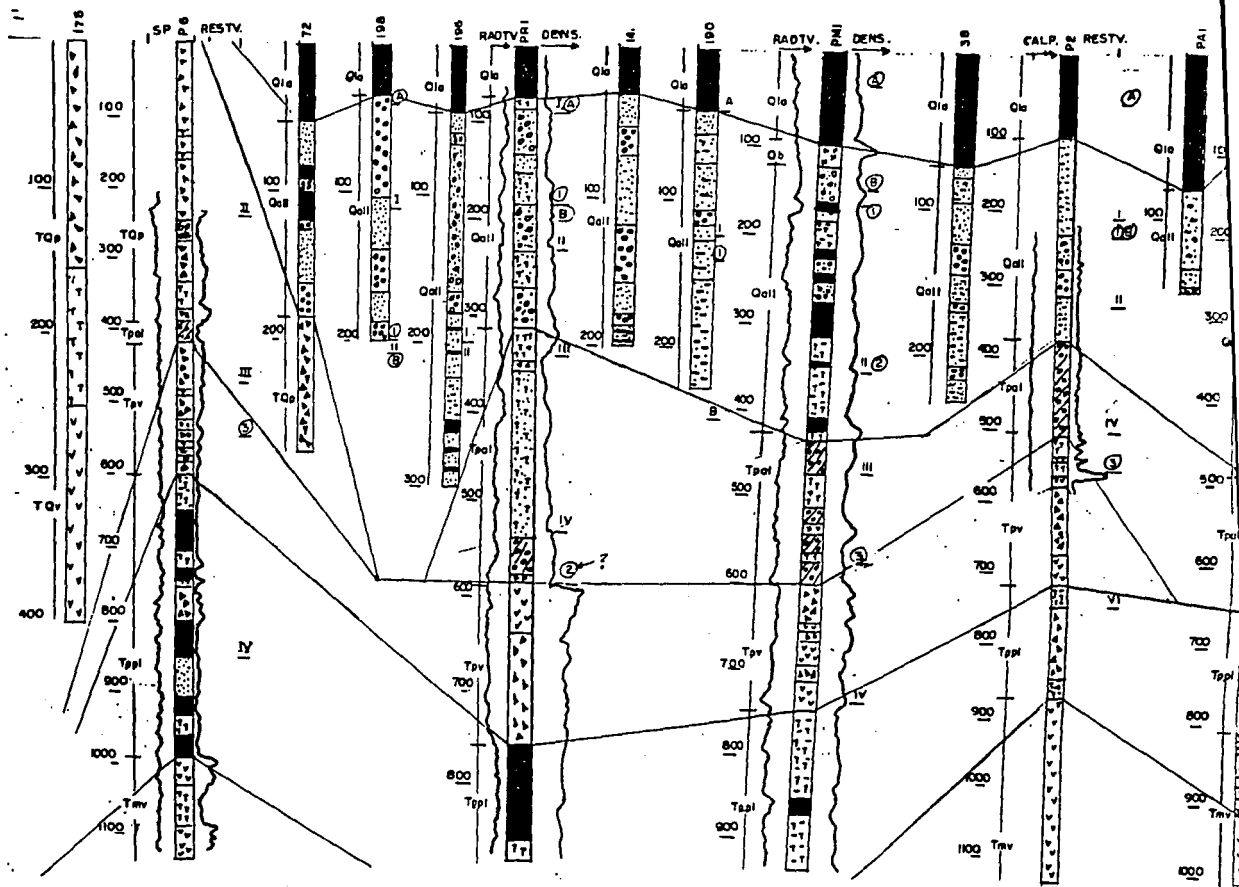
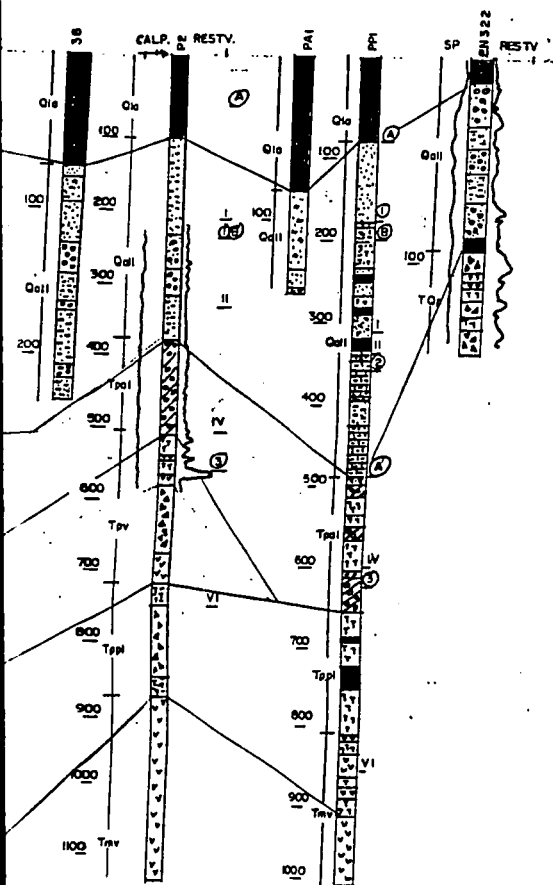


Figura 3.1.5 Registros litológicos y geofísicos de pozos representativos a lo largo de la sección geológica B-B'. Incluye información de sondeos geofísicos de superficie



Unidades Hidrogeológicas:

- Qla : Depósitos Lacustres del Cuaternario
- Qall: Sedimentos Aluvio-Lacustres del Cuaternario
- Qb : Rocas Basálticas del Cuaternario
- Qov : Rocas Andesíticas del Plió-Cuaternario
- Qop : Depósitos Piroclásticos Andesíticos del Plió-Cuaternario
- Tpv : Rocas Andesíticas del Plioceno Superior
- Tpal: Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior
- Tppi: Depósitos Lacustres y Piroclásticos del Plioceno Inferior
- Tmv : Rocas Andesíticas del Mioceno
- Tov : Rocas Basálticas y Riolíticas del Oligoceno
- Teb : Formación Balsas del Eoceno
- Kcm : Rocas Carbonatadas Marinas del Cretácico

Litología:

- Arcilla
- Arcilla arenosa
- Arena
- Arena limosa
- Arena Arcillosa
- Grava
- Grava y arena
- Limo y arcilla
- Conglomerado
- Límolita y lutita
- Brecha calcárea
- Toba
- Toba arenosa
- Toba arcillosa
- Ceniza y lapilli
- Brecha volcánica
- Basalto
- Andesita
- Caliza y dolomía
- Caliza arcillosa

Geofísica:

I, II, III, IV, V, VI, VII : Reflectores sísmicos (Pérez-Cruz, 1988)

Reflectores sísmicos de Mooser (1993):

- ① Base del Relleno Aluvial-Lacustre/Cima de la Secuencia Estratificada
- ② Base de la Secuencia Estratificada/Cima de los Depósitos Lacustres del Plioceno Inferior
- ③ Base de los Depósitos lacustres del Plioceno Inferior/Cima de las Vulcanitas del Mioceno
- ④ Base de las Vulcanitas del Mioceno/Cima de las Vulcanitas del Oligoceno
- ⑤ Base de la Vulcanitas del Oligoceno-Balsas/Cima del Basamento Sedimentario Marino

Ⓐ Ⓑ : Refractores sísmicos (Proyecto Texcoco, 1969)

Ⓐ Ⓑ : Refractores sísmicos (CFE, 1988)

FALLA DE ORIGEN

relaciona con esta unidad sedimentaria (Figura 3.1.5, Anexo 1). Los sondeos eléctricos verticales realizados en las planicie de Chalco y Texcoco (GAVM, 1986; UACH, 1991; DGCOH, 1993), muestran que en los sedimentos aluvio-lacustres, las resistividades aparentes varían entre 10 y 65 Ω/m . Las resistividades más altas se asocian con sedimentos gruesos en las márgenes oriente de las planicies y las más bajas con sedimentos finos hacia el interior de las planicies.

En la prueba de bombeo de larga duración realizada durante el Proyecto Texcoco (1969) en el pozo P-P3 localizado en el centro de la planicie de Texcoco, se observó un incremento en los STD y disminución de la temperatura del agua subterránea con el tiempo de bombeo (Figura 3.1.6). Si consideramos que este pozo extrae el agua de la parte inferior de los sedimentos aluvio-lacustres, la variación físico-química anterior, se explica por un efecto de flujo vertical descendente del agua subterránea salobre reportada en las arenas lacustres que se encuentran en la parte superior de la secuencia aluvio-lacustre (Proyecto Texcoco, 1969). Lo anterior indica que las diferentes unidades litológicas de esta secuencia sedimentaria, tienen continuidad hidráulica formando una sola unidad hidrogeológica.

La mayor parte de la extracción de agua subterránea en la parte meridional de la Cuenca de México, se concentra en esta unidad sedimentaria con caudales promedio de producción por pozo de 60 l/s y caudales específicos (Q_s) promedio de 8.6 l/s/m (DGCOH, 1992c). Tomando en cuenta sus relaciones estratigráficas, mantiene continuidad hidráulica con unidades adyacentes, sobre y subyacentes (Figura 3.1.4).

Rocas basálticas, Cuaternario. Afloran en las sierras Chichinautzin y Santa Catarina y en cerros aislados del sur y norte (Figura 3.1.3). Tienen alta permeabilidad primaria debido a que predominan derrames lávicos fracturados y autobrechados. Pero también su permeabilidad es por vesículas interconectadas y localmente por cavernas volcánicas. En menor proporción contienen cenizas, lapilli, tobas y brechas volcánicas de menor permeabilidad intercaladas con los derrames lávicos. Los pozos más profundos (≈ 300 m) perforados en el límite norte de la sierra Chichinautzin (pozo 41E, Anexo 1), revelan que su espesor saturado es del orden de 200 m.

Su variable resistividad aparente (30 a 2,000 Ω/m) reportada con sondeos eléctricos verticales ubicados en el límite norte de la sierra Chichinautzin (GAVM, 1986), es una muestra de sus distintas condiciones de fracturamiento y/o autobrechamiento.

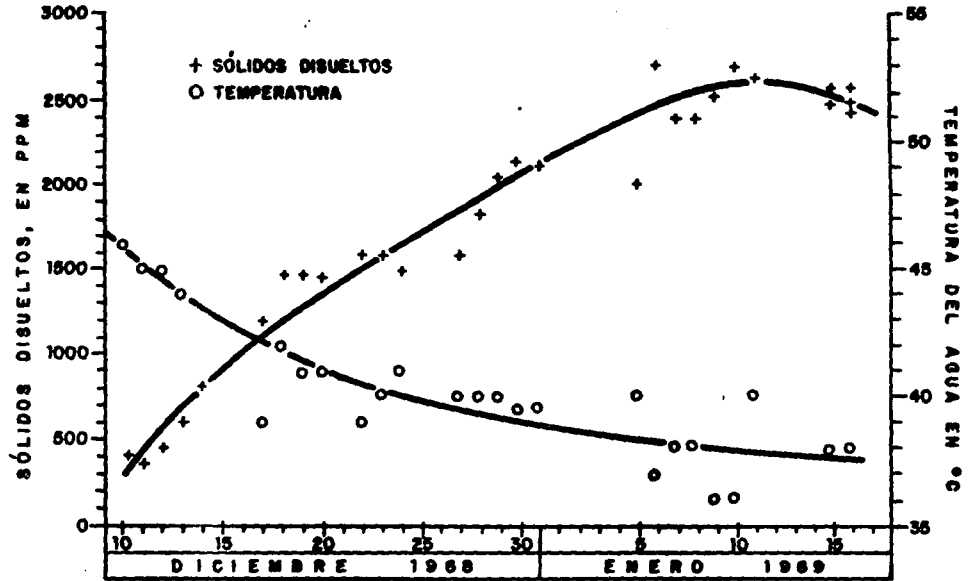
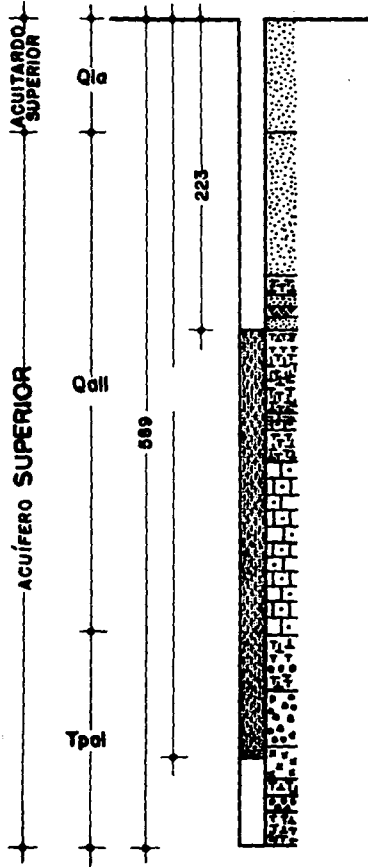


Figura 3.1.6 Variación de la temperatura y contenido de STD en el agua subterránea durante una prueba de bombeo ($Q_1=145$ l/s, $Q_2=5.3$ l/s/m) en el pozo P-P3 del centro de la planicie de Texcoco (adoptada del proyecto Texcoco, 1969). Q1a-arcillas lacustres del Cuaternario, Q1b-sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, Tpol-depositos aluviales y piroclásticos del Plioceno Superior. Nota: los símbolos litológicos mostrados en el anexo 1.

Es una unidad de doble porosidad por fracturas y materiales granulares, y su alta permeabilidad es comprobada por los caudales promedio por pozo del orden de 115 l/s que equivalen a caudales específicos promedio de 170 l/s/m (DCGOH, 1992c). Sus extensos afloramientos en la sierra Chichinautzin, en donde el avenamiento del terreno es incipientemente desarrollado, representan la principal zona de recarga al agua subterránea.

Rocas andesíticas, Plio-Cuaternario. Se encuentran aflorando en las partes altas de las sierras Las Cruces y Río Frio-Nevada (Figura 3.1.3). Son secuencias fracturadas compuestas por derrames lávicos intercalados con brechas, aglomerados y tobas. Su permeabilidad secundaria por fracturamiento es comprobada por las siguientes evidencias que principalmente se presentan en la sierra Las Cruces: *a)* la presencia de numerosos manantiales en fracturas con gastos máximos en época de lluvia que varían entre 2 y 130 l/s (DGCOH, 1985); *b)* pozos perforados (pozos 175 y 250) en andesitas en partes altas sobre los flancos de esta sierra, cuyo gasto es del orden de 36 l/s y capacidad específica de 11.1 l/s/m (DGCOH, 1994c); y *c)* importantes filtraciones fueron reportadas en fracturas durante la construcción de los túneles para los acueductos del sistemas Lerma- Cutzamala a través de la sierra Las Cruces (DGCOH, 1994a).

En las sierras de Río Frio y Nevada, a diferencia de la sierra Las Cruces, no se presentan gran cantidad de manantiales, lo que posiblemente indica una permeabilidad más alta en las sierras del oriente por presentar un mayor contenido de coladas lávicas fracturadas.

Las áreas de sus afloramientos en las partes altas de las sierras del oriente y poniente, son zonas de recarga al agua subterránea. Parte del agua que se infiltra en estas zonas, alcanza a llegar hasta el nivel freático regional, en donde la carga hidráulica en la divisoria de aguas subterráneas es aproximadamente 2,600 m snm en la sierra Río Frio y 2,700 m snm en la sierra Las Cruces (Ortega y Farvolden, 1989), pero otra parte es descargada localmente, antes de que arribe al nivel freático regional, a través de manantiales comúnmente originados en el contacto entre derrames lávicos fracturados y depósitos piroclásticos menos permeables.

Depósitos piroclásticos andesíticos, Plio-Cuaternario. Afloran en los flancos de las sierras Las Cruces y Río Frio Nevada en forma de lomas inclinadas hacia el centro de la cuenca (Figura 3.1.3). Se consideran de menor permeabilidad que los sedimentos aluvio-lacustres debido a que: *a)* principalmente son brechas y aglomerados con piroclastos (bloques y lapilli) mal clasificados con matriz de ceniza fina, *b)* muestran un avenamiento

considerablemente desarrollado y c) los caudales de los pozos perforados en ellos, son del orden de 50 l/s pero con caudales específicos de 4.4 l/s. Los pozos profundos (P-4, P-5 y P,6) perforados en el flanco oriente de la sierra Las Cruces, indican que sus espesores varían entre 460 y 600 m.

La relación interestratificada que mantiene con las unidades permeables adyacentes, sugiere que es una unidad transmisora de la recarga que ocurre en las partes altas de las sierras del oriente y poniente, hacia la secuencia aluvio-lacustre en las partes bajas de la cuenca (Figura 3.1.4).

Rocas andesíticas, Plioceno superior. Son rocas fracturadas compuestas por derrames lávicos, tobas, aglomerados y brechas volcánicas. Afloran en las sierras Guadalupe y Patlachique, y en la base de las sierras Las Cruces (Figura 3.1.3). Fueron perforadas totalmente por los pozos exploratorios Roma-1 y Mixhuca-1, a profundidades entre 600 y 800 m.

Su permeabilidad por fracturamiento, es comprobada por la gran cantidad de pozos productores del orden de 200 m de profundidad (pozo 331CO, 340CO, SCE 2, GC1), que fueron perforados en andesitas al oriente de la sierra Guadalupe, y cuyos caudales promedio y gastos específicos, son del orden de 80 l/s y 11 l/s/m respectivamente (DGCOH, 1994c; CEAS, 1989). Los pozos profundos (P-4, P-5 y P-7) perforados en el flanco oriente de la sierra Las Cruces y el pozo P-2 perforado al noreste del cerro Peñón de los Baños, también extraían el agua de estas andesitas.

Depósitos aluviales y piroclásticos, Plioceno superior. No afloran en la región de estudio, pero están expuestos al norte de la cuenca (Fries, 1962) y en las subcuencas del estado de Morelos (Fries, 1960). En el subsuelo se encuentran ampliamente distribuidos en las zonas de las planicies lacustres (Figura 3.1.4), así lo demuestran los pozos profundos exploratorios (Anexo 1), los cuales perforaron entre 500 y 700 m de profundidad, una secuencia de conglomerados, tobas y brechas volcánicas e inclusive basaltos, que por su posición estratigráfica, son representativos de esta unidad. La tercera capa refractora con velocidades de propagación sísmica que varían entre 1900 y 2600 m/s (CFE, 1988), se relaciona con estos depósitos.

Las evidencias directas de sus carácter permeable se presentan a continuación. Los aforos realizados por etapas en el pozo profundo P-P1 durante el Proyecto Texcoco (1969),

revelan que en la etapa B en donde se incluye a los depósitos aluviales y piroclásticos, se tienen capacidades específicas (Q_s) más altas, para los mismo gasto, que las obtenidas en la etapa A en donde nada más se incluye a los sedimentos aluvio-lacustres sobreyacentes (Figura 3.1.7). En la misma etapa B, también se observa que al incrementar los caudales aumentan las Q_s . Los pozos (ramal Mixquic Santa Catarina) de 400 m de profundidad que extraen el agua de esta unidad, en su primer aforo a caudales máximos del orden de 160 l/s, tuvieron caudales específicos promedio de 7.9 l/s/m (GAVM, 1989). Algunos pozos al sur de la planicie de la Ciudad de México (pozos PER-16, PER-17, PER-18, PER-19, 197, 95 y 94), extraen el agua de esta unidad y de otras unidades permeables sobreyacentes.

Por su relación interestratificada con las andesitas del Plioceno superior, mantiene continuidad hidráulica con las mismas (Figura 3.1.4). Tienen gran importancia desde el punto de vista de recursos de agua subterránea disponible, ya que solamente es explotada a pequeña escala en la parte sur de la cuenca.

Mooser y Molina (1993) principalmente con base en interpretaciones geológicas sobre los perfiles de sísmica de reflexión procesados por PEMEX (1987), denominan esta unidad como "Secuencia Estratificada" compuesta únicamente por depósitos piroclásticos compactos con permeabilidad secundaria por fracturamiento. Sin embargo las evidencias presentadas aquí, sugieren más bien que se trata de una secuencia aluvial y piroclástica de edad Plioceno superior y permeabilidad granular importante. Además la evidencia geológica, indica que en el Plioceno superior, prevalecía un régimen fluvial exorreico con salida hacia el sur y volcanismo en lo que ahora son las sierras del oriente poniente y norte de la región.

Rocas carbonatadas del Cretácico. En la cuenca no afloran, pero al sur en la subcuencas del Estado de Morelos y al norte en el Estado de Hidalgo, se encuentran expuestas a la intemperie. Fueron perforadas parcialmente por el pozo Tulyehualco 1 a profundidades entre 2,200 y 3,000 m y por el pozo Mixhuca 1 a profundidades entre 1,570 y 2,450 m (Anexo 1). Los núcleos recuperados y muestras de canal en estos pozos, indican que son calizas y dolomías fracturadas (PEMEX, 1987). Su cima coincide con el horizonte reflector sísmico VII de Pérez-Cruz (1988) y 5 de Mooser (1993) (Anexo 1). En el subsuelo se interpreta que se encuentran plegadas y dislocadas tectónicamente por una serie de fallas normales regionales (Figura 3.1.4).

Las evidencias directas que se tienen para argumentar su gran permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en la Cuenca de México, fueron obtenidas de la información de

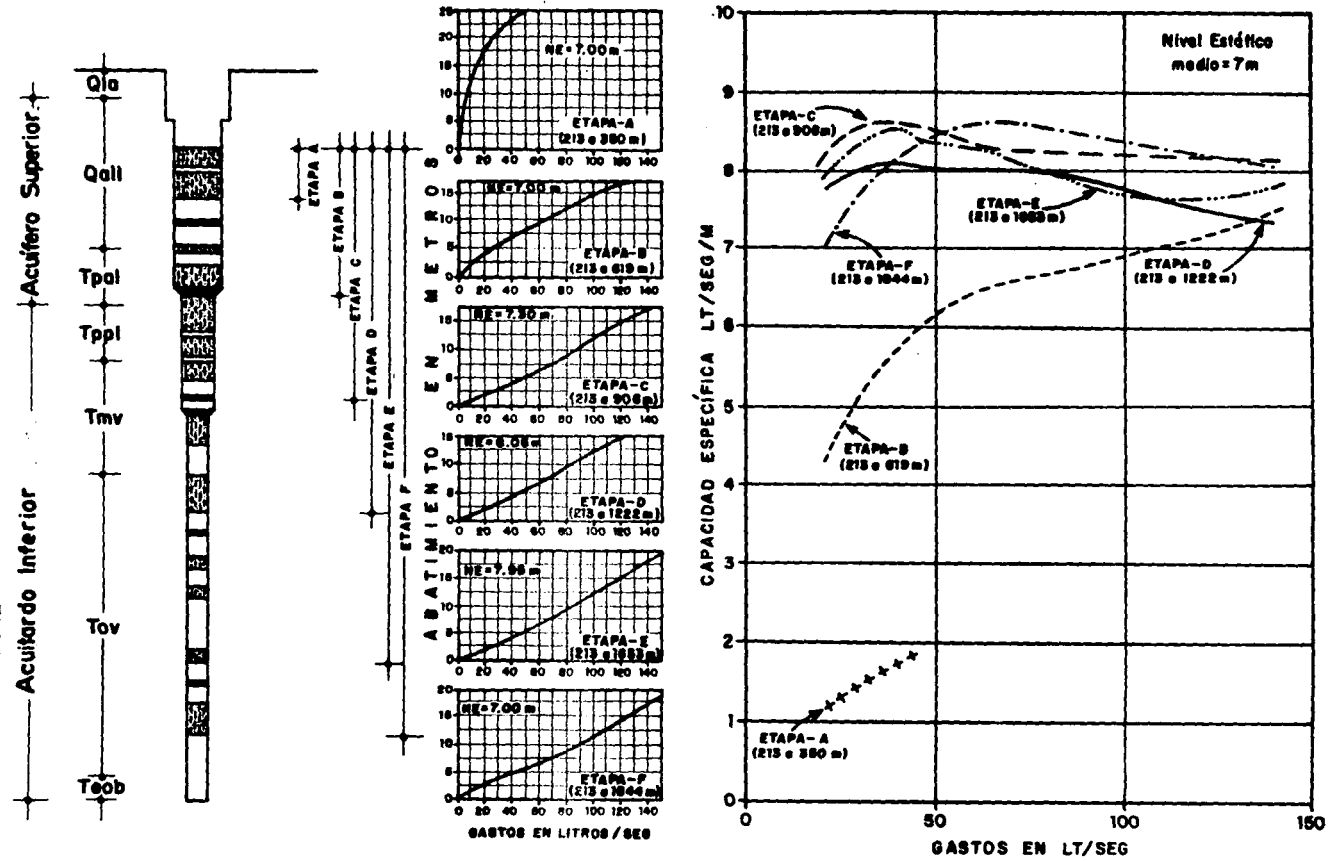


Figura 3.1.7 Resultados de los aforos realizados por tramos acumulativos en el pozo profundo Texcoco P-PI (adaptada del proyecto Texcoco, 1969). Qla-arcillas lacustres del Cuaternario, Qall-sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, Tpol-depositos aluviales y piroclasticos del Plioceno Superior, Tppi-depositos piroclasticos y lacustres del Plioceno Inferior, Tmv-rocas volcanicas del Mioceno, Tov-rocas volcanicas del Oligoceno, Teob-Formación Bataas.

perforación de los pozos Tulyehualco 1 y Mixhuca 1 (PEMEX, 1987), entre estas se tienen: *a)* las continuas pérdidas de lodos de perforación en estas rocas carbonatadas, *b)* fracturas abiertas observadas en los núcleos de calizas recuperados y *c)* la presencia de una gran caverna reconocida con registros eléctricos a profundidades entre 2,243 y 2,248 m en el pozo Tulyehualco 1.

En las subcuencas del Estado de Morelos existen varios manantiales en estas rocas carbonatadas con descarga de hasta $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (SARH, 1980 a y b; GAVM, 1987). También, se han reportado manantiales en las mismas rocas en el norte de la cuenca (Fries, 1962).

3.1.2 Unidades de Baja Permeabilidad

Depósitos lacustres del Cuaternario. Afloran ampliamente en las partes bajas de la cuenca en forma de una serie de planicies lacustres (Figura 3.1.3). Consisten principalmente de arcillas, pero hacia las márgenes de las planicies, las arcillas se intercalan con limos y arenas e inclusive con gravas. En el interior de las planicies se han identificado a profundidades del orden de 35 y 55 m, dos capas más permeables con espesores del orden de 2 m, compuestas por cenizas volcánicas tamaño limo y arena, las cuales son conocidas geotécnicamente como "capas duras" (Marsal y Masari, 1959).

Existe una gran diversidad de clasificaciones mineralógicas de estas arcillas. Primeramente Bryan (1948) las describe como bentonita y montmorillonita con calcita, diatomeas y ostrácodos. Marsal y Mazari (1959) las clasifican como illita, y posteriormente, Girault (1964) identifica allophano típico de ambientes volcánicos. Recientemente, Pitre (1994), en núcleos obtenidos en la confluencia del río de los Remedios con el Gran Canal de desagüe, reporta smectita, allophano e illita con biotita, cuarzo, feldespato cálcico, hornblenda, vidrio volcánico, sulfuros y calcita-dolomita como producto de alteración. Este último autor también reporta para las arcillas lacustres una alta capacidad de intercambio catiónico del orden de 60 ceq/Kg, un 7 % de carbono orgánico total y diferentes tipos de fracturas. La actividad hidráulica y continuidad a profundidad de las fracturas en las arcillas, son aspectos aún inciertos.

Su carácter blando se manifiesta por bajas velocidades de propagación sísmica (300 y 1200 m/s), reportadas con los sondeos de sísmica de refracción (CFE, 1988); y su constitución de arcillas, se refleja por bajas resistividades aparentes (0.5 a $4 \Omega/\text{m}$), obtenidas con sondeos eléctricos verticales en las planicies de Chalco y Texcoco (GAVM, 1986; UACH, 1991;

DGCOH, 1993). Las bajas resistividades aparentes, además son resultados de su agua salina intersticial, reconocida en el centro de la planicie de Texcoco (Proyecto Texcoco, 1969; Rudolph, et al., 1991) y en el centro de la planicie de Chalco (Ortega, et al., 1993). También se caracterizan por su alto contenido de agua superior en casos a 500 % y por su alto coeficiente de compresibilidad ($0.1 < a_v < 6.0 \text{ cm}^2 / \text{s}$) (Marsal y Masari, 1959). Los mayores espesores de arcillas entre 80 y 100 m, se presentan en el centro de la planicie de Texcoco (pozo PP3), y del orden de 120 m en el centro de la planicie de Chalco (pozo MSC-6, Anexo 1).

La relación interestratificada que mantiene con las rocas basálticas en el límite norte de la sierra Chichinautzin (Figura 3.1.4), es un factor que controlaba la descarga de agua subterránea en el pasado. La ubicación de manantiales históricos documentados en el interior de la planicie de la Ciudad de México (Durazo y Farvolden, 1989; Ortega y Farvolden, 1989), es consistente con la disminución de arcillas hacia las márgenes de las planicies lacustres.

Depósitos piroclásticos y lacustres, Plioceno inferior. Afloran en la sierra de Tepoztlán al sur de la sierra Chichinautzin (Figura 3.1.3). Fuera de la cuenca afloran depósitos piroclástico y lacustres similares de la misma edad al norte de la Cuenca de Puebla (Erffa y Hilger, 1975). Cubren discordantemente a las rocas volcánicas del Mioceno y se acuñan hacia el oriente y poniente (Figura 3.1.4). En su parte inferior predominan sedimentos lacustres caracterizados por arcillas con intercalaciones de limos y arenas; en su parte superior se presentan tobas, brechas y aglomerados volcánicos bastante compactos que contienen intercalaciones de sedimentos lacustres (pozos exploratorios, Anexo 1). Su espesor se incrementa hacia el sur y centro de la cuenca, alcanzando espesores máximos del orden de 800 m identificados en el pozo exploratorio Copilco 1.

Su baja permeabilidad es comprobada por los caudales de producción del orden de 1 a 4 l/s en pozos perforados en esta unidad en el valle de Tepoztlán ubicado al sur de la sierra Chichinautzin (FNM, 1992). Del mismo modo algunos pozos profundos productores (PER-17, P-6), fueron construidos con tubería ciega en esta unidad.

Rocas andesíticas, Mioceno. Se encuentran aflorando al poniente de la sierra Guadalupe y sur de la sierra Patlachique (Figura 3.1.3). Sobreyacen discordantemente a las rocas volcánicas del Oligoceno y en las sierras del oriente y poniente subyacen a las andesitas del Plio-Cuaternario (Figura 3.1.4). Son rocas fracturadas compuestas por coladas lávicas,

tobas, brechas y aglomerados intercalados (Figura 3.1.5, Anexo 1). Los núcleos recuperados en los pozos profundos exploratorios perforados por PEMEX (1987), muestran que la mayoría de las fracturas observadas en las andesitas del Mioceno, se encuentran selladas por calcita, cuarzo y arcillas, lo cual indica que su permeabilidad es limitada. Los espesores de estas rocas encontrados en los pozos profundos exploratorios, varían entre 315 y 1,110 m (Anexo 1). Su límite superior tiende a coincidir con el horizonte reflector VI y 3 reconocidos respectivamente por Pérez-Cruz (1988) y Mooser (1993) (Anexo 1).

La baja permeabilidad de las rocas del Mioceno es comprobada por los aforos realizados por etapas con tramos acumulativos en el pozo profundo P-P1 (Proyecto Texcoco, 1969). En este tipo de pruebas se observa que al aumentar el tramo aforado en donde se encuentran las rocas del Mioceno (etapas C y D), para los mismo gasto de las etapas A y B, los caudales específicos son mayores (Figura 3.1.7). Esto se explica por un mayor tramo ranurado. Sin embargo al aumentar los caudales no se incrementan los caudales específicos, si no por el contrario se mantienen prácticamente constantes e inclusive disminuyen a tiempos más largos (Figura 3.1.7). Igualmente, los registros de temperatura y velocidad de flujo tomados durante los aforos por tramos selectivos en el mismo pozo PP-1, muestran que no hay flujo significativo en el intervalo (814 y 1,125 m) que comprende a las rocas del Mioceno (Figura 3.1.8). Por otra parte el ademe de los pozos profundos productores del orden de 1,000 m (pozos P-1, P-2, P-4, P-5 y P-6), no fueron construidos con tubería ranurada en donde se encuentran las andesitas del Mioceno.

Es probable que su permeabilidad disminuya con la profundidad al ser compactadas y sus fracturas selladas por el efecto de la carga litostática de sepultamiento. Pero de igual manera su permeabilidad puede incrementarse en las zonas someras donde afloran localmente, debido a que las fracturas no se encuentran selladas.

Rocas basálticas y riolíticas, Oligoceno. Afloran fuera de la región estudiada al norte de la cuenca en la sierra Pachuca (Fries, 1962). En el subsuelo de la cuenca cubren a la Formación Balsas y a las rocas carbonatadas del Cretácico (Figura 3.1.4). De acuerdo con las muestras de canal y núcleos recuperados en los pozos profundos exploratorios, son rocas fracturadas compuestas principalmente por tobas, brechas y aglomerados riolíticos compactos, los cuales presentan intercalaciones de basaltos (Figura 3.1.5, Anexo 1). En los pozos profundos Tulyehualco 1, Mixhuca 1 y Texcoco PP-1, tienen espesores de 150, 520 y 830 m respectivamente. En el pozo profundo Roma 1 el espesor es de más de 850 m (Anexo 1). El reflector sísmico 4 identificado por Mooser, se relaciona con su cima.

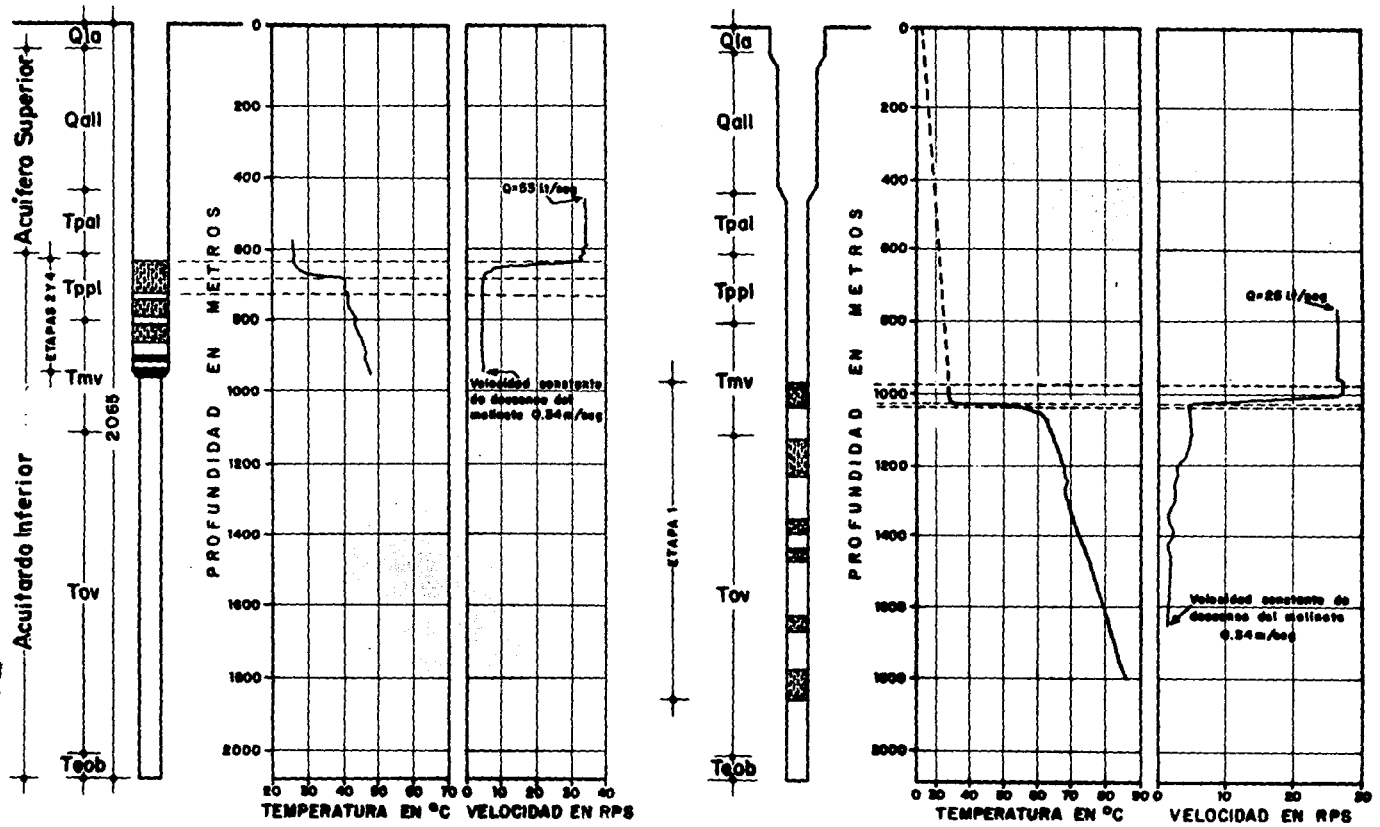


Figura 3.1.8 Registros de temperatura y velocidad de flujo del agua subterránea durante afloros realizados por tramos selectivos en el pozo profundo Texcoco P-PI (adaptada del proyecto Texcoco, 1969). Qla - Arcillas lacustres del Cuaternario, Qall-sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, Tpal-depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno Superior, Tppi-depósitos piroclásticos y lacustres del Plioceno inferior, Tmv-rocas volcánicas del Mioceno, Tov-rocas volcánicas del Oligoceno, Teob-Formación Balsas.

Al igual que para las rocas del Mioceno los aforos realizados en el pozo P-P1 (Proyecto Texcoco, 1969), muestran que en general son de baja permeabilidad (Figuras 3.1.7). Aunque pueden presentar zonas locales de mejor permeabilidad en su parte superior por alteración, así lo muestra el incremento de la velocidad de flujo y temperatura en la profundidad comprendida entre 1,127 y 1,222 m (Figura 3.1.8). También en los núcleos recuperados en los pozos exploratorios de PEMEX (1987), se reportaron fracturas selladas por calcita, cuarzo y arcillas.

Mooser y Molina (1993) consideran a las rocas volcánicas del Mioceno y Oligoceno, como unidades permeables y las integran como un "acuifero medio". Sin embargo las evidencias mostradas, indican que no se pueden considerar como acuifero.

Formación Balsas, Eoceno. Aflora fuera de la región estudiada al norte de la cuenca por Apaxco Hgo. y en las subcuencas del Estado de Morelos. En el subsuelo de la cuenca, se encuentra cubriendo discordantemente a las unidades del Cretácico (Figura 3.1.4). En el pozo Texcoco P-P1, a una profundidad entre 1,970 y 2,065 m, se encontraron arcillas anhidriticas cubriendo a conglomerados calizos arcillosos fuertemente compactos pertenecientes a esta unidad (Proyecto Texcoco, 1969). En el pozo Roma 1 a profundidades entre 2,720 y 3,200, se perforó una brecha calcárea que cubre a limolitas arcillosas calcáreas clasificadas como tobas calcáreas por PEMEX (1987).

Formación Mezcala, Cretácico tardío. La Formación Mezcala aflora en las subcuencas del Estado de Morelos (Fries, 1960) y al noroeste de la cuenca (Fries, 1962). En la parte meridional de la cuenca, los pozos profundos exploratorios no la perforaron, ni tampoco fue distinguida por los estudios mencionados de sismica de reflexión. Sin embargo, por correlación estratigráfica con las regiones de las subcuencas de los estados de Morelos e Hidalgo, se infiere su presencia en el subsuelo de la cuenca, en zonas de anticlinales, sobreyaciendo a la unidad de las rocas carbonatadas del Cretácico (Figura 3.1.4). Su litología ha sido reportada de lutitas, limolitas y areniscas arcillosas calcáreas interstratificadas rítmicamente (Fries, 1960 y 1962).

3.2 Modelo Conceptual

3.2.1 Acuífardo superior

Los depósitos lacustres del Cuaternario por estar compuestos principalmente de arcillas y por su comportamiento hidráulico, han sido considerados como un acuífardo (Ortega y Farvolden, 1989; Rodolph, et al., 1991; Ortega et al., 1993), el cual por el efecto del bombeo en unidades permeables subyacentes, le transmite agua al acuífero superior. De esta manera es un semiconfinante del mismo acuífero y consecuentemente por su pérdida de presión de poro, aunado a la alta compresibilidad de las arcillas, se ha hundido el terreno afectando cuantiosamente la infraestructura hidráulica y urbana de la Ciudad de México.

El espesor del acuífardo superior se incrementa de sur a norte; el máximo espesor del orden de 120 m, se presenta en el centro de la planicie de Chalco y en la planicie de la Ciudad de México, los espesores varían entre 20 y 80 m (Figura 3.2.1).

3.2.2 Acuífero Superior

Las siguientes unidades hidrogeológicas por su carácter permeable y por que de acuerdo a sus relaciones estratigráficas, mantienen continuidad hidráulica, se integran como el acuífero superior.

Sedimentos aluvio-lacustre, Cuaternario

Rocas basálticas, Cuaternario

Rocas andesíticas, Plio-Cuaternario

Depósitos piroclásticos andesíticos, Plio-Cuaternario

Rocas andesíticas del Plioceno superior

Depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior

El límite inferior del acuífero en las zonas de las planicies lacustres, corresponde a la cima de los depósitos lacustres del Plioceno inferior, y en las zonas montañosas con la cima de las rocas andesíticas del Mioceno (Figura 3.1.4). Su frontera superior en las zonas montañosas, es la superficie freática, es decir que es de tipo libre, y en las planicies lacustres, es la base del acuífardo superior. Su extensión lateral, va más allá de la divisorias de aguas superficiales de la cuenca. La profundidad a su base, varía entre 400 y 750 m, la profundidad menor se presenta en el norte y la mayor al sureste de la región (Figura 3.2.2).

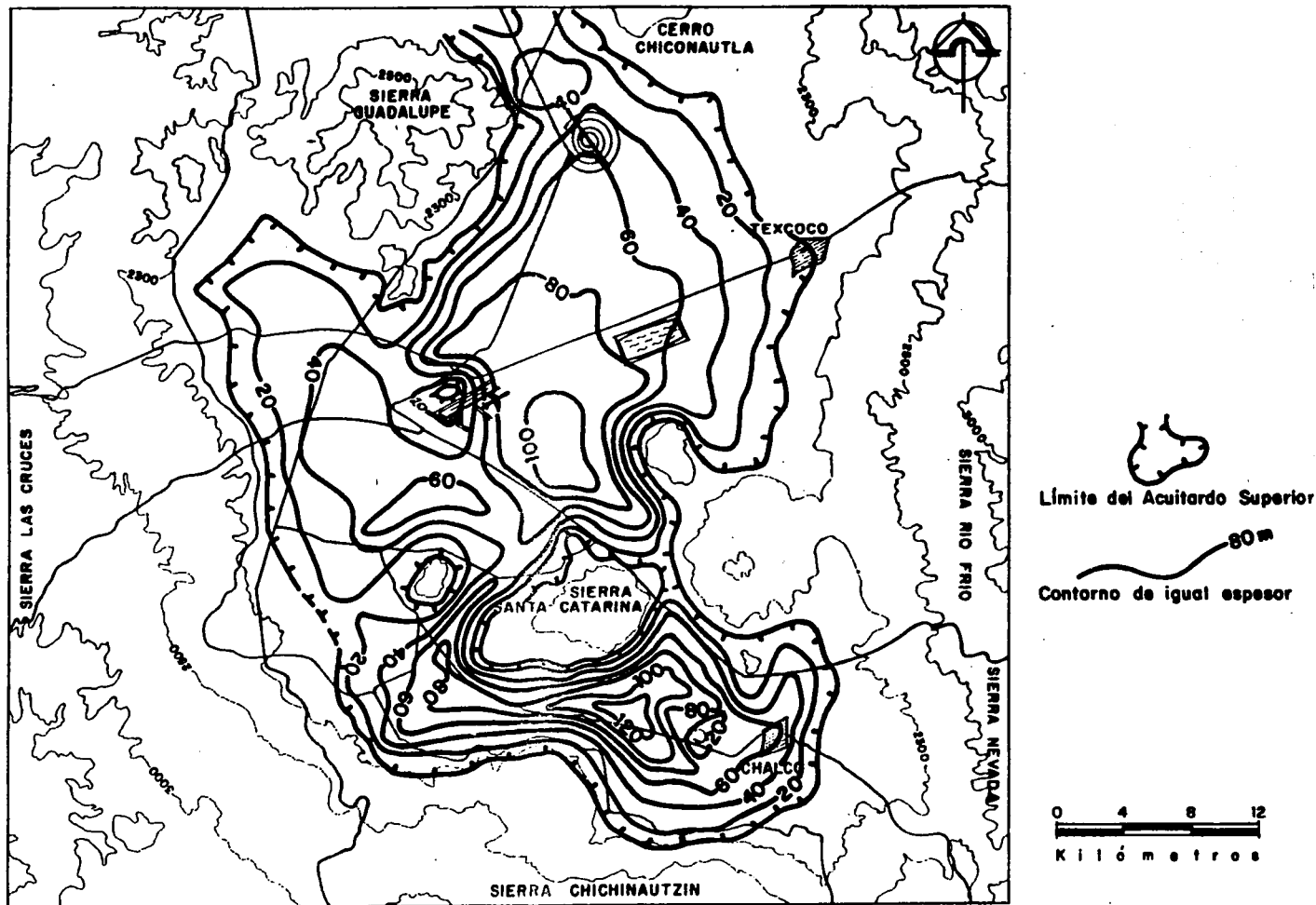
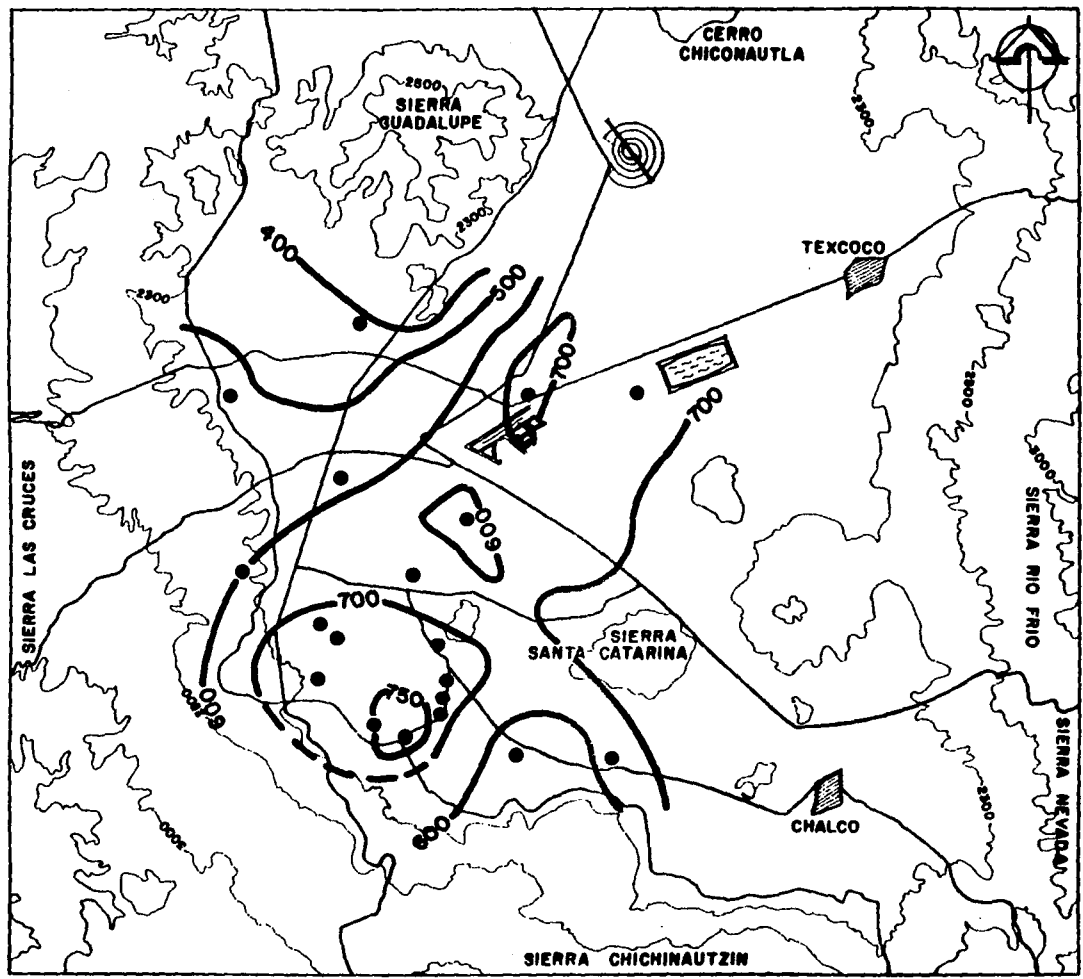



Figura 3.2.1 Espesores del Acuitardo Superior (Depósitos Lacustres del Cuaternario).



 400 m
Contorno de igual profundidad


Pozo de más de 400 m de profundidad.



0 4 8 12
Kilómetros

Figura 3.2.2 Profundidad a la base del Acuífero Superior...

La mayor parte del bombeo de agua subterránea en la parte meridional de la cuenca, el cual se concentra en las partes bajas de la cuenca y que en su totalidad es del orden de $46 \text{ m}^3 / \text{s}$ (DGOH, 1992b, 1993, 1994b), se extrae de la parte superior del acuífero, específicamente de las unidades de los sedimentos aluvio-lacustres, rocas basálticas y depósitos piroclásticos. La parte inferior del acuífero en los depósitos aluviales y piroclásticos, no se explota a gran escala.

La posición del nivel estático en pozos piloto con respecto a la base del acuitardo superior, indica que el comportamiento hidráulico del acuífero superior, ha sido transformado de semiconfinado a libre en las márgenes del oriente y poniente de las planicies lacustres; mientras que en las márgenes sur y norte, el cambio hidráulico no ha sido tan marcado (Figura 3.2.3). La concentración del bombeo en la parte superior de este acuífero, ha provocado que su nivel piezométrico descienda por debajo de la base del acuitardo superior, causando de esta forma condiciones de acuífero libre. A parte de que el acuitardo se adelgaza hacia el oriente y poniente, la baja capacidad para transmitir la recarga de la unidad menos permeable de los depósitos piroclásticos en los flancos de las sierras del oriente y poniente, es otro factor que ha propiciado el cambio hidráulico en el acuífero.

3.2.3 Acuitardo Inferior

Las unidades hidrogeológicas de los depósitos lacustres y piroclásticos del Plioceno inferior, rocas andesíticas del Mioceno, rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, Formación Balsas y Formación Mezcala, se integran como un sólo acuitardo inferior. Las razones son su baja permeabilidad y por que mantienen comunicación hidráulica evidenciada por sus relaciones estratigráficas. Sin embargo es probable que localmente existan zonas más permeables por fracturamiento, especialmente en las rocas volcánicas del Mioceno y Oligoceno. De esta forma, el espesor total mínimo de este acuitardo es de 830 m en el pozo Mixhuca-1 y máximo de 2590 en el pozo Roma-1.

Su posición por debajo el acuífero superior en explotación, predispone una situación de probable filtración ascendente de este acuitardo hacia el acuífero sobreyacente, a causa del bombeo en unidades permeables superiores. La posible filtración ascendente, debe ser más importante en zonas de fracturamiento y/o fallamiento reciente.

3.2.4 Acuífero Inferior

El acuífero inferior es formado por las rocas carbonatadas del Cretácico, las cuales son permeables por fracturamiento y disolución. La profundidad a su límite superior es controlado estructuralmente (Figura 3.1.4) y su límite inferior se desconoce por falta de perforaciones más profundas. No obstante en las subcuencas del Estado de Morelos, se han reportado debajo estas rocas carbonatadas permeables, anhidritas, calizas arcillosas y lutitas del Cretácico inferior (Fries, 1960).

La profundidad a su cima, claramente muestra un control estructural; al poniente de las zonas de falla "Mixhuca", la profundidad varía entre 3,300 y 3,800 m; y al oriente de la misma zona de falla, la profundidad es del orden de 2,000 m (Figura 3.2.4).

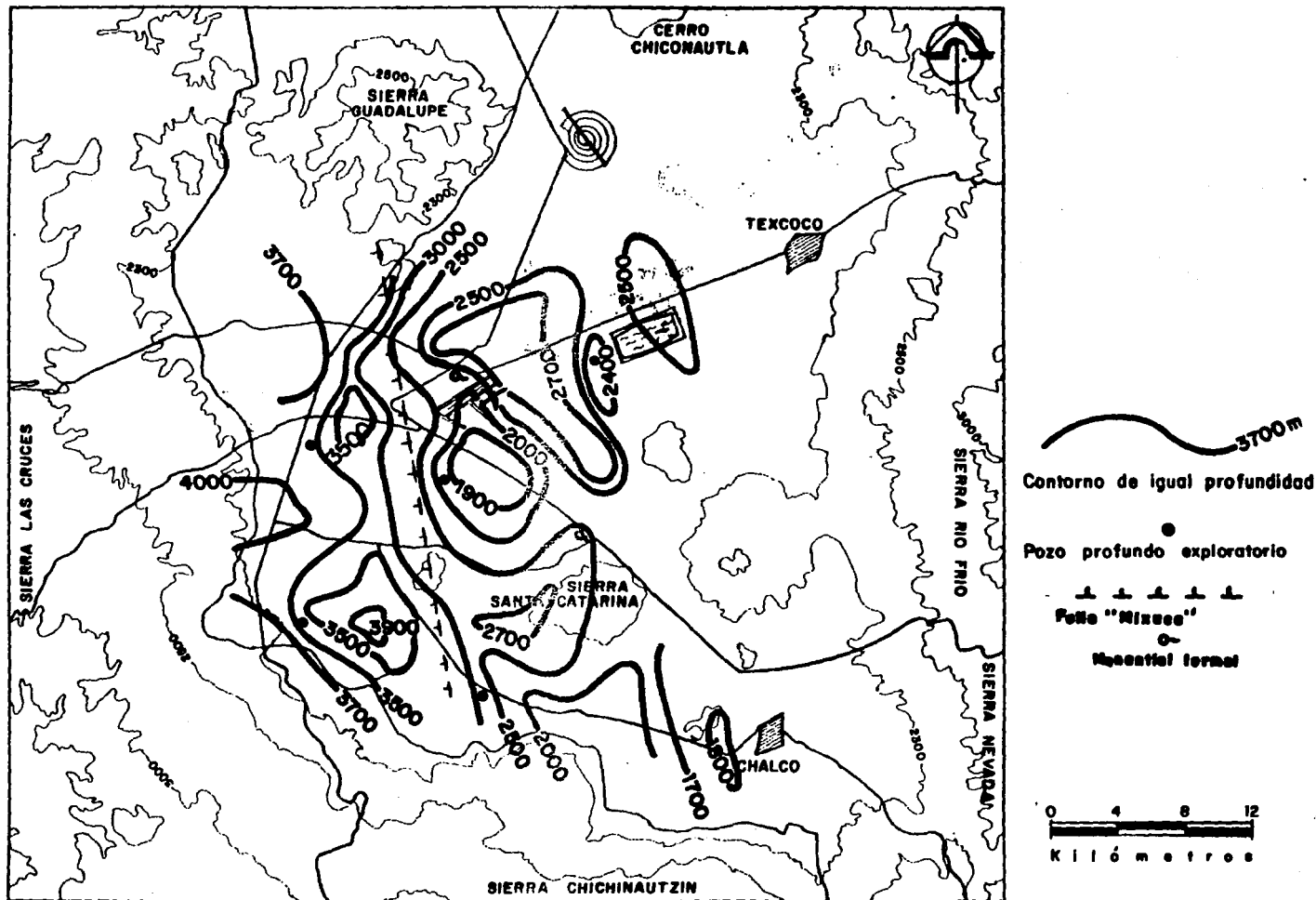


Figura 3.2.4 Profundidad a la cima del Acuífero Superior. (Rocas Carbonatadas del Cretácico).

4.0 ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO

4.1 Comportamiento Hidráulico del Acuífero Superior

La configuración de las curvas de abatimiento vs tiempo construidas en gráficas doble logarítmico (Anexo 2), con base en la información de pruebas de bombeo a caudal constante realizadas por la DGCOH (1983, 1992b, 1993) y Huizar (1989), permitió establecer el comportamiento hidráulico y confirmar la naturaleza de los medios porosos del acuífero superior. La situación geológica (estratigrafía) e hidrogeológica (posición del nivel estático) en cada prueba de bombeo, son aspectos que confirman el funcionamiento hidráulico del acuífero observado de las curvas de abatimiento vs tiempo. Las pruebas de bombeo se evaluaron cuantitativamente con el método estándar de Boulton (1954), cuando se presentaron condiciones de acuífero libre y con el método de Walton (1962, en Kruseman y Ridder, 1990), bajo comportamiento semiconfinado. La respuesta hidráulica del acuífero como un medio de doble porosidad en condiciones libres y semiconfinadas, se interpretó con el método de Boulton y Streltsova (1978). La localización de las pruebas de bombeo analizadas y evaluadas con estos métodos estándar, se presenta en la Figura 4.1.1.

El análisis de las pruebas de bombeo indican que el acuífero superior en las lomas del oriente y poniente, se comporta como libre en el medio granular de los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario (Figura 4.1.2). También indican que en el interior de la planicie de la Ciudad de México, en donde además el nivel estático, se encuentra por debajo de la base de las arcillas lacustres del Cuaternario (acuitardo superior), el acuífero es libre en el medio granular de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario. La distribución de las pruebas de bombeo que presentan un comportamiento de acuífero libre en el interior de las planicies lacustres, es consistente con el límite entre acuífero libre y semiconfinado (Figura 4.1.2), el cual se definió con base en la profundidad al nivel estático en el mismo acuífero y los espesores del acuitardo superior (Figura 3.2.3).

Las pruebas de bombeo representativas del comportamiento libre del acuífero en las unidades granulares anteriormente mencionadas, se presentan en la Figura (4.1.3). En esta figura se observa que el efecto del drenaje gravitacional retardado, es más prolongado en los depósitos piroclásticos. Esto sugiere que los sedimentos aluvio-lacustres, son más permeables que los depósitos piroclásticos, permitiendo de esta manera un drenaje más rápido. Al respecto, los valores de la relación r/D , resultaron sistemáticamente menores en

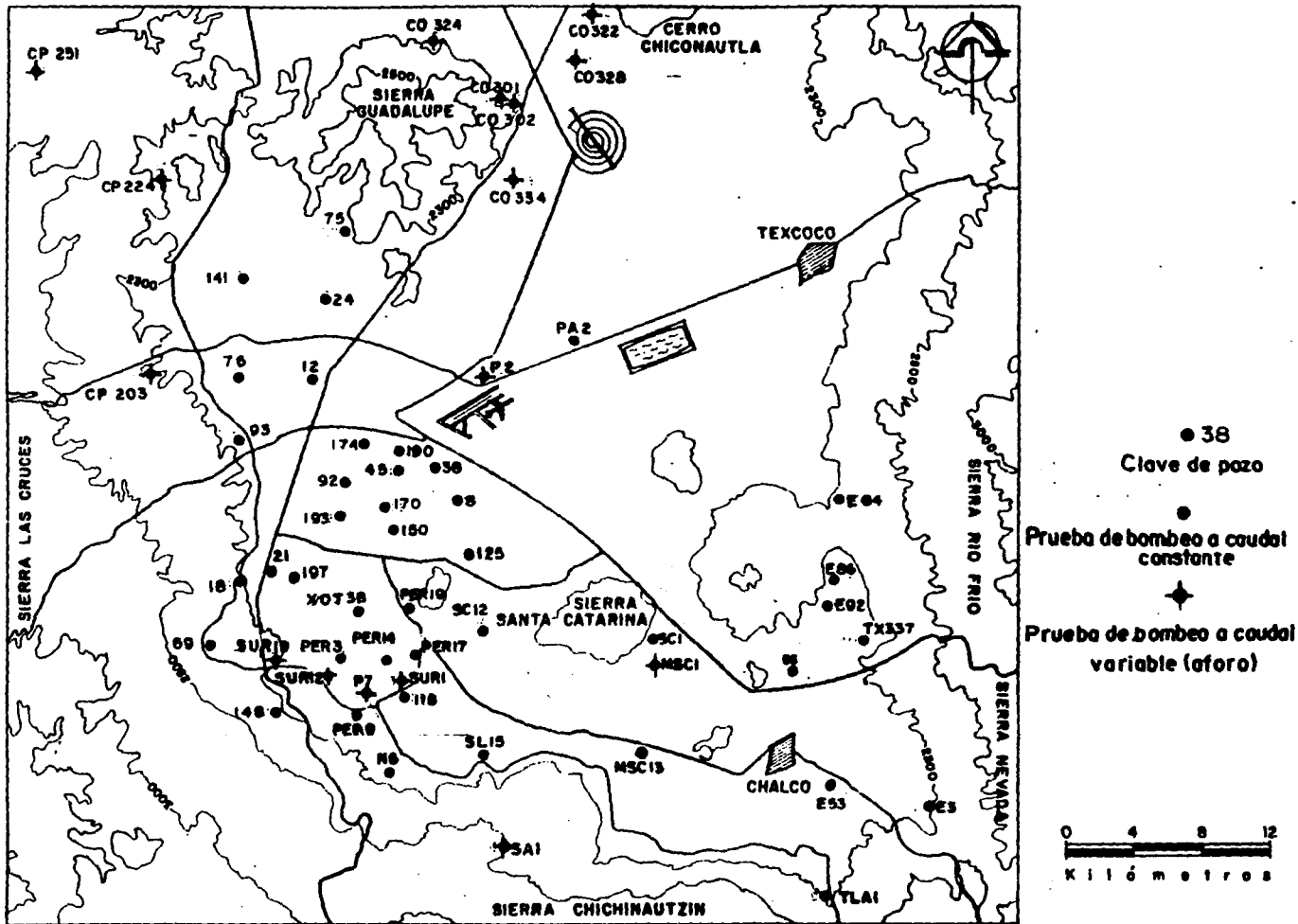


Figura 4.1.1 Localización de pruebas de bombeo analizadas y evaluadas con métodos estándar y simuladas numéricamente con el modelo de flujo de agua radial hacia un pozo.

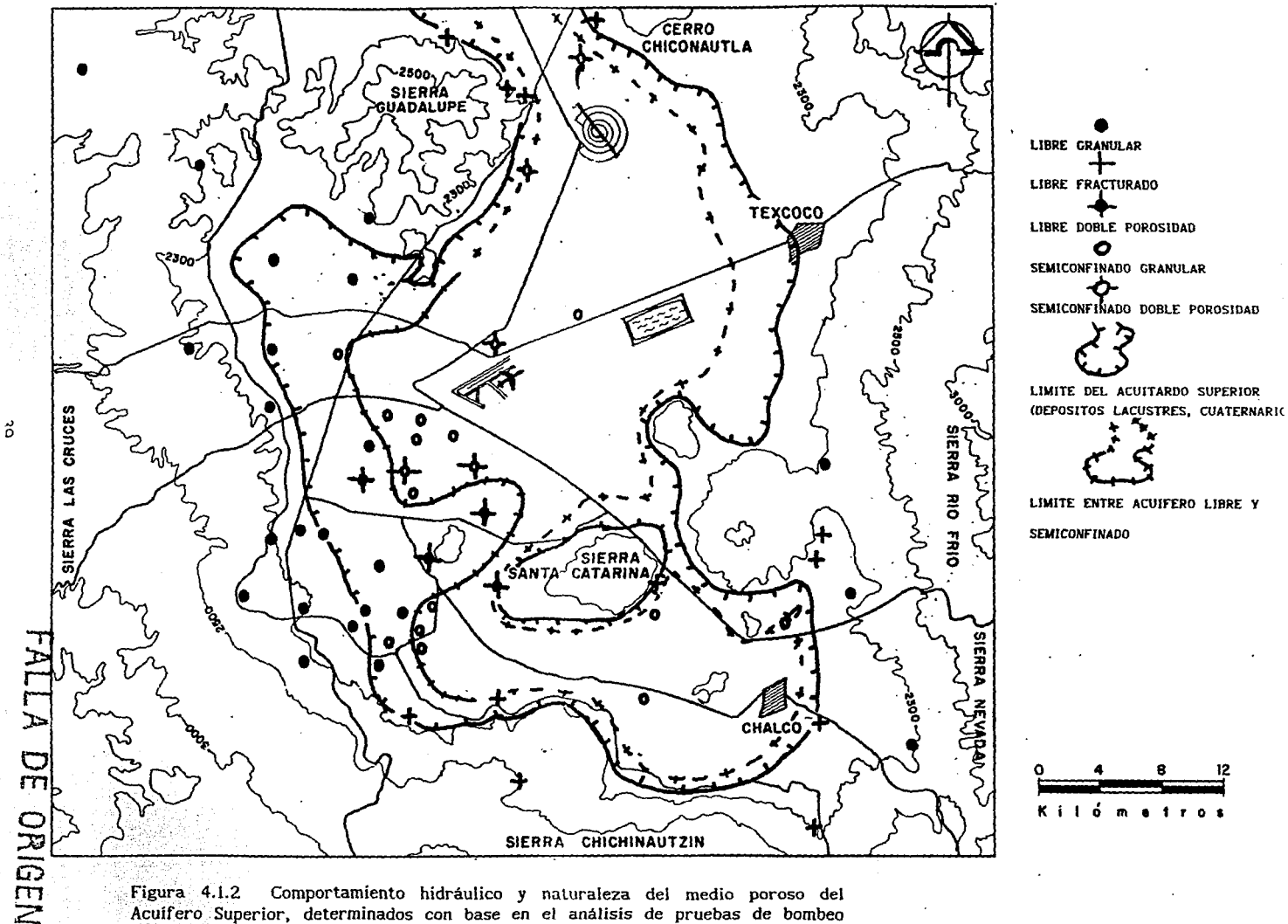
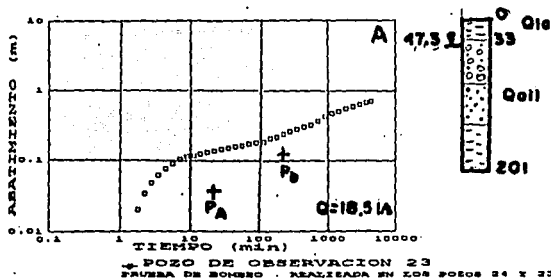
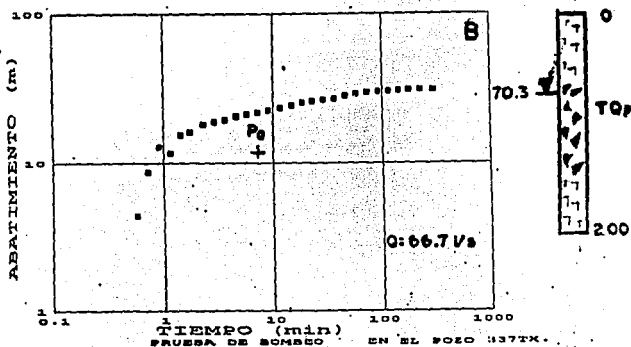


Figura 4.1.2 Comportamiento hidráulico y naturaleza del medio poroso del Acuífero Superior, determinados con base en el análisis de pruebas de bombeo a caudal constante.



$$\begin{aligned}
 W(u, r/D) &= 0.1 \\
 1/u &= 10^{-2} \\
 r/D &= 1.5 \\
 s &= 0.034 \text{ m} \\
 t &= 168 \text{ s} \\
 b &= 153 \text{ m} \\
 T &= 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\
 K &= 2.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 W(u, r/D) &= 2.0 \\
 1/u &= 10^{-1} \\
 r/D &= 0.1 \\
 s &= 12.5 \text{ m} \\
 t &= 432 \text{ s} \\
 b &= 111.0 \text{ m} \\
 T &= 8.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \\
 K &= 7.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Figura 4.1.3 Pruebas de bombeo a caudal constante representativas del comportamiento libre del acuífero superior en los medios porosos granulares de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario (A) y de los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario (B). $W(u, r/D)$ =función de pozo, $u=r^2/4Tt$, r =ordenada radial, D =factor de drenaje, s =abatimiento al tiempo de bombeo t , b =espesor de explotación, P_A y P_B =puntos de ajuste, T =transmisividad y K =conductividad hidráulica.

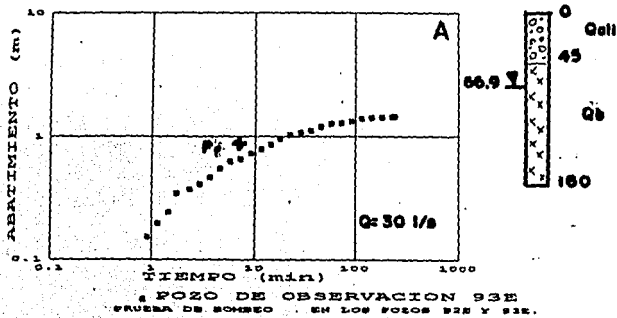
los depósitos piroclásticos ($0.1 < r/D < 0.6$), a comparación de los mismos valores en los sedimentos aluvio-lacustres ($0.1 < r/D < 1.5$) (Tabla 4.2.1).

Comportamiento de acuífero libre fracturado, se identificó en pruebas de bombeo en las rocas basálticas del Cuaternario, sobre el flanco norte de la sierra Chichinautzin y alrededores de la sierra Santa Catarina y cerro La Estrella (Figura 4.1.2). En alguna de estas pruebas (pozos SC-12, 125), se aprecia el efecto de doble porosidad; el cual en la primera parte de la curva de abatimiento, es asociado con una aparente respuesta elástica de las fracturas; la parte intermedia de la misma curva, en donde el abatimiento es casi nulo, se relaciona con un flujo de interporosidad pseudo-estable; y la parte final, representa una condición de flujo casi-estable en la matriz granular (Figura 4.1.4, Anexo 2). El comportamiento de doble porosidad en las rocas basálticas, se explica por medio de su litología compuesta por derrames lávicos fracturados, que presentan intercalaciones de cenizas, lapilli, tobas y brechas volcánicas. La respuesta elástica inicial, se asocia con el flujo de las fracturas en los derrames lávicos, y la respuesta final con el flujo casi-estable en los depósitos piroclásticos intercalados.

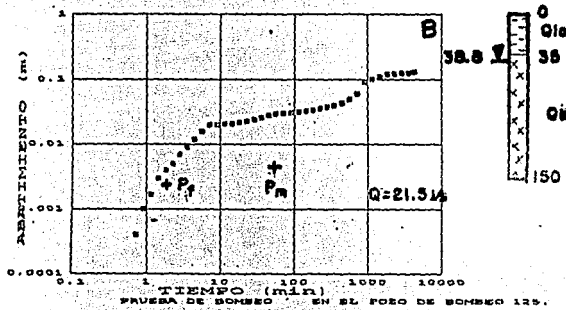
Por otra parte la mayoría de las pruebas de bombeo en las rocas basálticas, no manifiestan la condición final de flujo casi-estable (Figura 4.1.4, Anexo 2). Lo cual indica que el flujo en estas rocas basálticas, es preferentemente a través de fracturas.

El comportamiento de acuífero libre de doble porosidad, también se presenta al oriente del cerro la Estrella (Figura 4.1.2), en donde el pozo de bombeo, extrae el agua de dos unidades diferentes (pozos 19-PER y 193, Anexo 2), de las rocas basálticas y sedimentos aluvio-lacustres o depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior. Bajo estas situaciones geológicas, se interpreta que la parte inicial de la prueba, es dominada por el flujo de las fracturas en las rocas basálticas; mientras que el comportamiento a tiempos largos, es controlado por el flujo en las unidades granulares.

De acuerdo con el análisis gráfico de la configuración las curvas de abatimiento vs tiempo en las pruebas de bombeo, el acuífero superior en el centro de las planicies lacustres, se comporta como semiconfinado en el medio granular de los sedimentos aluvio-lacustres (Figura 4.1.2). Pero también existen condiciones de semiconfinamiento en las rocas basálticas del Cuaternario, rocas andesíticas y depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior. El comportamiento semiconfinado del acuífero, se manifiesta por una disminución del abatimiento, después de una primera etapa en donde el comportamiento es



$W(r, \theta_1) = 1.0$
 $\theta_1 = 0.1$
 $s_1 = 0.83 \text{ m}$
 $t_1 = 564 \text{ s}$
 $r = 31.8 \text{ m}$
 $"T_f" = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $"S_f" = 0.065$



$W(r, \theta_1) = 0.1$
 $\theta_1 = 0.01$
 $s_1 = 0.023 \text{ m}$
 $t_1 = 105 \text{ s}$
 $r = 19.2 \text{ m}$
 $"T_f" = 7.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

$W(r, \theta_2) = 0.1$
 $\theta_2 = 1.0$
 $s_2 = 0.029 \text{ m}$
 $t_2 = 4200 \text{ s}$
 $"T_m" = 5.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Figura 4.1.4 Pruebas de bombeo a caudal constante representativas del comportamiento libre-fracturado y de doble porosidad del acuífero superior en las rocas basálticas del Cuaternario. Respuesta elástica de las fracturas y flujo interporosidad (A), respuesta elástica de fracturas y matriz (B). $W(r, \theta_1)$, $W(r, \theta_2)$ =funciones de pozo para la respuesta elástica de las fracturas y matriz, r =ordenada radial, $\theta_1=4T_f t_1/r^2 S_f$, $\theta_2=4T_m t_2/r^2 (S_f+S_m)$, S_1 y S_2 =abatimiento al tiempo de bombeo t_1 y t_2 , T_f y T_m =transmisividad de las fracturas y matriz, S_f y S_m =coeficiente de almacenamiento de las fracturas y matriz, P_f y P_m =puntos de ajuste.

confinado (Figura 4.1.5, Anexo 2). La condición de semiconfinamiento, es impuesta por las arcillas lacustres del Cuaternario (acuitardo superior) que sobreyacen al acuífero. La distribución de las pruebas de bombeo con respuesta semiconfinada en el acuífero, es congruente con el límite entre acuífero libre y semiconfinado, el cual se determinó piezométricamente (Figuras 3.2.3 y 4.1.2).

Los valores de la relación r/L resultantes de la interpretación cuantitativa de pruebas de bombeo bajo condiciones de acuífero semiconfinado, los cuales varían entre 0.015 y 0.3 (Tabla 4.2.2), en general son bajos e indirectamente indican bajos valores del factor de filtración (L) en el acuitardo superior. Lo anterior sugiere que a tiempos relativamente cortos (tiempo de prueba de bombeo), la filtración del acuitardo al acuífero subyacente, es prácticamente despreciable a causa de la baja permeabilidad de las arcillas lacustres del Cuaternario.

En dos pruebas analizadas (pozos 8 y 170) al norte del cerro La Estrella, bajo condiciones semiconfinadas, el acuífero se comporta como un medio de doble porosidad (Figura 4.1.5, Anexo 2). En estos dos casos el pozo de bombeo extrae el agua de los sedimentos aluvio-lacustres y de las rocas basálticas. Por lo tanto, se interpreta que la etapa inicial de las pruebas, es dominada por la respuesta elástica de las fracturas en las rocas basálticas, y en la etapa final, domina más el flujo de la unidad granular. La prueba de bombeo a caudal constante en el centro de la planicie de Chalco, en donde el pozo de bombeo (MSC-13) extrae el agua de los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, los cuales a su vez son cubiertos por los sedimentos aluvio-lacustres, igualmente indica condiciones de acuífero semiconfinado (Figura 4.1.2, Anexo 2). Sin embargo el valor r/L que resulta de 0.9 en esta prueba, es más grande que los valores obtenidos en condiciones de acuífero semiconfinadas con extracción en los sedimentos aluvio-lacustres (Tabla 4.2.2). Lo anterior significa que la filtración descendente de estos sedimentos a los depósitos aluviales y piroclásticos subyacentes, es más importantes en términos de tiempo de prueba de bombeo, y por otra parte en cierta medida se comprueba el modelo geológico del subsuelo en la planicie de Chalco.

4.2 Transmisividad y Conductividad Hidráulica del Acuífero Superior

Los valores de la transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) del acuífero superior, que se obtuvieron de las pruebas de bombeo a caudal constante evaluadas cuantitativamente con la aplicación de métodos estándar, se presentan en las tablas 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4,

TABLA 4.2.1 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR (MEDIO GRANULAR-COMPORTAMIENTO LIBRE).

NO. POZO	UNIDAD	RESULTADOS METODO ESTANDAR (BOULTON, 1954)				RESULTADOS MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA RADIAL HACIA UN POZO (RUSHTON Y REDSHAW, 1979; RASHID Y RUSHTON, 1984)						
		T m ² /s	b m	K m/s	r/D	UNIDAD	K ₁ m/s	S _y	Sc	DRF m	DRCH m	FFC
XOT-3B	Qall	0.024	205	0.00012	0.4	Qall	0.000023	0.15		300		1
23	Qall	0.0043	153	0.000028	1.5	Qall	0.000058	0.21		4		1
92	Qall	0.0079	183	0.000049	1.5	Qall	0.000058	0.2		300		1
						Qall	0.000069	0.15		500		10
						Qall	0.00017	0.2		26		1
TX-337	Tqp	0.00085	111	7.70E-06	0.1	Tqp	0.000021	0.09		500		1
E-3	Tqp	0.00084	137	6.10E-06	0.4	Tqp	0.00019	0.2		500		1
						Tqp	6.80E-06	0.1				1
E-84	Tqp					Tqp	5.80E-06	0.09		500		1
PER-9	Qall-Tqp	0.0078	152	0.000051	0.2	Qall	0.00031	0.2		500		1
						Tqp	0.000046		0.001			1
69	Tqp	0.0012	147	8.20E-06	0.6	Tqp	0.000056	0.06		500		1
75	Qall-Tpv	0.00079	134	5.90E-06	0.4	Qall	0.000023	0.15		500		1
						Qall	0.00013	0.2			8.0	1
						Tpv	4.60E-06		0.0001			1
141	Qall	0.0093	129	0.000064	0.1	Qall	0.00017	0.2		500		2
93	Tqp	0.00016	205	7.80E-07	0.8	Tqp	0.00001	0.07		500		5
197	Tqp-Tpal	0.0021	518	4.10E-06	0.2	Tqp	8.10E-06	0.07		700		1
						Tqp	0.000069	0.08			12	1
						Tpal	0.000035		0.0005			1
21	Qall-Tqp	0.0025	145	0.000017	0.4	Qall	0.00017	0.15		500		1
						Tqp	0.000017		0.0017			1
18	Tqp	0.00012	152	7.90E-06	0.2	Tqp	0.000021	0.085		500		1
76	Tqp	0.0026	123	0.000021	0.2	Tqp	0.000069	0.07		300		1
PER-3	Qall-Tqp	0.0013	354	3.70E-06	0.2	Qall	0.00023	0.17		700		1
PER-14	Qall-Tqp	0.0037	264	0.000014	0.1	Tqp	0.000012		0.001			10
						Qall	0.00012	0.2		500		1
*140						Tqp	0.000012		0.0007			1
**CP-203						Tqp	0.000034	0.08		500		1
						Tqp	5.70E-06	0.05		500		1
						Tqp	1.20E-06	0.01			57	1
**CP-251						Tqp	7.50E-06	0.07		500		1
**SUR-19						Tqp	0.000081	0.1		500		1
**SUR-12						Qall	0.00012	0.2		500		1
						Tqp	0.000054		0.001			1
**CP-224						Tqp	3.90E-06	0.1		600		2
						Tpv	0.000035		0.0007			1

Qall SEDIMENTOS ALUVIO-LACUSTRES, CUATERNARIO
 Tqp DEPOSITOS PIROCLASTICOS, FLIO-CUATERNARIO
 Tpal DEPOSITOS ALUVIALES Y PIROCLASTICOS, FLIO-CENO SUPERIOR
 Tpv ROCAS ANDESITICAS, FLIO-CENO SUPERIOR

DRF DISTANCIA RADIAL A LA FRONTERA DE FLUJO EXTERIOR
 DRCH DISTANCIA RADIAL DONDE CAMBIAN LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS
 FFC FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA HIDRAULICA EN EL POZO DE BOMBEO
 b ESPESOR DE EXPLOTACION

*140 PRUEBA DE BOMBEO NO INTERPRETABLE CON METODOS ESTANDAR
 **CP-203 PRUEBA DE BOMBEO A CAUDAL VARIABLE (AFORO)

45

FALLA DE ORIGEN

TABLA 4.2.2 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR (MEDIO GRANULAR-COMPORTAMIENTO SEMICONTINUADO)

RESULTADOS METODO ESTANDAR (WALTON, 1962)						RESULTADOS MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA RADIAL HACIA UN POZO (KUSHTON Y KEDDISHAW, 1979; RATHOD Y KUSHTON, 1984)					
NO. POZO	UNIDAD	T m ² /s	b m	K m/s	r/L	UNIDAD	Rh m/s	Sc	DRF m	DRCC m	FPC
MSC-13	Tpal	0.001	140	7.10E-06	0.9	Tpal	0.000049	0.0007	300		1
PA-2	Qall	0.0041	104	0.000039	0.075	Qall	0.000058	0.005	500		1
190	Qall	0.00024	145	1.70E-06	0.3	Qall	0.00023	0.002			1
PER-17	Qall-Tpal	0.00042	665	6.30E-07	0.2	Qall	0.000012	0.00037	500		10
						Qall	5.8000E-06	0.0007	500		10
38	Qall	0.00086	177	4.90E-06	0.15	Tpal	1.7000E-06	0.0001			10
174	Qall	0.0059	171	0.000045	0.2	Qall	0.000019	0.0009	600		1
						Qall	0.00014	0.003	700		1
45	Qall	0.0016	151	0.000011	0.1	Qall	0.00035	0.004		123	
						Qall	0.000041	0.001	500		2
118	Qall	0.0012	225	5.30E-06	2	Qall	0.00002	0.002		84	
150	Qall	0.0047	298	0.000016	0.1	Qall	0.00022	0.005	700		3
						Qall	0.000052	0.0007	700		1
12	Qall	0.0044	96	0.000046	0.015	Qall	0.000093	0.0033		264	
E-155	Qall	0.0092	59	0.00017	0.05	Qall	0.000093	0.004	700		3
**MSC-1						Qall	0.0037	0.005	500		1
**p-7						Qall	1.2000E-06	0.001	1000		1
						Tpal	0.000021	0.0002			1
						Tpal	0.000046	0.001	1000		1
						Tpal	0.000017	0.0001			1

Qall SEDIMENTOS ALUVIO-LACUSTRES, CUATERNARIO
 Tpal DEPOSITOS PIROCLASTICOS, PLIO-CUATERNARIO
 Tpal DEPOSITOS ALUVIALES Y PIROCLASTICOS, PLEISTOCENO SUPERIOR

DRF DISTANCIA RADIAL A LA FRONTERA DE FLUJO EXTERIOR
 DRCC DISTANCIA RADIAL DONDE CAMBIAN LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS
 FPC FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA HIDRAULICA EN EL POZO DE BOMBEO
 b ESPESOR DE EXPLOTACION

**MSC-1 PRUEBA DE BOMBEO A CUALDA VARIABLE (AFORO)

TABLA 4.2.3 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR (MEDIO FRACTURADO-CONDICION LIBRE).

NO. POZO	UNIDAD	RESULTADOS METODO ESTANDAR	RESULTADOS MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA RADIAL HACIA UN POZO							
		(BOULTON Y STRELITSOVA, 1978)	(RUSHTON Y REDSHAM, 1979; RATHO Y RUSHTON, 1984)	UNIDAD	Khe	b	Te	Sy	DRF	DRCCCH
		TF		m/s	m	m ² /s		m	m	
		m ² /s								
ZLA-1	Qb	0.14	Qb	0.029	74	2.1	0.06	500		1
E-86	Qb	0.00086	Qb	0.00012	102	0.0012	0.07	500		10
			Qb	0.00023	102	0.0024	0.07		4	
E-93	Qb	0.0029	Qb	0.00072	93	0.0067	0.1	500		1
SC-1	Qb	0.0083	Qb	0.0037	42	0.15	0.07	300		1
*N-6	Qb		Qb	0.0012	103	0.012	0.15	500		
*SL-15	Qb		Qb	0.0012	50	0.059	0.1	500		1
**E-53	Qb		Qb	0.00093	162	0.15	0.08	500		3
**SA-1	Qb		Qb	0.00017	132	0.0023	0.1	500		1
**CO-322	Qb		Qb	0.0069	94	0.59	0.1	500		1

Qb ROCAS BASALICAS, CUATERNARIO

*N-6 PRUEBA DE BOMBEO A CAUDAL CONSTANTE NO INTERPRETABLE CON EL METODO ESTANDAR

**SA-1 PRUEBA DE BOMBEO A CAUDAL VARIABLE (AFORO)

TF TRANSMISIVIDAD DE FRACTURAS

Khe CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA HORIZONTAL EQUIVALENTE

b ESPESOR DE EXPLOTACION

Te TRANSMISIVIDAD EQUIVALENTE

DRF DISTANCIA RADIAL A LA FRONTERA DE FLUJO EXTERIOR

DRCCCH DISTANCIA RADIAL DONDE CAMBIAN LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS

FFC FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA HIDRAULICA EN EL POZO DE BOMBEO

TABLA 4.2.4 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR (MEDIO DE DOBLE POROSIDAD-CONDICION LIBRE).

NO. POZO	UNIDAD	RESULTADOS METODO ESTANDAR (BOULTON Y STRELTOVA, 1978)		RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA HACIA UN POZO (RUSHION Y REDDHAM, 1979; RATHOD Y RUSHION, 1984)							
		Tf m ² /s	Tm m ² /s	UNIDAD	Khe m/s	b m	Te m ² /s	Sy	So	DRF m	FPC
SC-128	Qb	0.059	0.0059	Qb	0.00013	86	0.011	0.07		500	10
PER-19	Qb-Tpal	0.016	0.065	Qb	0.00069	296	0.21	0.08		700	1
				Tpal	0.000046	272	0.013		0.0005		1
193	Qb-Qall	0.0012	0.0039	Qb-Qall	0.000066	158	0.01	0.15		500	1
125	Qb	0.0074	0.0059	Qb	0.0015	111	0.17	0.08		250	1
**CO-301	Tpv			Tpv	4.60E-06	200	0.00093	0.08		500	1
**CO-302	Tpv			Tpv	0.000023	212	0.0049	0.05		500	1
**CO-334	Tpv			Qall	6.90E-06	115	0.0008	0.1		500	1
				Tpv	0.000081	110	0.0089		0.00019		1

Qall SEDIMENTOS ALUVIO-LACUSTRES, CUATERNARIO

Qb ROCAS BASALTICAS, CUATERNARIO

Tpal DEPOSITOS ALUVIALES Y PIEZOCLASTICOS, PLEOCENO SUPERIOR

Tpv ROCAS ANDESITICAS, PLEOCENO SUPERIOR

**CO-301 PRUEBA DE BOMBEO A CAUDAL VARIABLE (AFORO)

Tf TRANSMISIVIDAD DE FRACTURAS

Tm TRANSMISIVIDAD DE MATRIZ

Khe CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA HORIZONTAL EQUIVALENTE

b ESPESOR DE EXPLACACION

Te TRANSMISIVIDAD EQUIVALENTE

DRF DISTANCIA RADIAL A LA FRONTERA DE FLUJO EXTERIOR

DRCCN DISTANCIA RADIAL DONDE CAMBIAN LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS

FPC FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA HIDRAULICA EN EL POZO DE BOMBEO

TABLA 4.2.5 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR (MEDIO DE DOBLE POROSIDAD-CONDICION SEMICONFINADA).

NO. POZO	UNIDAD	RESULTADOS DEL METODO ESTANDAR (BOULTON Y STRELITSOVA, 1978)		RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA RADIAL HACIA UN POZO (RUSHTON Y REDSHAW, 1979; RATHOD Y RUSHTON, 1984)							
		Tf m/s	Ta m/s	UNIDAD	Khe m/s	b m	Te m ² /s	Sc	DRF	DRCCM	FPC
8	Qb-Qall	0.0017	0.0065	Qb-Qall	0.00058	80	0.046	0.0033	500		3
170	Qb-Qall	0.026	0.1	Qb-Qall	0.0017	183	0.031	0.003	500		1
**SUR-1	Qb-Qall			Qb-Qall	0.00023	250	0.058	0.004	600		1
**328-CD	Qb-Qall			Qb-Qall	0.000081	215	0.017	0.003	500		1
**P-2	Qall			Qall	0.000023	278	0.0064	0.0007	1000		1
	Tpal			Tpal	0.000058	132	0.0077				
	Tpv			Tpv	0.000038	100	0.038	0.001			1
	Tpw			Tpw	0.000013	100	0.013	0.001		123	

Qall SEDIMENTOS ALUVIO-LACUSTRES, CUATERNARIO

Qb ROCAS BASALTICAS, CUATERNARIO

Tpal DEPOSITOS ALUVIALES Y PIROCLASTICOS, PLEOCENO SUPERIOR

Tpv ROCAS ARGESITICAS, PLEOCENO SUPERIOR

**SUR-1 FUENZA DE BOMBEO A CUALDA VARIABLE (AFORO)

Tf TRANSMISIVIDAD DE FRACTURAS

Ta TRANSMISIVIDAD DE MARIJE

Khe CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Ta TRANSMISIVIDAD EQUIVALENTE

DRF DISTANCIA RADIAL A LA FRONTERA DE FLUJO EXTERIOR

DRCCM DISTANCIA RADIAL DONDE CAMBIAN LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS

FPC FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA HIDRAULICA EN EL POZO DE BOMBEO

TABLA 4.2.6 RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO SUPERIOR.

UNIDAD	RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO DE FLUJO DE AGUA RADIAL HACIA UN POZO								RESULTADOS DE LOS METODOS ESTANDAR			
	S_0 m/s G	S_y M	S_p P	S_c M	S_v P	S_r M	T_e m ² /s G	M	T m ² /s G	M	K m/s G	M
Qall	0.00008	31	0.17	18	0.0021	18			0.0051	7	0.000037	7
Qb	0.00069	16	0.08	12	0.0032	3	0.038	13	*0.02	6		
Tqp	0.000017	21	0.07	15	0.0009	6			0.00083	6	8.0E-06	6
Tpv	0.000014	8	0.06	3	0.00024	5						
Tpal	0.000027	7			0.0003	4						

Qall: SEDIMENTOS ALUVIO-LACUSTRES DEL CUATERNARIO
 Qb: ROCAS BASALTICAS DEL CUATERNARIO
 Tqp: DEPOSITOS PIROCLASTICOS DEL PLIO-CUATERNARIO
 Tqv: ROCAS VOLCANICAS ANESITICAS DEL PLIO-CUATERNARIO SUPERIOR
 Tpal: DEPOSITOS ALUVIALES Y PIROCLASTICOS DEL PLIOCENO SUPERIOR

G: MEDIA GEOMETRICA
 P: PROMEDIO
 M: NUMERO DE RESULTADOS
 T_e: TRANSMISIVIDAD EQUIVALENTE
 *2E-2 TRANSMISIVIDAD TOTAL T=2E*2_e

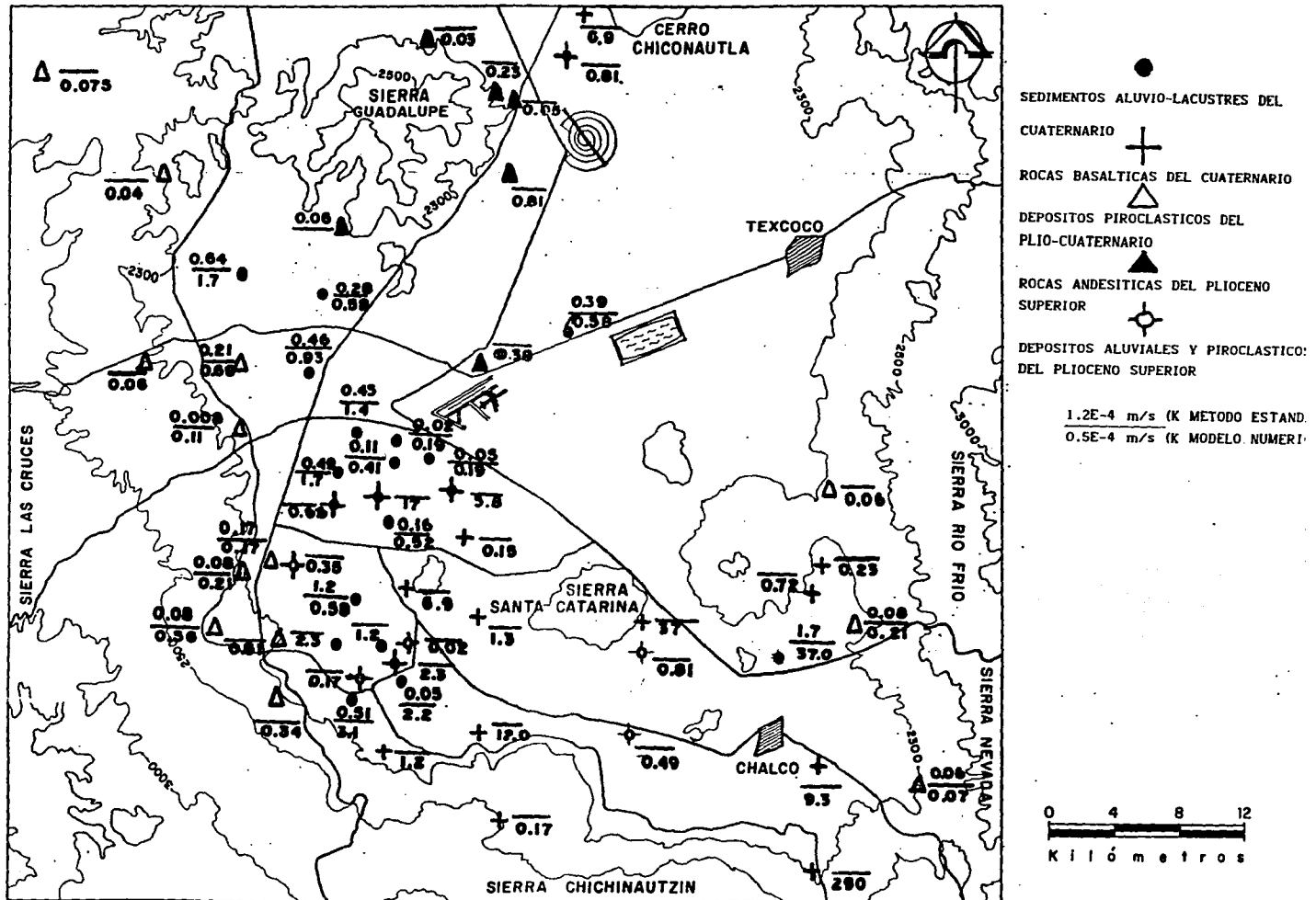


Figura 4.2.1 Conductividad hidráulica del Acuífero Superior evaluada de pruebas de bombeo con métodos estándar y modelación numérica de flujo de agua radial hacia un pozo.

4.2.5 y 4.2.6, y en el Anexo 2. El método estándar de Boulton (1954), se aplicó para condiciones de acuífero libre y el de Walton (1962 en: Kruseman y Ridder, 1990) para condiciones de acuífero semiconfinado. El método de Boulton y Streltsova (1978), se empleó cuando la respuesta hidráulica del acuífero bajo condición libre y semiconfinado, fue la de un medio fracturado de doble porosidad. En situaciones de medio granular, la K se calculó de los valores de T. Para esto, el espesor saturado en condiciones libres, se consideró desde el nivel estático hasta la base del tramo ranurado en el pozo de bombeo. En condiciones de semiconfinamiento, el espesor saturado, se obtuvo desde la base del acuitardo superior hasta la base del tramo ranurado en el pozo de bombeo.

En situaciones de medio fracturado de doble porosidad, la conductividad hidráulica de las fracturas (K_f), no se pueden derivar de los valores de la transmisividad de las fracturas (T_f), ya que el espesor de explotación en el pozo de bombeo, no es igual al espesor efectivo de las fracturas. Por otra parte, desde que la mayoría de las pruebas de bombeo, se realizaron sin pozo de observación, la curva de abatimiento en el pozo de bombeo, no permite estimar el rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c).

La conductividad hidráulica en los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, varía entre 4.9×10^{-6} y 1.7×10^{-4} m/s, con una media geométrica de 3.7×10^{-5} m/s. Los valores más altos de K en esta unidad sedimentaria, tienden a presentarse en la margen poniente de la planicie de la Ciudad de México y los más bajos hacia el interior de las planicies lacustres (Figura 4.2.1). Los valores de la K en los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario, son menores y varían entre 3.7×10^{-6} y 2.1×10^{-5} m/s, con una media geométrica de 8×10^{-6} m/s. La distribución de los valores de la K en esta unidad piroclástica, no muestra una tendencia espacial (Figura 4.2.1), si no más bien, indica una alta heterogeneidad.

La transmisividad de las fracturas (T_f) en las rocas basálticas del Cuaternario, varían entre 8.6×10^{-5} y 0.14 m²/s, y su transmisividad de la matriz (T_m), es del orden de 6.0×10^{-3} m/s (media geométrica). El amplio rango de la T_f en las rocas basálticas, es indicativo de una alta heterogeneidad impuesta por el fracturamiento observado en esta unidad. En las situaciones geológicas en donde el pozo de bombeo extrae el agua de las rocas basálticas y de otra unidad granular, ya sea de los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario y depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior (pozos 19-PER, 193, 8 y 170), los valores de la T_f , son del mismo orden que los mencionados anteriormente. Sin embargo los valores de la T_m , varían más ampliamente entre 3.9×10^{-3} y 0.1 m²/s. Lo anterior de alguna manera, refleja el alto grado de heterogeneidad en las unidades granulares.

5.0 MODELACIÓN NUMÉRICA DE PRUEBAS DE BOMBEO.

Las pruebas de bombeo a caudal constante (DGCOH, 1983, 1992b, 1993; Huizar, 1989) y variable (aforos) (GAVM, 1989; CEAS, 1989) , se simularon numéricamente con la aplicación de un modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo (Rushton y Redshaw, 1979; Rathod y Rushton, 1984). En general, este modelo resuelve la siguiente ecuación diferencial que describe el flujo radial de agua hacia un pozo, incluyendo componentes verticales de flujo (Jones y Rushton, 1981):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(bK_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{b}{r} \left(K_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + bK_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (5.1)$$

donde

r ordenada radial

z ordenada vertical

b espesor saturado

K_r , K_z conductividad hidráulica radial y vertical

s abatimiento

S coeficiente de almacenamiento

t tiempo

La discretización del campo de flujo de agua radial hacia un pozo, se realiza por medio de una malla radial, cuyos intervalos, se incrementan logaritmicamente desde el centro del pozo de bombeo hasta la frontera lateral. Los abatimientos son calculados en cada malla en la superficie freática (s_r) y a una distancia de 0.25 del espesor saturado (s_b), arriba de la base del acuífero. Los cálculos de los abatimientos, son realizados a intervalos de tiempo $t+\Delta t$. La aproximación de la diferencia finita de la ecuación 5.1, permite escribir las siguientes expresiones para los abatimientos a los tiempos $t+\Delta t$, los cuales dependen de los valores previos del abatimiento al tiempo t .

$$\left(\frac{s_{rn+1} - s_{rn}}{HU_n} + \frac{s_{rn-1} - s_{rn}}{HU_{n-1}} + \frac{s_{bn} - s_{rn}}{V_n} \right)_{t+\Delta t} = \frac{s_{rn,t+\Delta t} - s_{rn,t}}{T_n} + q_n^2 \quad (5.2)$$

$$\left(\frac{s_{bn+1} - s_{bn}}{HL_n} + \frac{s_{bn-1} - s_{bn}}{HL_{n-1}} + \frac{s_{tn} - s_{bn}}{V_n} \right)_{t+\Delta t} = 0 \quad (5.3)$$

donde:

r ordenada radial

t tiempo

Δt intervalo de tiempo en el cual ocurre el abatimiento

q recarga por unidad de área

s_{n-1} , s_n , s_{n+1} abatimiento en los nodos n , $n-1$ y $n+1$

$HU_n = HL_n$ resistencia hidráulica radial en el nodo n

$HU_{n-1} = HL_{n-1}$ resistencia hidráulica radial en el nodo $n-1$

V_n resistencia hidráulica vertical en el nodo n

T_n tiempo/coeficiente de almacenamiento

El método de diferencias finitas conduce a una serie de ecuaciones simultáneas, que son eficientemente resueltas por simples matrices. Otros términos incluidos en estas ecuaciones, están considerados como equivalentes a resistencia hidráulica de la siguiente forma:

$$HU_n = HL_n = \frac{2\Delta a^2}{bK_r}; a = \log r$$

$$V_n = \frac{0.4875b}{K_z r_n^2}; T_n = \frac{\Delta t}{Sr_n^2}$$

donde:

$HU_n = HL_n$ resistencia hidráulica radial

V_n resistencia hidráulica vertical

a incremento logarítmico radial

r ordenada radial

b espesor saturado

Δt intervalo de tiempo en el cual ocurre el abatimiento

K_r , K_z conductividad hidráulica radial y vertical

T_n tiempo/coeficiente de almacenamiento

S coeficiente de almacenamiento

Este modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo, permite incorporar un acuífero libre y dos acuíferos confinados separados por dos capas confinantes (Figura 5.1). Tomando en cuenta este esquema, las variables del archivo de entrada para el modelo, se presentan en la tabla 5.1.

5.1 Implementación del Modelo

La implementación de las pruebas de bombeo simuladas a caudal constante y variable, se presenta en los archivos de entrada para el modelo (Anexo 2). En las pruebas de bombeo analizadas bajo condiciones de acuífero superior libre, definidas anteriormente con el análisis de las curvas de abatimiento, se tomó al nivel estático en el pozo de bombeo, como el nivel de referencia (RWL), de las profundidades a la cima y base de cada capa simulada. Bajo condiciones de acuífero semiconfinado, determinadas previamente con el análisis de las curvas de abatimiento, se consideró al nivel freático en el acuitardo superior, como el nivel de referencia (RWL). El nivel freático en este acuitardo, se obtuvo de las estaciones multipiezométricas para el año más recientemente reportado de 1986 (GAVM, 1953 a 1986).

Cuando las pruebas provinieron de pozos de bombeo parcialmente penetrantes en una sola unidad, la mayoría de los casos, se dividió el acuífero en dos capas con propiedades hidráulicas iguales y con extracción en la capa permeable superior. Esta disposición permitió considerar el efecto del flujo ascendente en las cercanías del pozo de bombeo. También se dividió el acuífero en dos capas, cuando el pozo de bombeo extrae el agua de dos unidades distintas (pozos 17-PER, 9-PER, 75, 197, 19-PER, P-7, 224CP, 3-PER y 14 PER). Tomando en cuenta el carácter estratificado de las unidades que forman al acuífero superior, todas las pruebas se reinterpretaron con una conductividad hidráulica horizontal (K_h) mayor que la conductividad hidráulica vertical K_v en un orden de magnitud. Pruebas de laboratorio con permeámetros en depósitos aluviales y lacustres estratificados, han mostrado que la K_h es más grande que la K_v hasta en un orden de magnitud (Freeze y Cherry, 1979).

En el caso de acuífero semiconfinado, se mantuvo constante la conductividad hidráulica vertical (K_v) del acuitardo superior, asumiendo que todo el acuitardo sobreyacente es arcilla, con un valor de 5×10^{-9} m/s, el cual se obtuvo con pruebas de consolidación en

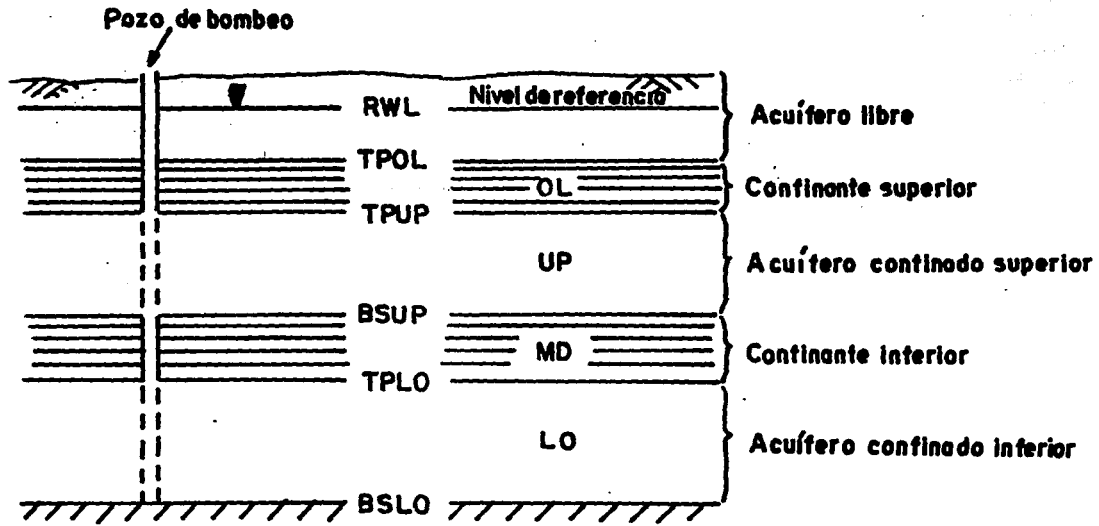


Figura 5.1 Esquema hidrogeológico que representa el modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo (Rushton y Redshaw, 1979; Rathod y Rushton, 1984)

Tabla 5.1 Archivo de datos de entrada para el modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo.

```

0.12,1000.0          RWELL, RMAX
0.0,0.0,14.73,176.37,176.37,364.97 RWL, TPOL, DSUP, TPLO, DSLO
2                    JFIX
0.07,0.0            PERMVOL, RCHI
15.0,1.5,0.001,0.1  PERMRUP, PERMVUP, SCONUP, SUNCNUP
0.5,5,500.0,0.001,0.2 J, PERMRUP, PERMVUP, SCONUP, SUNCNUP; I=0
                    TERMINA LA INTRODUCCION DE VALORES
0.0                 PERMYD
0,0,0               J,PERMYD; I=0 TERMINA LA INTRODUCCION DE
                    VALORES
1.5,0.15,0.0005    PERMRLO, PERMYLO, SCONLO
0.2,0.0,26,0.001  J, PERMRLO, PERMYLO, SCONLO; I=0 TERMINA
                    LA INTRODUCCION DE VALORES
-2.0,10.0,10.0    ALPHA, WLOSSUP, WLOSSLO
3                    IWELL
3                    NOBS( )
20.0,200.0,400.0  DOBS
3                    LEVPRN
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0 TP( )
8865.5,3.0         QPUMP, TSTOP
0.0,3.3333        QPUMP, TSTOP; QPUMP=0 INDICA ETAPA DE RECU
                    PERACION
-10.0,3.333       QPUMP, TSTOP; VALOR NEGATIVO DE QPUMP SIGNI
                    FICA FIN DE LA SIMULACION

RWELL=RADIO EFECTIVO DE POZO (M)
RMAX=RADIO MAXIMO O DISTANCIA A LA FRONTERA DE FLUJO (M)
RWL=0.0; INDICA QUE LAS PROFUNDIDADES DE LAS CAPAS CONFINANTES Y ACUIFERAS
SE REFIEREN AL NIVEL FREATICO
TPOL=PROFUNDIDAD A LA CIMA DE LA CAPA CONFINANTE SUPERIOR (M)
TPUP=PROFUNDIDAD A LA BASE DE LA CAPA CONFINANTE SUPERIOR O CIMA DE LA CAPA
ACUIFERA SUPERIOR (M)
BSUP=PROFUNDIDAD A LA BASE DE LA CAPA ACUIFERA SUPERIOR O CIMA DE LA CAPA
CONFINANTE INFERIOR (M)
TPLO=PROFUNDIDAD A LA BASE DE LA CAPA CONFINANTE INFERIOR O CIMA DE LA CAPA
ACUIFERA INFERIOR (M)
DSLO=PROFUNDIDAD A LA BASE DE LA CAPA ACUIFERA INFERIOR BASE IMPERMEABLE (M)
JFIX=1 (FRONTERA DE RECARGA), JFIX=2 (FRONTERA DE NO FLUJO)
PERMVOL=CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA VERTICAL (KV) PARA LA CAPA CONFINANTE
SUPERIOR (M/DIA)
RCHI=RECARGA (M/DIA)
PERMRUP=CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA HORIZONTAL (KH) PARA LA CAPA ACUIFERA
SUPERIOR (M/DIA)
PERMVUP=KV PARA LA CAPA ACUIFERA SUPERIOR (M/DIA)
SCONUP=COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO CONFINADO (S) PARA LA CAPA ACUIFERA
SUPERIOR
SUNCNUP=COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO LIBRE (SY) PARA LA CAPA ACUIFERA SUPERIOR
PERMYD=KV PARA LA CAPA CONFINANTE INFERIOR (M/DIA)
PERMRLO=KN PARA LA CAPA ACUIFERA INFERIOR (M/DIA)
PERMYLO=KV PARA LA CAPA ACUIFERA INFERIOR (M/DIA)
SCONLO=S PARA LA CAPA ACUIFERA INFERIOR
ALPHA=VALOR NEGATIVO (NO SE CONSIDERA EL INDICE DE RETRASO EN ACUIFERO LIBRE)
ALPHA=VALOR POSITIVO (VALOR DEL INDICE DE RETRASO EN ACUIFERO LIBRE)
WLOSSUP=FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA EN EL POZO BOMBEO PARA LA CAPA
ACUIFERA SUPERIOR; PARA EL PRIMER NODO LAS PERDIDAS SON=PERMRUP/WLOSSUP
(M/DIA)
WLOSSLO=FACTOR DE PERDIDAS DE CARGA EN EL POZO BOMBEO PARA LA CAPA ACUIFER
INFERIOR; PARA EL PRIMER NODO LAS PERDIDAS SON=PERMRLO/WLOSSLO (M/DIA)
IWELL=1 (EXTRACCION DE LA CAPA ACUIFERA INFERIOR)
IWELL=2 (EXTRACCION DE LA CAPA ACUIFERA SUPERIOR)
IWELL=3 (EXTRACCION DE LAS DOS CAPAS ACUIFERAS)
NOBS=NUMERO DE POZOS DE OBSERVACION
DOBS=DISTANCIA RADIAL A CADA POZO DE OBSERVACION (M)
LEVPRN=NUMERO DE TIEMPOS LOGARITMICOS PARA LA SIMULACION
TP( )=TIEMPOS LOGARITMICOS PARA IMPRESION DETALLADA; CUANDO LEVPRN=3, LOS
CEROS SON IGNORADOS.
QPUMP=GASTOS DE BOMBEO (M/DIA)
QPUMP=0; INDICA ETAPA DE RECUPERACION
TSTOP=TIEMPO DE BOMBEO O DE RECUPERACION (DIAS)
QPUMP=VALOR NEGATIVO; INDICA FIN DE LA SIMULACION.

```

núcleos recuperados en pozos exploratorios de hasta 100 m de profundidad (Marsal y Mazari, 1959). Este valor de la $K'v$ empleado, es del mismo orden de magnitud que el reportado con pruebas de recuperación en piezómetros hincados hasta profundidades del orden de 25 m (Rudolph, et al., 1991; Pitre, 1994). Para obtener la $K'v$ del acuitardo superior con cierta confiabilidad por medio de este tipo de simulación numérica, es necesario contar con pozos de observación en el mismo acuitardo y/o pruebas de bombeo de más larga duración.

Las pruebas de bombeo en los medios fracturados de las rocas basálticas del Cuaternario (pozos: SA-1, TLA-1, 12SC, 53E, 322CO, 86E, 92E, SL-15, 1SC, N6, 125'y 155E) y en las rocas andesíticas del Plioceno superior (pozos: 302CO, 301CO, 334CO), se simularon con un espesor saturado igual al espesor de explotación en el pozo de bombeo. De esta manera las características hidráulicas resultantes (K , S_y , S_c) para estas rocas fracturadas, se consideran como equivalentes al de un medio poroso granular. El mismo procedimiento, se aplicó para aquellas pruebas en donde el pozo de bombeo extrae el agua de las rocas basálticas fracturadas y de otra unidad granular (pozos: SUR-1, 328CO, 8, 170, 193 y PER-19).

La modelación de las pruebas en donde el pozo de bombeo, se encuentra ranurado en su parte inferior, exclusivamente es una unidad inferior cubierta por otra unidad o en la base de una misma unidad (pozos MSC-13, MSC-1, PA-2, 334CO y P-2), el acuífero se dividió en dos capas con extracción en la capa inferior. Esto permitió considerar el efecto del flujo descendente de la capa superior.

El efecto de la pérdidas de carga hidráulica en el pozo de bombeo, se tomó en cuenta por medio de los factores de pérdida de carga (WLOSSUP y WLOSSLO), los cuales reconoce el modelo para reducir la conductividad hidráulica en las cercanías del pozo. Las pruebas de bombeo a caudal variable (pozos: SA-1, SUR-1, MSC-1, 203CP, 251CP, 302CO, 301CO, 334CO, 322CO, 328CO, SUR-19, P-2, P-7 224CP y SUR-12), se modelaron variando el gasto de extracción a tiempos acumulativos correspondientes.

5.2 Características Hidráulicas del Acuífero Superior

Las pruebas de bombeo simuladas numéricamente que representan las condiciones hidrogeológicas de campo y aspectos constructivos de los pozos de bombeo, más relevantes que influyen en el comportamiento de los abatimientos, se presentan en las figuras 5.2.1,

5.2.2, 5.2.3 y 5.2.4. En el Anexo 2 se presenta el resto de las pruebas de bombeo modeladas y en la figura 4.1.1 su localización.

En el mismo anexo también se muestra para cada prueba simulada, el marco hidrogeológico, los datos de entrada para el modelo, la comparación de los datos de campo con los resultados del modelo y el mecanismo de flujo local deducido con los resultados del modelo. En las tablas 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4 y 4.2.5, se presentan los valores de la conductividad hidráulica horizontal (K_h), rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c), que se obtuvieron con el modelo numérico para cada unidad hidrogeológica que constituye el acuífero superior, y en la Tabla 4.2.6, se resumen estas características hidráulicas.

Con el valor de $K'_v=5 \times 10^{-9}$ m/s empleado para el acuitardo superior, se obtuvo, en todas las pruebas bajo condiciones de acuífero semiconfinado, un volumen total de filtración, del acuitardo hacia el acuífero subyacente, menor al 1 % del volumen total bombeado. Esto sugiere que para tiempos relativamente cortos de bombeo no existe un aporte importante del acuitardo. El modelo numérico de flujo radial, mostró gran sensibilidad a la K'_v , ya que al aumentarla en un orden de magnitud, el volumen total de filtración, aumentó hasta un cien por ciento. Por lo anterior es de suma importancia realizar pruebas de bombeo con pozos de observación en el acuitardo.

La K'_v que se le asignó al acuitardo superior, representa un valor mínimo, ya que este valor proviene de pruebas de laboratorio realizadas especialmente en muestras de arcillas contenidas en el mismo acuitardo (Marsal y Mazari, 1959). Sin embargo los horizontes de arenas y limos que comúnmente se intercalan con estas arcillas en las márgenes de las planicies lacustres, deben contribuir a escala regional en una K más grande para este acuitardo.

Los valores de K_h en los sedimentos aluvio-lacustre del Cuaternario, varían entre 1.2×10^{-6} y 3.5×10^{-4} m/s, mostrando una cierta tendencia regional a disminuir desde la margen poniente de la planicie de la Ciudad de México, hacia el centro de la planicie de Texcoco (Figura 4.2.1 y 5.2.5) y con una media geométrica de 8×10^{-5} m/s. Se estima que la misma variación de la K en estos sedimentos, debe presentarse desde la margen oriente de la planicies de Chalco y Texcoco. La heterogeneidad de estos sedimentos es reflejada por la variación de hasta dos ordenes de magnitud en su conductividad hidráulica.

0.18,300.0
 0.0,0.0,0.0,152.7,152.7,302.7
 2
 0.0,0.0
 5.0,0.5,0.005,0.2
 0.8,0.0,0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0.0
 5.0,0.5,0.005
 0.8,0.0,0.8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 18.0,180.0,250.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 1598.0,3.0
 0.0,3.42
 -10.0,3.42

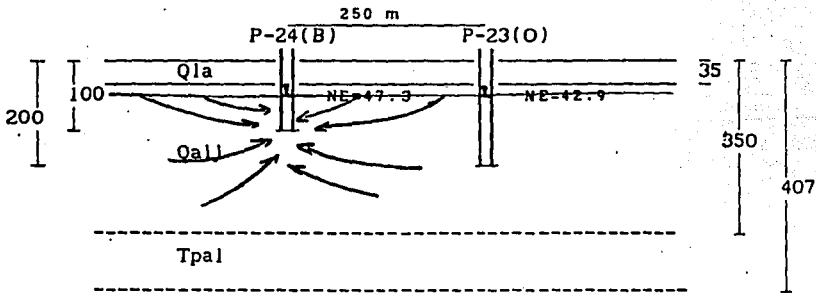
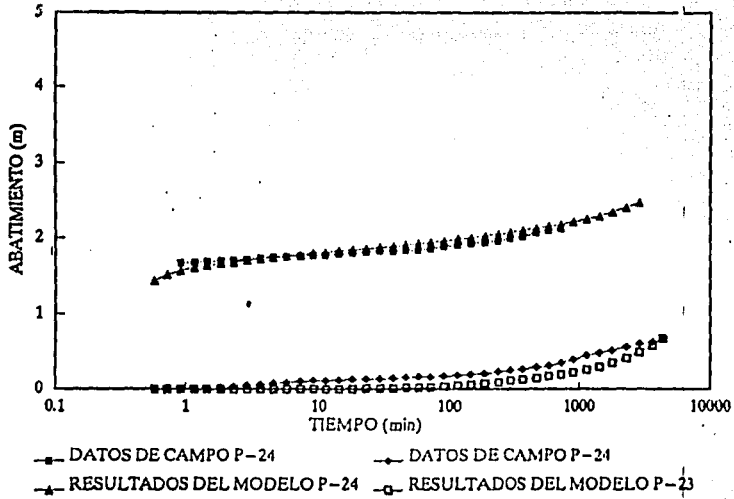
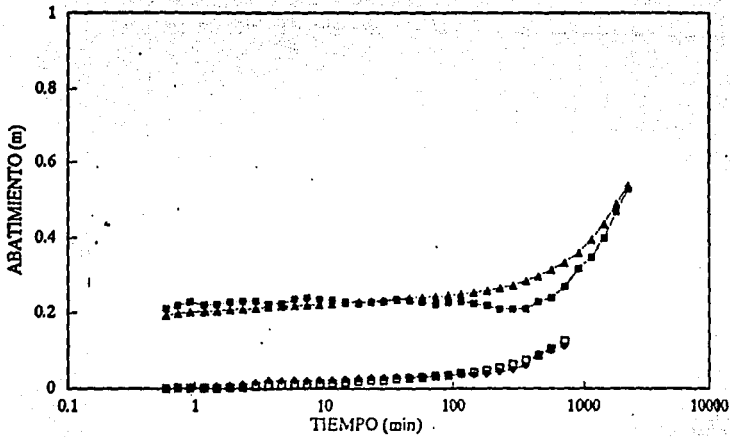


Figura 5.2.1 Prueba de bombeo a caudal constante modelada numéricamente que representa el comportamiento libre del Acuífero Superior en el medio granular de los Sedimentos Aluvio-Lacustres del Cuaternario (Qal1). Depósitos Lacustres del Cuaternario (Qa1) y Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior (Tpa1).

```

0.13,250.0
0.0,0.0,0.0,0.111.2,111.2,311.6
2
0.0,0.0
130.0,13.0,0.005,0.08
0.8,0.0,8.0,0.005,0.05
0.0
0.0,0
130.0,13.0,0.005
0.8,0.0,8.0,0.0001
1.0,1.0,1.0
2
3
19.2,75.0,100.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1857.0,3.0
0.0,3.58
-10.0,3.58

```



-■- DATOS DE CAMPO P-125' -▲- DATOS DE CAMPO P-125
 -□- RESULTADOS DEL MODELO P-125' -○- RESULTADOS DEL MODELO P-125

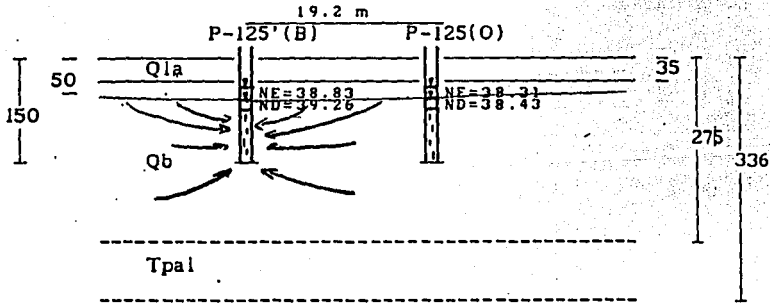
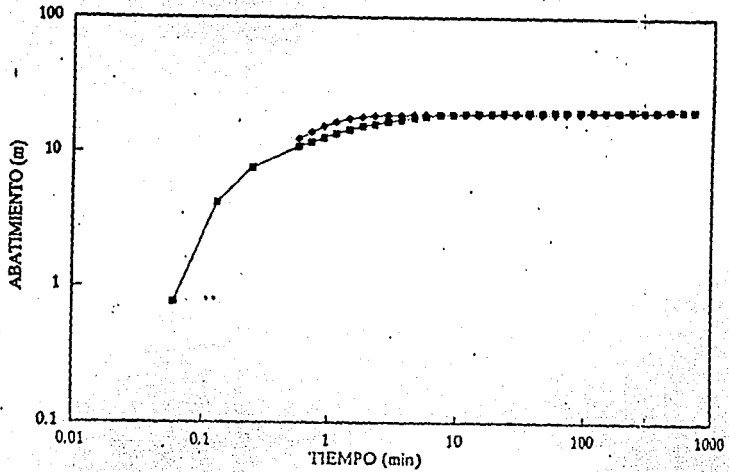


Figura 5.2.2 Prueba de bombeo a caudal constante modelada numéricamente bajo condiciones de Acuífero Superior libre en el medio fracturado de doble porosidad de las Rocas Basálticas del Cuaternario (Qb). Depósitos Lacustres del Cuaternario (Q1a), y Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior (Tpa1).

```

0.1,500.0
0.0,0.0,57.5,247.5,247.5,374.5
2
0.0005,0.0
1.0,0.1,0.00037,0.15
0.8,0.0,8,0.001,0.08
0.0
0.0,0
1.0,0.1,0.00037
0.8,0.0,8,0.001
-1.0,10.0,1.0
2
3
10.0,100.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1944,0,0.5
0.0,1.0
-10.0,1.0

```



← DATOS DE CAMPO P-190
← RESULTADOS DEL MODELO P-190

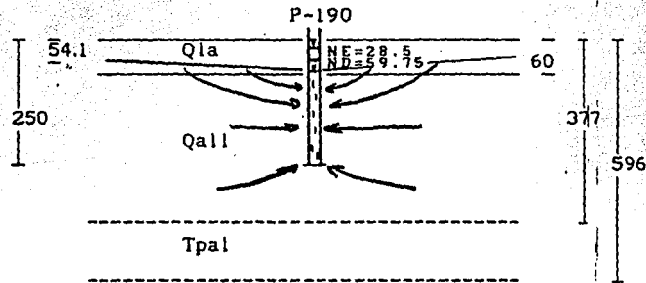


Figura 5.2.3 Prueba de bombeo a caudal constante simulada numéricamente que representa el comportamiento semiconfinado del Acuífero Superior en el medio granular de los Sedimentos Aluvio-Lacustres del Cuaternario (Qa1b). Depósitos Lacustres del Cuaternario (Q1a), y Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior (Tpa1).

```

0.2,500.0
0.0,0.0,0.0,132.3,132.3,232.2
2
0.0,0.0
1.5,0.15,0.005,0.1
0.8,0.0,0.8,0.001,0.08
0.0
0.0,0
1.5,0.15,0.005
0.8,0.0,0.8,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0,0.0
2592.0,0.25
3831.0,0.54
4424.0,0.92
5068.0,1.25
5930.0,1.54
6750.0,1.87
-10.0,1.87

```

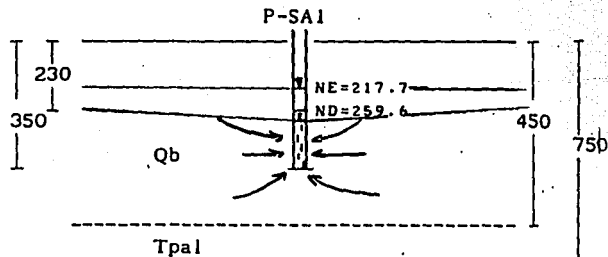
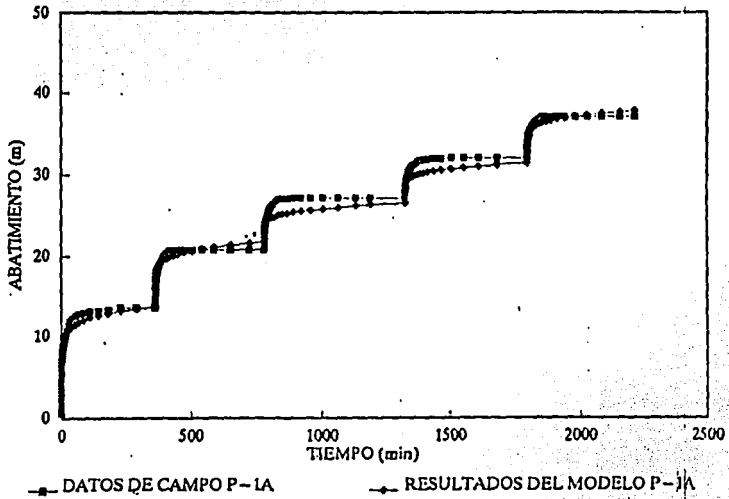


Figura 5.2.4 Prueba de bombeo a caudal variable (aforo) representativa modelada numéricamente bajo condiciones de Acuífero Superior libre en el medio fracturado de las Rocas Basálticas del Cuaternario (Qb). Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior (Tpal).

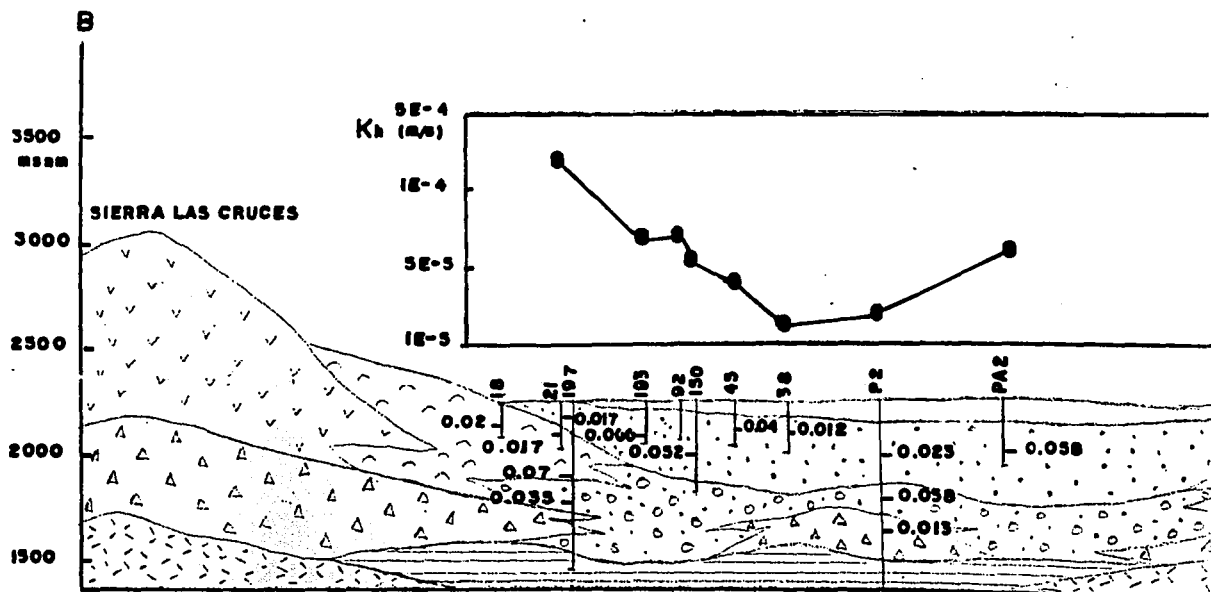
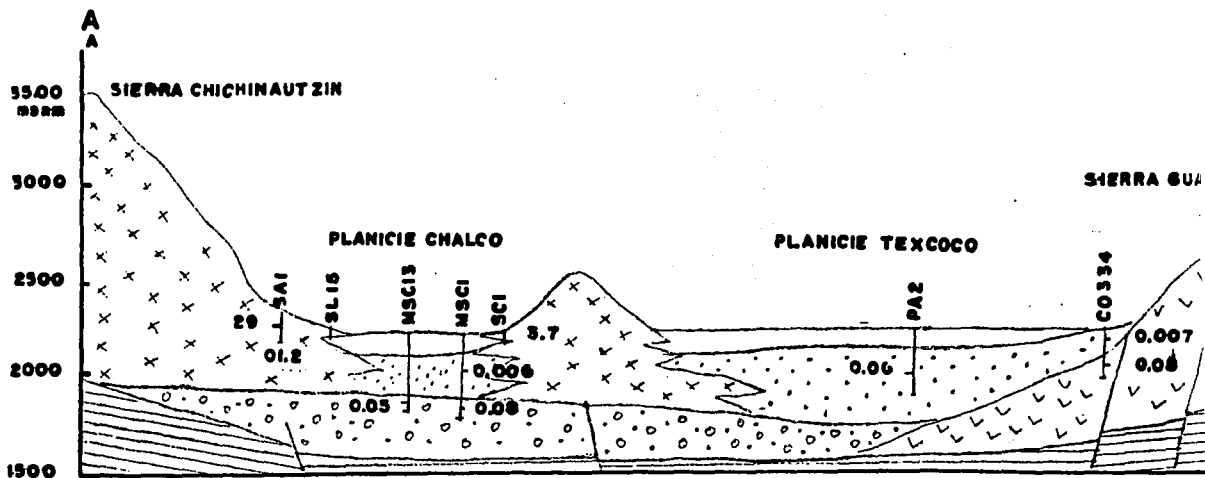
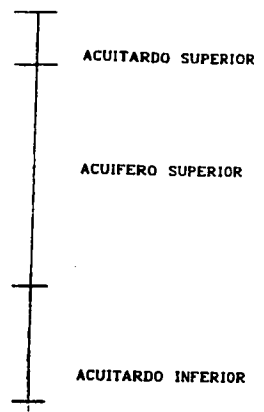
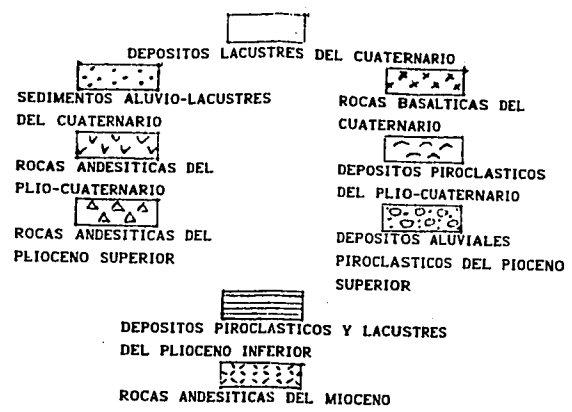
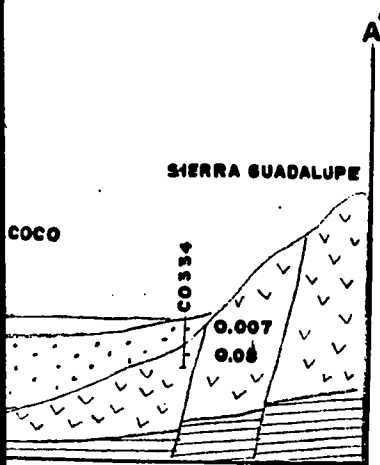
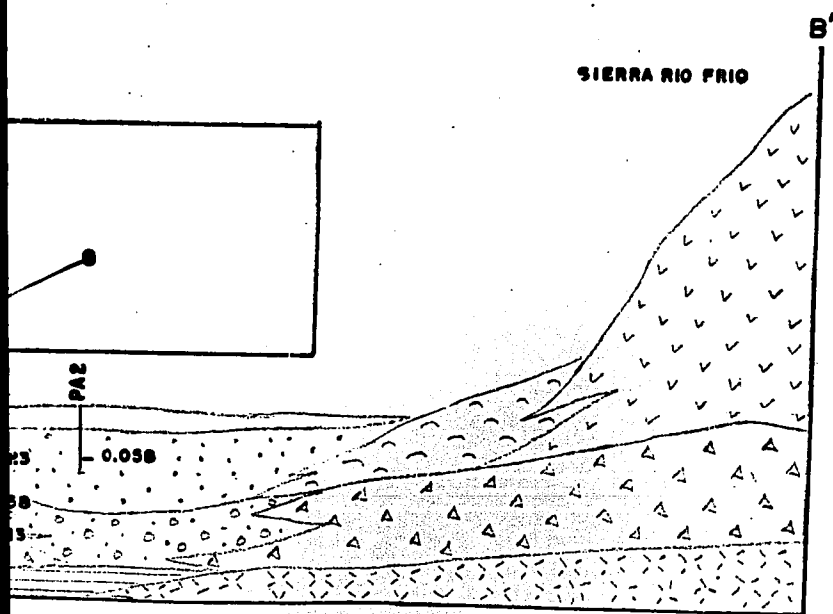


Figura 5.2.5 Secciones geológicas que muestran los valores de la conductividad hidráulica horizontal (K_h), obtenidos de la simulación numérica de pruebas de bombeo.



0.058E-3 m/s (Kh)



FALLA DE ORIGEN

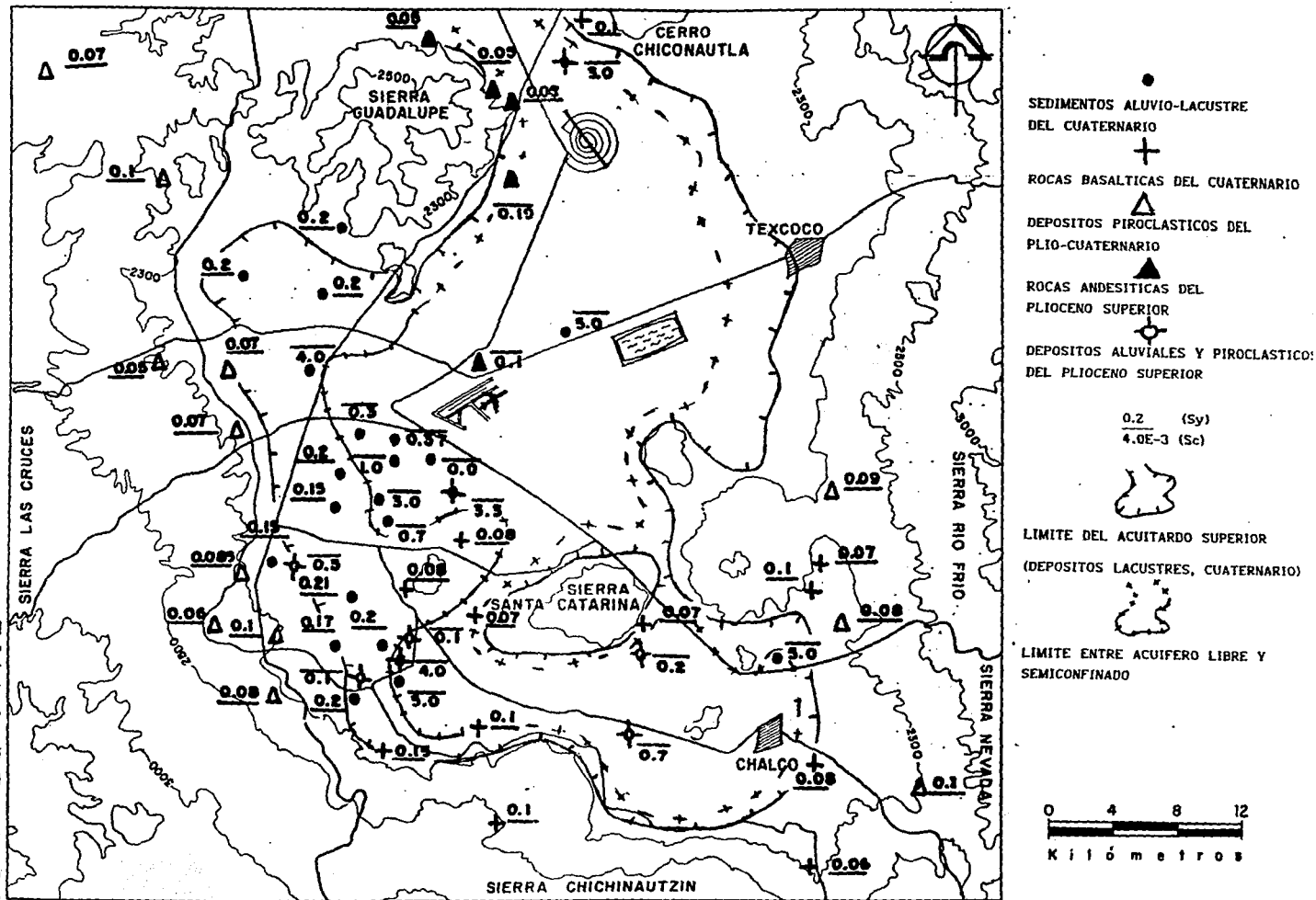


Figura 5.2.6 Rendimiento específico (Sy) y coeficiente de almacenamiento (Sc) del Acuífero Superior, obtenidos de la simulación numérica de pruebas de bombeo.

El rendimiento específico (S_y) en los sedimentos aluvio-lacustres, varía entre 0.1 y 0.21 con predominancia de valores altos, sin mostrar una tendencia espacial (Figura 5.2.6) y con un promedio de 0.17. Los valores del coeficiente de almacenamiento (S_c) para estos sedimentos, varía entre 0.0002 y 0.005, y su promedio es de 0.0021.

Para las rocas basálticas del Cuaternario, se obtuvieron valores de K_h que varían hasta tres ordenes de magnitud entre 1.2×10^{-5} y 2.9×10^{-2} m/s. Generalmente predominan los valores altos debido a sus estructuras volcánicas permeables. Los valores más bajos pueden indicar la presencia de piroclásticos y/o basaltos compactos. El amplio rango de variación de la conductividad hidráulica que presentan este tipo de rocas fracturadas, también ha sido reconocida por Freeze y Cherry (1979).

Las rocas basálticas presentan valores de S_y que varían entre 0.06 y 0.1, y valores de S_c que varían entre 0.003 y 0.005. Los valores de S_y se consideran bajos como consecuencia a que los basaltos tienen porosidades bajas debido a su carácter fracturado y/o autobrechado. Davis (1969), ha reconocido que los basaltos tienen porosidades bajas (0.7-0.11). Sin embargo, Freeze y Cherry (1979) reporta para basaltos fracturados porosidades de hasta 50 %.

Los valores de la K_h en los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario varían entre 1.2×10^{-6} y 8.1×10^{-5} m/s. Estos valores no muestran una tendencia espacial (Figura 4.2.1), pero manifiestan el carácter heterogéneo de estos depósitos piroclásticos. Sus valores de S_y que varían entre 0.01 y 0.1, sugieren que tiene bajas porosidades. Por otra parte sus valores de S_c varían entre 0.0007 y 0.001.

Las características hidráulicas de las rocas andesíticas del Plioceno superior, se obtuvieron principalmente con aforos en pozos perforados en el extremo oriente de la sierra Guadalupe. Sus valores de K_h que varía entre 2.6×10^{-6} y 8.1×10^{-5} m/s (Figura 4.2.1), con predominio de bajos valores, son el resultados de diferentes condiciones de fracturamiento. Como era de esperarse por su carácter fracturado tiene bajos valores de S_y que varían entre 0.05 y 0.08, y sus valores de S_c varían entre 0.0001 y 0.0007 (Figura 5.2.6).

De las pocas pruebas de bombeo simuladas con pozos que son totalmente penetrantes en el acuífero superior (pozos: PER-17, 197, PER-19 y P-7), se tiene que los valores de la K_h en los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, varían entre 1.7×10^{-6} y 5.8×10^{-5} m/s, y los valores del S_c varían entre 0.0001 y 0.0005. De la modelación numérica de la

prueba de aforo en el pozo MSC-13, el cual es parcialmente penetrante con extracción de agua en estos depósitos aluviales y piroclásticos, se obtuvo una $K_h=8.1 \times 10^{-5}$ y un $S_c=2 \times 10^{-4}$. Los resultados de las características hidráulicas en estos depósitos, confirman su carácter permeable, pero sin embargo, dan muestra de su baja capacidad de almacenamiento con respecto a los sedimentos aluvio-lacustres.

6.0 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La geología del subsuelo, indica que en las zonas de las planicies lacustres, es poco probable que el acuífero superior en explotación y acuífero inferior profundo, se encuentren conectados hidráulicamente por medio de sistemas de flujo ascendente, a través de la potente secuencia de 830 a 2,600 m de espesor, de rocas sedimentarias y volcánicas de baja permeabilidad que constituyen el acuitardo inferior. Otro argumento que apoya esta aseveración, es la marcada diferencia que existe en el contenido de sólidos totales disueltos (STD) en el agua subterránea de los dos acuíferos. Los STD en el acuífero superior varían entre 100 y 800 mg/l (DGCOH, 1994a), y en el acuífero inferior son del orden de 11,200 mg/l (PEMEX, 1987). Sin embargo existe la posibilidad de que localmente esto ocurra, a través de fallas normales y/o fracturas regionales profundas. Una evidencia de esto último, puede ser el manantial termal que surge en andesitas fracturadas del Plioceno superior en el cerro Peñón de los Baños, el cual se ubica en la traza de la zona de falla "Mixhuca" (Figura 3.2.2), y cuya agua contiene STD de aproximadamente 2,500 mg/l (Cortes, et al., 1989). En las zonas de recarga originada en los afloramientos de las andesitas fracturadas del Plio-Cuaternario, en las partes altas de las sierras Las Cruces y Río Frío Nevada, es más probable que parte del flujo de recarga, descienda a través de fallas profundas, hasta las profundidades ($\approx 2,500$ m) en donde el acuífero inferior se encuentra (Figura 3.1.4).

La permeabilidad relativa de las unidades geológicas determinada de acuerdo a sus características litológicas y estructurales, se manifiesta en los caudales de aforo en pozos productores (Proyecto Texoco, 1969; CEAS, 1989; GAVM, 1989; DGCOH, 1994c). Para caudales de extracción entre 30 y 70 l/s, en los depósitos piroclásticos y lacustres del Plioceno inferior y rocas volcánicas del Mioceno y Oligoceno, consideradas como de baja permeabilidad, se tiene caudales específicos del orden de 1 l/s/m (Figura 6.1). Para los mismos caudales de extracción en las unidades permeables que forman el acuífero superior, se tienen caudales específicos que varían entre 2 y 3500 l/s/m (Figura 6.1). De la misma forma para iguales caudales de extracción, en los depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario considerados como la unidad menos permeable del acuífero, se presentan los caudales específicos más bajos, a comparación de los que se tienen en la unidad más permeable por fracturamiento de las rocas basálticas del Cuaternario (Figura 6.1).

La mayor parte de los valores de la conductividad hidráulica (K) que se obtuvieron con los métodos estándar de interpretación de pruebas de bombeo a caudal constante en medios porosos granulares, y los de la conductividad hidráulica horizontal (K_h) resultantes de la

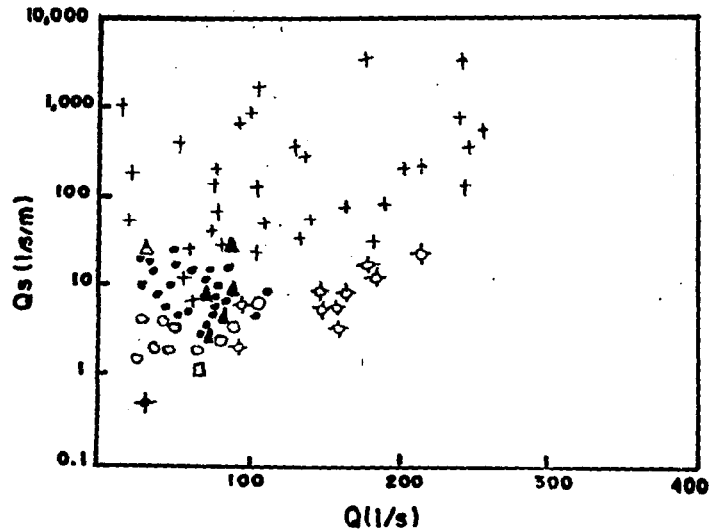


Figura 6.1 Relación caudal de extracción (Q) vs caudal específico (Qs).

simulación numérica de las mismas pruebas de bombeo; en general son del mismo orden de magnitud (Tablas 4.2.6). Excepto los valores de algunas pruebas modeladas numéricamente con pérdidas de carga hidráulica en el pozo de bombeo (pozos 92B, 141, 93, PER-14, 190, PER-17, 45, 118, 12, 86E, y 8), los cuales resultaron ser en gran parte un orden de magnitud mayor. Considerando que casi todos los pozos de extracción en las pruebas de bombeo, son parcialmente penetrantes, se interpreta que las pérdidas de carga son probablemente causadas por un mal desarrollo y/o incrustaciones en el pozo. El efecto de flujo ascendente por pozo de bombeo parcialmente penetrante, no influye significativamente en las pérdidas de carga.

La magnitud de los valores de la K resultantes de los dos tipos de técnicas de interpretación, es consistente con la naturaleza porosa de las unidades geológicas que forman el acuífero superior. Para los depósitos piroclásticos compactos y mal clasificados, la media geométrica de la K resultante de los métodos estándar es de 8×10^{-6} m/s, y la resultante de la simulación numérica es de 1.7×10^{-5} m/s. Para los sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, se obtuvo un valor de la media geométrica de la K = 3.7×10^{-5} m/s por los métodos estándar y por la simulación numérica igual a 8×10^{-5} m/s. Por otra parte para las rocas basálticas fracturadas y autobrechadas, la media geométrica de la K_h que se obtuvo de la modelación numérica es de 4.9×10^{-9} m/s (Tabla 4.2.6). Un nivel freático profundo aproximadamente a 150 m en pozos recientemente perforados en el flanco norte de la zona de recarga de la sierra Chichinautzin (DGCOH, 1994c), es una clara manifestación de la alta K de las rocas basálticas.

El carácter permeable de los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, es corroborado por los valores de K_h , cuya media geométrica es de 2.7×10^{-5} m/s, obtenidos por la modelación numérica de pruebas de bombeo con pozos que extraen el agua de esta unidad.

La distribución espacial de los valores de K que resultaron de las dos técnicas de evaluación de pruebas de bombeo, muestran en los sedimentos aluvio-lacustres, una tendencia a decrecer desde la márgenes de las planicies lacustres, hacia el interior de las mismas planicies (figuras 4.2.1, 5.2.5). Esta tendencia espacial es una consecuencia de la disminución en el mismo sentido, del tamaño de grano en la secuencia aluvio-lacustre. Los cortes litológicos de los pozos productores, muestran preferentemente gravas y arenas fluviales en la margen poniente de la planicie de la Ciudad de México, y arenas con arcillas lacustres en el interior de la planicie de Texcoco (Figura 3.1.5). Lo anterior confirma el origen fluvial y lacustre de esta secuencia sedimentaria. Sin embargo en las unidades de los depósitos piroclásticos y

rocas basálticas, no muestran una tendencia espacial, si no más bien dan prueba de su heterogeneidad por cambios granulométricos y fracturamiento.

El valor de la media geométrica de transmisividad total ($T=T_f+T_m=0.02\text{ m}^2/\text{s}$) que se estimó con los valores de la transmisividad de las fracturas (T_f) y de la matriz (T_m), las cuales resultaron de la aplicación del método de Boulton y Strestlova (1978) para pruebas de bombeo en el medio fracturado de doble porosidad de las rocas basálticas, es del mismo orden de magnitud que la media geométrica de la T ($0.038\text{ m}^2/\text{s}$) obtenida de las simulaciones numéricas de las mismas pruebas de bombeo (Tabla 4.2.6). Esto sugiere que en cierta medida los valores de la conductividad hidráulica obtenidos en la misma simulación numérica, son representativos de este medio fracturado de doble porosidad.

El funcionamiento libre y semiconfinado del acuífero superior, determinado con la comparación de sus niveles piezométricos con los espesores de acuitardo superior (Figura 3.2.3), y con base en la configuración de las curvas de abatimiento vs tiempo en las pruebas de bombeo a caudal constante (Figura 4.1.2), es comprobado con el rango y distribución de los valores del rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c), que resultaron de las simulaciones numéricas de pruebas de bombeo sin información de pozos de observación. En las lomas del oriente y poniente, en donde el acuífero es libre en el medio granular de los depósitos piroclásticos, el valor promedio del S_y es de 0.07. Para las condiciones de acuífero libre en los medios fracturados de doble porosidad, se obtuvo un valor promedio del $S_y=0.06$ para las rocas basálticas y de 0.08 para las rocas andesíticas (Tabla 4.2.6). En situaciones de acuífero libre en los sedimentos aluvio-lacustres, y en donde el nivel piezométrico se encuentra por debajo la base del acuitardo superior, el valor promedio del S_y es de 0.17. Los valores de S_y , también son consistente con la naturaleza del medio poroso, indicando altas porosidades en los sedimentos aluvio-lacustres y bajas porosidades en los medios fracturados. En las zonas de acuífero semiconfinado, se obtuvieron valores del coeficientes de almacenamiento ($2.4\times 10^{-5}<S_c<2.1\times 10^{-3}$) aceptables que reflejan esta condición (Figura 5.2.6).

7.0 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

7.1 Conclusiones

El modelo hidrogeológico de la parte meridional de la Cuenca de México, consiste de un acuífero superior en explotación separado hidráulicamente de un acuífero inferior profundo, por un potente acuitardo inferior de 830 a 2600 m de espesor. El acuífero superior es limitado en su cima por un acuitardo superior de espesor máximo de 120 m.

Las unidades geológicas que integran al acuífero superior son: *a)* sedimentos aluvio-lacustres del Cuaternario, *b)* rocas basálticas del Cuaternario, *c)* depósitos piroclásticos del Plio-Cuaternario, *d)* rocas andesíticas del Plio-Cuaternario, *e)* depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior y *f)* rocas andesíticas del Plioceno superior. El acuífero inferior que contiene agua salina (STD=11,200 mg/l), está formado por rocas carbonatadas del Cretácico que se encuentran entre 2,000 y 3,900 m de profundidad en la zona de las planicies lacustres.

El acuitardo superior lo forman depósitos lacustres de Cuaternario y al acuitardo inferior lo integran las siguientes unidades geológicas de baja permeabilidad: *a)* depósitos piroclásticos y lacustres del Plioceno inferior, *b)* rocas andesíticas del Mioceno, *c)* rocas basálticas y riolíticas del Oligoceno, *d)* Formación Balsas y *e)* Formación Mezcala.

El análisis de las pruebas de bombeo a caudal constante, indican que el acuífero superior en las zonas montañosas, se comporta como libre en el medio granular de los depósitos piroclásticos y fracturado e inclusive de doble porosidad de las rocas basálticas. También en las márgenes oriente, poniente y norte, en donde su nivel piezométrico se encuentra por debajo el acuitardo superior, se comporta como libre en los sedimentos aluvio-lacustres. En el interior de las planicies lacustres, es semiconfinado por el mismo acuitardo.

El comportamiento hidráulico del acuífero superior en las márgenes oriente, poniente de las planicies lacustres, ha sido transformado de semiconfinado a libre, por efecto de la concentración del bombeo y debido a la limitada transmisión de la recarga a través de los depósitos piroclásticos considerados como la unidad menos permeable del acuífero.

El funcionamiento hidráulico del acuífero superior, determinado con base en el análisis de pruebas de bombeo a caudal constante, es consistente con la zonificación de acuífero libre y semiconfinado, que se realizó con datos de profundidad al nivel piezométrico del acuífero y espesores del acuitardo superior.

Las investigaciones de la conductividad hidráulica en el acuífero superior, indican que en general los resultados de los métodos estándar de evaluación y simulación numérica de las pruebas de bombeo a caudal constante, son del mismo orden de magnitud. Excepto en algunas pruebas en donde el pozo de extracción presentan pérdidas de carga hidráulica. En tales situaciones los resultados de los métodos estándar son subestimados.

La modelación numérica de las pruebas de bombeo, también sugiere que las pérdidas de carga hidráulica en el pozos de extracción, son probablemente causadas por un mal desarrollo e incrustaciones en el pozo. El flujo ascendente en las cercanías del pozo de bombeo, causado por su penetración parcial, no influye significativamente en las pérdidas de carga.

El modelo numérico de flujo de agua radial hacia un pozo, aplicado para evaluar las pruebas de bombeo a caudal constante y variable (aforos), igualmente permitió obtener valores confiables del rendimiento específico (S_y) y coeficiente de almacenamiento (S_c), sin información de pozos de observación, situación que se presentó en casi todas las pruebas.

Los resultados de la simulación numérica de pruebas de bombeo en los medios fracturados y de doble porosidad de las rocas basálticas y andesíticas del acuífero superior, indican que las características hidráulicas (K , S_y , S_c) obtenidas de esta forma, son equivalentes a las de un medio poroso granular.

El rango de valores de la conductividad hidráulica obtenidos de pruebas de bombeo, que se evaluaron con métodos estándar ($8 \times 10^{-6} < K < 3.7 \times 10^{-5}$ m/s) y con el modelo numérico de flujo de agua hacia un pozo ($1.7 \times 10^{-5} < K < 4.4 \times 10^{-4}$ m/s), están en acorde con la naturaleza de los medios poroso en el acuífero superior.

El patrón de sedimentación de la secuencia aluvio-lacustre, controla la distribución de los valores de la conductividad hidráulica, obtenidos por medio de las dos técnicas de evaluación de pruebas de bombeo en esta unidad.

La distribución espacial de los valores del rendimiento específico ($0.06 < S_y < 0.17$) y coeficiente de almacenamiento ($2.4 \times 10^{-4} < S_c < 2.1 \times 10^{-3}$), obtenidos de la simulación numérica de pruebas de bombeo, también concuerda con el tipo de medio poroso y comportamiento hidráulico del acuífero superior, que se fundamentan en la configuración de las curvas de abatimiento vs tiempo de las pruebas de bombeo a caudal constante, y en los datos piezométricos del acuífero superior y espesor del acuitardo superior.

Los valores promedio de la conductividad hidráulica ($K_h = 2.7 \times 10^{-5}$ m/s) y coeficiente de almacenamiento (3×10^{-4}), que resultaron de la simulación numérica de pruebas de bombeo en los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, confirman su carácter permeable y capacidad de almacenamiento de agua subterránea. De esta manera y considerando que no son explotados a gran escala, representan un importante recurso disponible de agua subterránea.

Los resultados de la presente investigación aportan conocimiento acerca del marco hidrogeológico de referencia y las características hidráulicas del acuífero en explotación, que debe considerarse en estudios futuros tendientes a lograr un manejo adecuado de los recursos de agua subterránea, que garantice la cantidad y calidad de agua para uso que demandará la Ciudad de México.

7.2 Estudios Futuros

Las características hidráulicas del acuitardo superior y su respuesta al bombeo en el acuífero superior subyacente, realmente se desconocen a escala regional. Por tal motivo es importante realizar pruebas de bombeo de larga duración en zonas de acuífero semiconfinado subyacente con pozos de observación en el mismo acuífero y acuitardo. También es conveniente realizar pruebas de bombeo con pozo de extracción en el acuitardo.

Los depósitos aluviales y piroclásticos del Plioceno superior, representan una unidad permeable con importantes recursos disponibles de agua subterránea. Su evaluación directa por medio de perforaciones exploratorias, es un aspecto recomendable por conocer para proponer nuevos esquemas de bombeo, que garanticen a futuro la cantidad y calidad de agua que demandará la Ciudad de México.

Emplear el modelo conceptual hidrogeológico de la presente investigación, para evaluar la información potenciométrica existente con el objetivo de definir el modelo conceptual de flujo de agua subterránea.

Es importante realizar un estudio hidrogeoquímico con la información existente, que incluya muestreo y mediciones físico-químicas en campo, con los siguientes propósitos : *a)* comprobar el modelo conceptual hidrogeológico propuesto en la presente investigación , *b)* determinar un modelo conceptual de flujo de agua subterránea y *c)* conocer los mecanismo que causan la salinización del agua subterránea en pozos productores de abastecimiento de agua potable perforados en las cercanías de la planicie de Texcoco.

Por la complejidad hidrogeológica de la parte meridional de la Cuenca de México, el manejo adecuado del agua subterránea en el concepto de desarrollo sustentable de la ciudad de México, no sólo se puede proponer con los modelos conceptuales hidrogeológico y de flujo de agua subterránea, sino que también es necesario predecir a futuro el sistema de flujo por medio de su modelación numérica tridimensional. Es deseable que la modelación numérica considere el modelo conceptual hidrogeológico y las características hidráulicas del acuífero superior determinados en la presente tesis.

Por medio de la geología superficial, se reconocieron áreas potenciales de recarga al agua subterránea en rocas fracturadas que afloran en las zonas montañosas. Sin embargo no se conoce la distribución espacial y temporal de la recarga. Al respecto se recomienda un

estudio de campo que incluya, la obtención de perfiles químicos e isotópicos en la zona no saturada y mediciones de niveles piezométricos en pozos cercanos a las áreas potenciales de recarga. Simulación numérica de la recarga, se deberá fundamentar con los datos de campo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el asesoramiento técnico de mi tutor Dr. Joel Carrillo Rivera y de mis asesores Dr. R.N. Farvolden y M. en C. Rubén Martínez Guerra, quienes me aclararon conceptos y aportaron ideas para el buen desarrollo de la presente tesis. También agradezco al Dr. Adrián Ortega Guerrero, Dr. Rafael Huizar Alvarez, Dr. Luis Marín Stillman, Dra. Ma. Aurora Armienta Hernández y M. en C. Antonio Cardona Benavides, por sus comentarios y sugerencias que se incorporaron al escrito final. Al M. en C. Guillermo Hernández por su apoyo computacional en la edición del texto final. Especialmente le agradezco a mi esposa Alicia García Tovar, su apoyo moral y comprensión, sin los cuales no hubiera culminado mis estudios de maestría.

También agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Dirección General de Personal Académico (DGPA) de la UNAM, por haberme otorgado una beca como estudiante de maestría en el Posgrado en Geofísica de la Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado (UACPyP) del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) de la UNAM. Parte de las figuras fueron dibujadas por el Arq. Carlos Sosa G.

REFERENCIAS

- Boulton N.S. and Streltsova S.T.D., 1978.** Unsteady flow to a pumped well in an unconfined fissured aquifer. *J. Hydrol.* Vol.37, pp. 349-363.
- Boulton N.S., 1954.** The drawdown of the water table under no-steady conditions near pumped well in on unconfined formation. *Inst. Civil Engineers Proc.* 3 (Part 3), pp. 564-579
- Bribiesca C.L., 1960.** Hidrología histórica del Valle de México. *Revista Ingeniería Hidráulica en México.* XIV (3). México D.F.
- Bryan K., 1948.** Los suelos complejos y fósiles de la Altiplanicie de México en relación con los cambios climáticos. *Bol. Soc. Geol. Mex.* XII, pp. 1-20.
- CEAS., 1989.** Registros litológicos, geofísicos, diseño constructivo y aforos de pozos productores. Datos hidroquímicos y gastos de extracción de pozos. Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México. Archivo de datos. México D.F.
- CFE., 1988.** Estudios geofísicos del Valle de México. Comisión Federal de Electricidad. Reporte Interno. Departamento de Estudios Geofísicos. Superintendencia de Estudios Zona Centro. México D.F.
- GAVM., 1953 a 1986.** Boletines de mecánica de suelos. Datos para el Valle de México. Gerencia de Aguas del Valle de México. México D.F.
- GAVM., 1986.** Perfiles geofísicos al sur del Valle de México. Gerencia de Aguas del Valle de México. Reporte técnico realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM. México D.F.
- GAVM., 1989.** Registros litológicos, geofísicos, diseño constructivo y aforos de pozos productores. Gerencia de Aguas del Valle de México. Archivo de datos. México D.F.
- GAVM., 1987.** Análisis de flujo de agua subterránea del Valle de México, mediante trazadores isotópicos. Gerencia de Aguas del Valle de México. Reporte técnico realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM. México. D.F.
- GAVM., 1991.** El abastecimiento de aguas a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Presente y Futuro. Gerencia de Aguas del Valle de México. Extractos de Conferencia en el Palacio de Minería. Organizada por la Sociedad Geológica Mexicana A.C. México D.F.
- Cortes S. A., Arizabalo D. R. y Rocha M. R. 1989.** Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México. *Geof. Int.*, Vol. 28, No. 2, pp. 265-282. México D.F.
- Cruickshank C., Shidawara M. y Rogengaus M., 1982.** Modelo tridimensional de contaminación de acuíferos en el Valle de México. Instituto de Ingeniería. UNAM. Reporte técnico para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 56 pp. México D.F.
- Davis S.N., 1969.** Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media. De Wiest R. J. M., ed., Academic Press. N.Y. 1969, pp. 53-58, 65, 70, 80-81, 86-89.
- De Cserna Z., De la Fuente D.M., Palacios N.M., Triay L., Mitre. S.M. y Mota. P.R. 1988.** Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Bol. 104. Instituto de Geología de la UNAM. México D.F.
- DGCOH., 1983.** Pruebas de bombeo y mediciones de caudales de extracción en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por Lesser y Asociados S.A. México D.F.

- DGCOH., 1985.** Estudio para conocer el caudal y sus variaciones durante el año de los manantiales más importantes del Distrito Federal. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por Ariel Constructores S.A. México D.F.
- DGCOH., 1991b.** Modelo matemático de predicción de hundimientos de la Ciudad de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por Perforaciones Leor S.A. México D.F.
- DGCOH., 1992a.** Hidrología subterránea en el Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Rev. Ing. Hidrául. en México/enero-abril 1992. México D.F.
- DGCOH., 1992b.** "Información piezométrica para el período comprendido entre 1984 y 1992, información de pruebas de bombeo y registros de gastos de extracción". Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte interno. México D.F.
- DGCOH., 1993.** Estudio geohidrológico de la porción suroriental de la Cuenca de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería S.A México D.F.
- DGCOH., 1994a.** Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM. México D.F.
- DGCOH., 1994b.** Estudio geohidrológico de la planicie de Texcoco. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Reporte técnico realizado por Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería S.A. México D.F.
- DGCOH., 1994c.** Registros litológicos, diseño constructivo, niveles y gastos de pozos productores. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Archivo de datos México D.F.
- Durazo L.J. and Farvolden R.N. 1989.** The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. J. Hydrol., Vol. 2, pp. 172-187.
- Erfia A.V und Higer W., 1975.** Geologische kart des bagiestes von Puebla-Tlaxcala. Das Mexiko Projekt der Deustchen Forschungs Gemeinschaft, 1:200 000.
- Freeze R.A. and Cherry J.A., 1979.** Groundwater. Prentice-Hall. Inc, Englewood Cliffs N.J. 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. Inst. Geol. UNAM, No. 60. 236 pp.
- Fries C. Jr., 1962.** Resumen de la geología de la hoja Pachuca. Estados de Hidalgo y México. 14 Q-c (11). Escala 1:100 000. Inst. Geol. UNAM.
- FNM., 1992.** Estudio de trazadores isotópicos del agua subterránea en la zona de Tepoztlán Morelos de la vía férrea México-Cuernavaca. Ferrocarriles Nacionales de México. Reporte técnico realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM. México D.F.
- García E., 1981.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía de la UNAM. México D.F.
- Girault. P., 1964.** Mineralogía de las arcillas del Valle de México. Revista Ingeniería Hidráulica en México/octubre, pp. 511-518.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Herrera I., Yate R. and Hennart J.P., 1982.** Estudio de hundimiento y balance de los acuíferos subterráneos de la ciudad de México. Instituto de Investigaciones Matemáticas Aplicadas de la UNAM. Reporte técnico realizado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 77 pp. México D.F.
- Herrera I., Martínez R. y Hernández G., 1989.** Contribuciones para la administración científica del agua subterránea de la Cuenca de México. Geof. Int. Vol. 28, No. 2, pp. 297-334. México D.F.
- Huizar A.R., 1989.** Contribution a l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique). Diplôme de docteur de l'Université de Besançon, Franch. 160 pp.
- INEGI., 1986a.** Carta hidrológica de la ciudad de México. E14-2. Escala 1:250 000. Instituto Nacional de Información Estadística y Geográfica. México D.F.
- INEGI., 1986b.,** Cartas topográficas de la Cuenca de México. Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Información Estadística y Geográfica. México D.F.
- Jone G.P and Rushton K.R., 1981.** Pumping test analysis. In: case studies in groundwater resources evaluation, Ed. by Lloyd J.W. Clarendon Press, Oxford, G.B., pp 65-86.
- Kruseman G.P. and Ridder N.A., 1990.** Analysis and evaluation of pumping test data. Int. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen The Netherlands, 377 pp.
- Marsal R.J. y Mazari M. 1959.** El subsuelo de la ciudad de México. Reporte interno del Instituto de Ingeniería de la UNAM. 2 vol. México D.F.
- Mc. Dowell W.L. and Clabaugh E.S., 1979.** Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. Geol. Soc. Amer. Special Paper. 180, 113-123 pp.
- Mooser F., 1975.** Historia geológica de la Cuenca de México. En: Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. México D.F., T.1. Mapa geológico.
- Mooser F., 1990.** Estratigrafía y estructuras del Valle de México. En: Memorias del Simposio: El subsuelo de la ciudad de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones. A cinco años del sismo de 1985. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México D.F.
- Mooser F. y Molina C., 1993.** El nuevo modelo hidrogeológico para la Cuenca de México. Revista del Centro de la Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra A.C. Vol. 3 No. 1. México D.F.
- Mooser F., 1993.** "Interpretaciones geológicas sobre los perfiles de sísmica de reflexión. realizados por Petróleos Mexicanos. Reporte interno realizado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México D.F.
- Ortega G.A and R.N. Farvolden., 1989.** Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. J. Hydrol. Vol. 110, pp. 271-294.
- Ortega G. A., Cherry J. A. and Rudolph D.L., 1993.** Large-scale aquitard consolidation near Mexico city. Groundwater Vol. 31. No.5, pp. 708-718.
- PEMEX., 1987.** Informes geológicos finales de los pozos profundos exploratorios Copilco-1, Roma-1, Tulyehualco-1 y Mixhuca-1. México. Informes de los estudios geofísicos de sísmica de reflexión en la Cuenca de México. Petróleos Mexicanos. Información consultada en la Fundación Javier Barros Sierra A.C., México D.F.

Pérez Cruz, G., 1988. Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México. Tesis de Maestría en Ingeniería. Div. Est. Posg. de la Fac. Ing. UNAM. México D.F.

Pitre Ch. V., 1994. Analysis of induced recharge from a waste water canal through fractured clays in Mexico city. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Tierra. Universidad de Waterloo Canadá. 224 pp.

Proyecto Texcoco., 1969. Memorias de los trabajos realizados y conclusiones. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México D.F.

Rathod S. and Rushton K.R., 1984. Numerical method of pumping test analysis using microcomputer. Groundwater. Vol. 22.No. 5, pp. 601-608.

Raisz E., 1964. Landforms of Mexico. Mapa con texto. Escala 1:3 000 000. Sec. Ed. Cambridge Mass.

Rivera B. A., 1990. Modele hidrogeologique quasi-tridimensionnel non-lineaire pour simuler la subsidence dans les systemes aquiferes multicouches. Case de Mexico. Tesis de Doctorado en Hidrología e Hidrogeología Cuantitativa de la Escuela Nacional Superior de Minas de Paris Francia. 279 pp.

Rudolph D.L., J.A Cherry and R.N. Farvolden. 1991. Field investigations and solute transport in a lacustrine aquitard near Mexico City. Water Resour. Res. Vol. 27, No. 9, pp. 2187-2201.

Rushton K.R. and Redshaw S.C., 1979. Seepage and groundwater flow. John Wiley and Sons. Great Britain, 339 pp.

Schalaepfer J.C., 1968. Resumen de la geología de la hoja México. Distrito Federal y Estados de México y Morelos. Hoja México 14Q-h(5). Escala 1:100,000. Instituto de Geología. UNAM. México D.F.

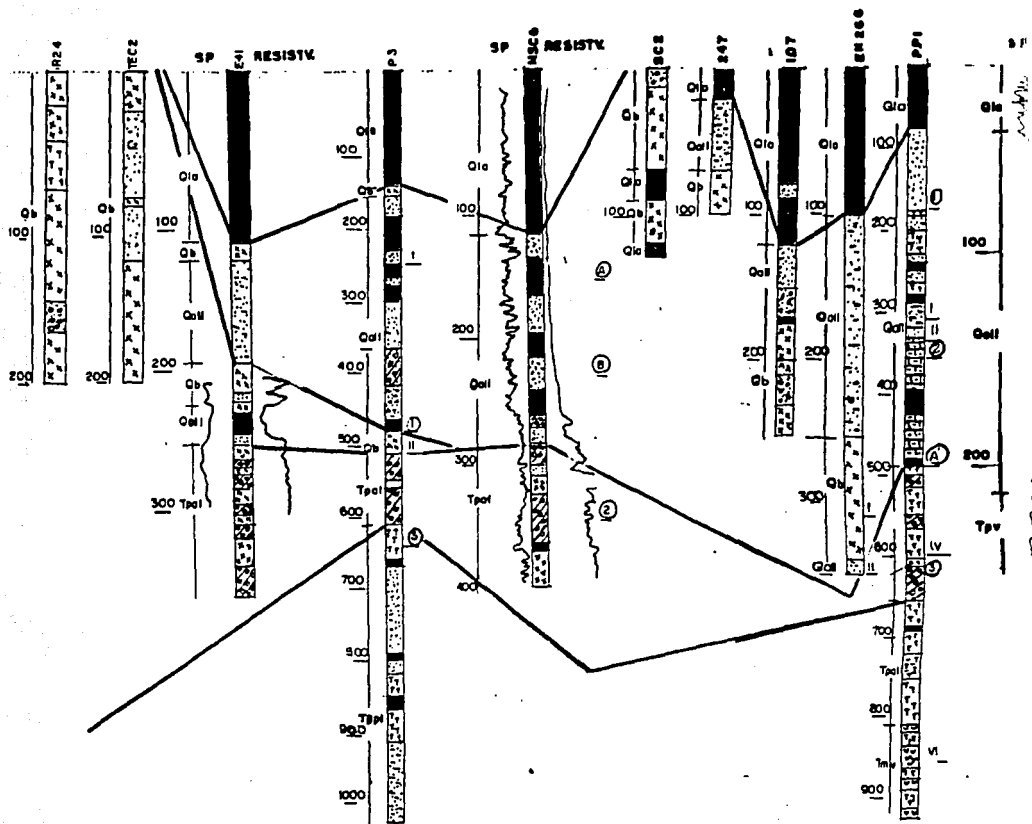
SRAH 1980a. Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Cuernavaca Edo. de Morelos. Secretaría de Recursos Agrícolas e Hidráulicos. Reporte técnico realizado por TACSA. México.

SARH 1980b. Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Cuautla- Yautepec Edo. de Morelos México. Secretaría de Recursos Agrícolas e Hidráulicos. Reporte técnico realizado por ROASA. México.

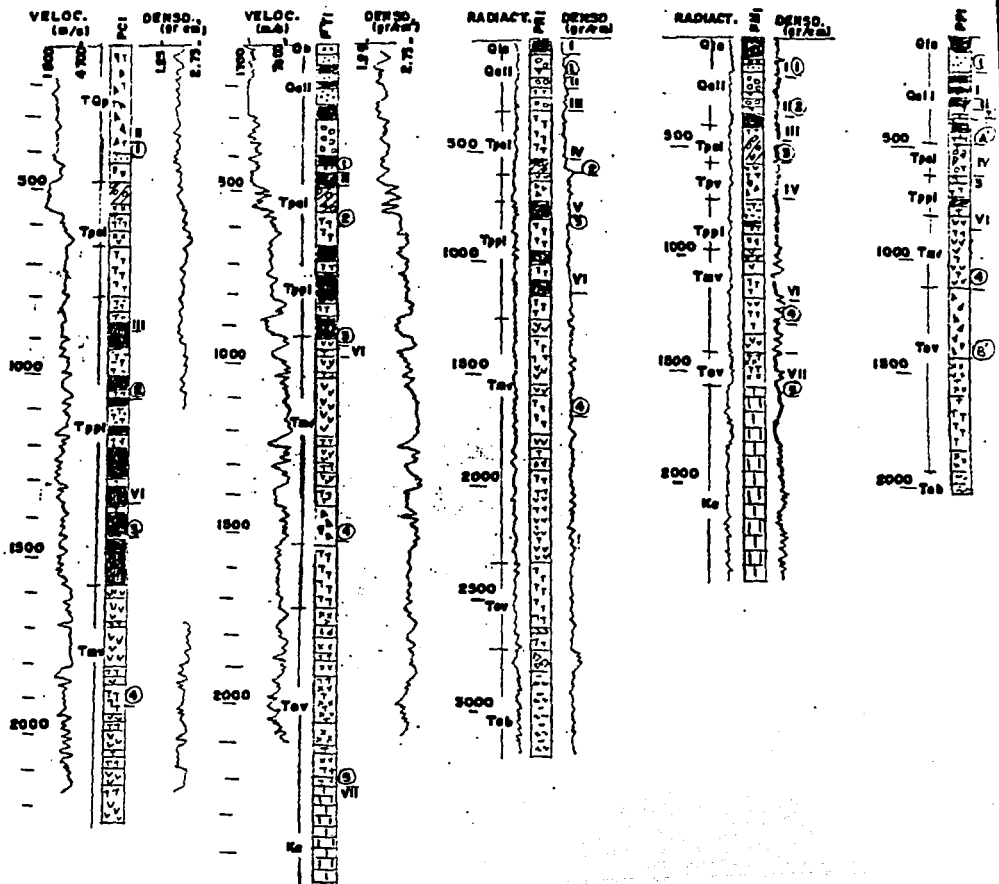
UACH., 1991. Sondeos eléctricos verticales en la planicie de Texcoco. Universidad Autónoma de Chapingo. Informe interno México.

Vázquez S. E. y Jaimes P. R., 1989. Geología de la Cuenca de México. Geof. Int. Vol. 28, No. 2, pp. 133-190.

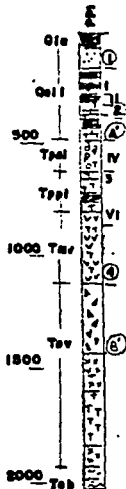
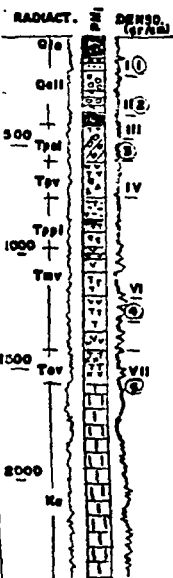
ANEXO 1 Registros litológicos y geofísicos de pozos productores y exploratorios. Incluye correlación estratigráfica e información de sondeos geofísicos de superficie.



Registros litológicos y geofísicos de pozos representativos a lo largo de la sección geológica A-A'. Incluye información de sondeos geofísicos de superficie.



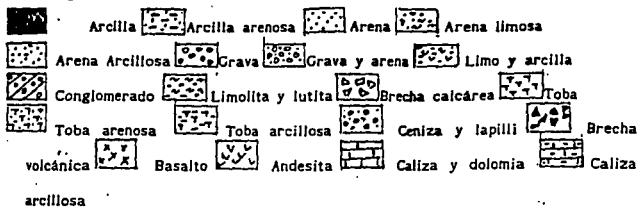
Registros litológicos y geofísicos de pozos profundos exploratorios. Incluye información de sondes geofísicos de superficie.



Unidades Hidrogeológicas:

- Qla : Depósitos Lacustres del Cuaternario
 Qall : Sedimentos Aluvio-Lacustres del Cuaternario
 Qb : Rocas Basálticas del Cuaternario
 TOv : Rocas Andesíticas del Plió-Cuaternario
 TQp : Depósitos Piroclásticos Andesíticos del Plió-Cuaternario
 Tpv : Rocas Andesíticas del Plioceno Superior
 Tpal : Depósitos Aluviales y Piroclásticos del Plioceno Superior
 Tppi : Depósitos Lacustres y Piroclásticos del Plioceno Inferior
 Tmv : Rocas Andesíticas del Mioceno
 Tov : Rocas Basálticas y Riolíticas del Oligoceno
 Teb : Formación Balsas del Eoceno
 Km : Rocas Carbonatadas Marinas del Cretácico

Litología:



Geofísica:

I, II, III, IV, V, VI, VII : Reflectores sísmicos (Pérez-Cruz, 1988)

Reflectores sísmicos de Mooser (1993):

- ① Base del Relleno Aluvial-Lacustre/Cima de la Secuencia Estratificada
- ② Base de la Secuencia Estratificada/Cima de los Depósitos Lacustres del Plioceno Inferior
- ③ Base de los Depósitos lacustres del Plioceno Inferior/Cima de las Vulcanitas del Mioceno
- ④ Base de las Vulcanitas del Mioceno/Cima de las Vulcanitas del Oligoceno
- ⑤ Base de la Vulcanitas del Oligoceno-Balsas/Cima del Basamento Sedimentario Marino

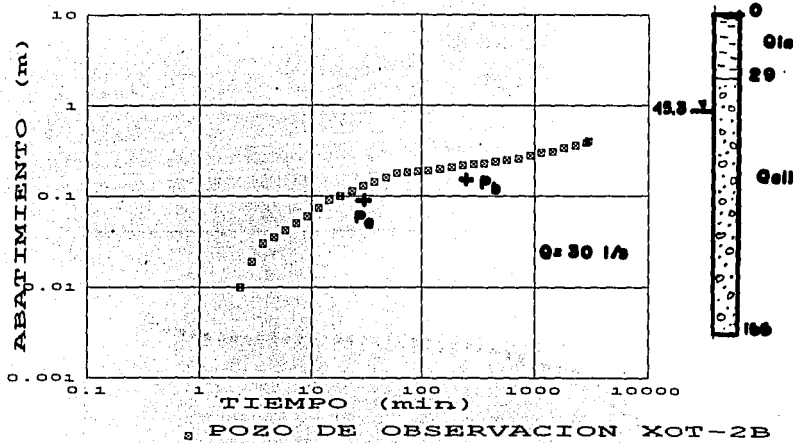
Ⓐ Ⓑ : Reflectores sísmicos (Proyecto Texcoco, 1969)

Ⓐ Ⓑ : Reflectores sísmicos (CFE, 1988)

FALLA DE ORIGEN

ANEXO 2 Análisis y evaluación de pruebas de bombeo con métodos estándar y modelación numérica de flujo de agua radial hacia un pozo. El mecanismo de flujo en cada prueba de bombeo simulada, es obtenido con los resultados del modelo numérico.

COMPORTAMIENTO LIBRE-MEDIO GRANULAR

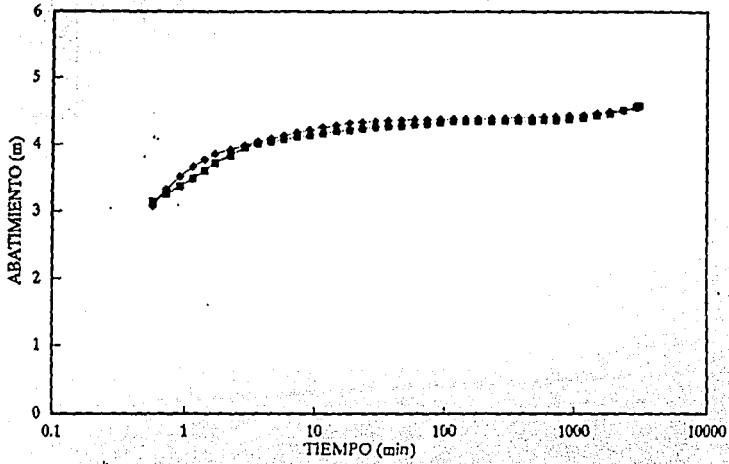


$W(u, r/D) = 1.0$
 $l/u = 10^{-2}$
 $r/D = 0.4$
 $s = 0.1 \text{ m}$
 $t = 2040 \text{ s}$
 $b = 205 \text{ m}$
 $T = 2.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

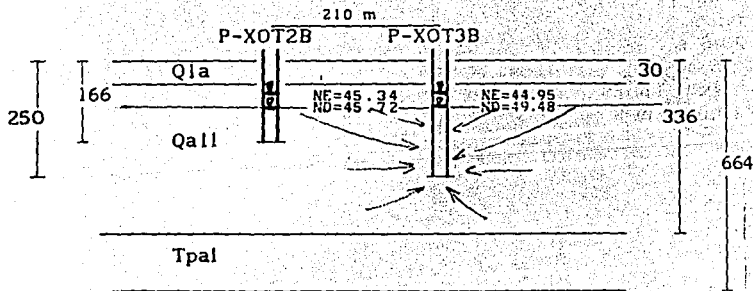
```

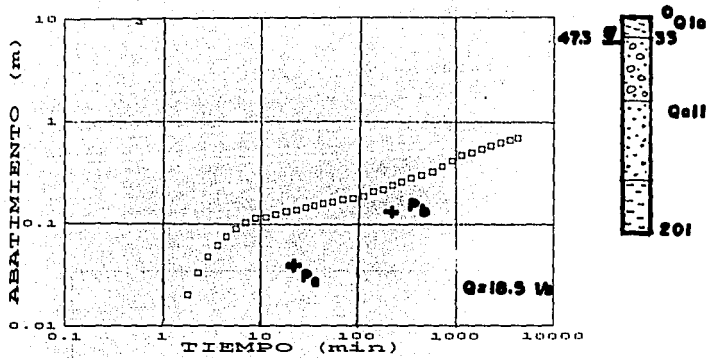
0.0,0.0,0.0,205.1,205.1,291.1
2
0.0,0.0
2.0,0.2,0.005,0.15
10.5,0.0,5.0,0.005,0.21
11.8,0.0,5.0,0.005,0.21
12.5,0.0,5.0,0.005,0.21
13.5,0.0,5.0,0.005,0.21
14.5,0.0,5.0,0.005,0.21
15.5,0.0,5.0,0.005,0.21
16.5,0.0,5.0,0.005,0.21
17.5,0.0,5.0,0.005,0.21
18.5,0.0,5.0,0.005,0.21
19.5,0.0,5.0,0.005,0.21
20.5,0.0,5.0,0.005,0.21
21.5,0.0,5.0,0.005,0.21
22.5,0.0,5.0,0.005,0.21
23.5,0.0,5.0,0.005,0.21
0.8,0.0,8.0,0.001,0.08
0.0
0.0,0
2.0,0.2,0.005
0.8,0.0,8.0,0.001
1.0,1.0,1.0
3
3
18.0,180.0,210.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0,0
2592.0,2.1
0.0,2.42
-10.0,2.42

```



DATOS DE CAMPO P-3B
 RESULTADOS DEL MODLEO P-3B





$$W(u, r/D) = 0.1$$

$$1/u = 10^{-2}$$

$$r/D = 1.5$$

$$s = 0.034$$

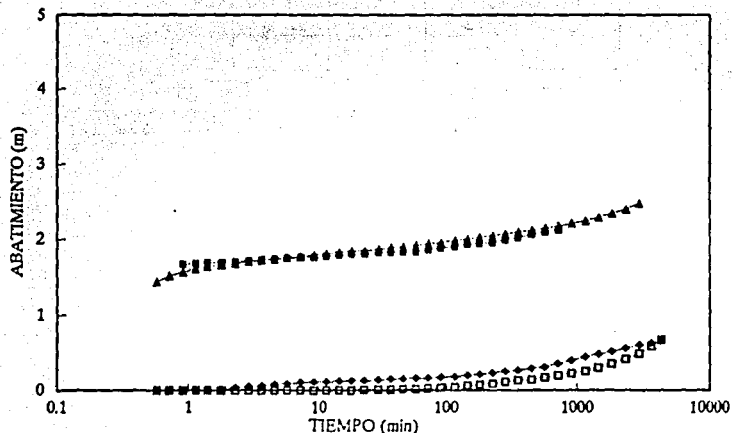
$$t = 168 \text{ s}$$

$$b = 153 \text{ m}$$

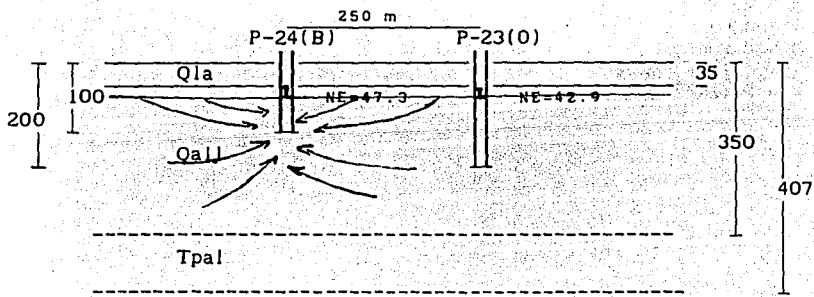
$$T = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

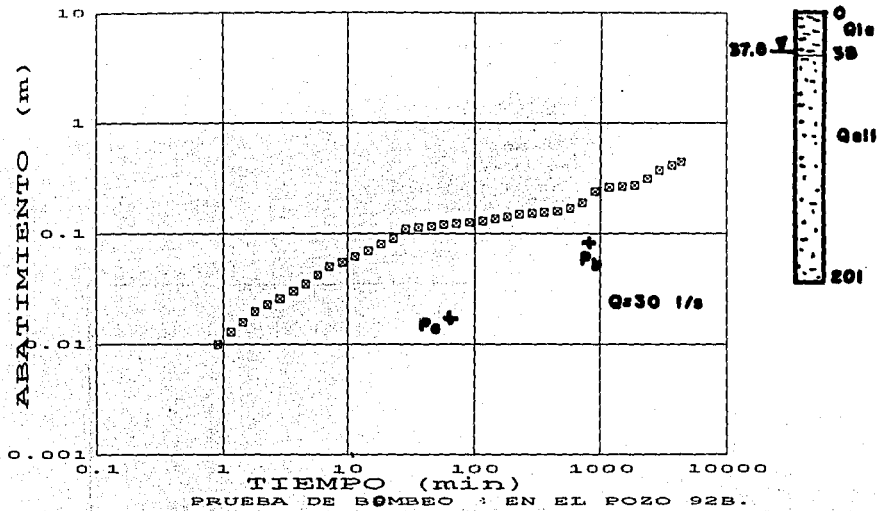
$$K = 2.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

0.18,300.0
 0.0,0.0,0.0,152.7,152.7,302.7
 2
 0.0,0.0
 5.0,0.5,0.005,0.2
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0.0
 5.0,0.5,0.005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 18.0,180.0,250.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 1598.0,3.0
 0.0,3.42
 -10.0,3.42



■ DATOS DE CAMPO P-24 ▲ DATOS DE CAMPO P-24
 ▲ RESULTADOS DEL MODELO P-24 □ RESULTADOS DEL MODELO P-24



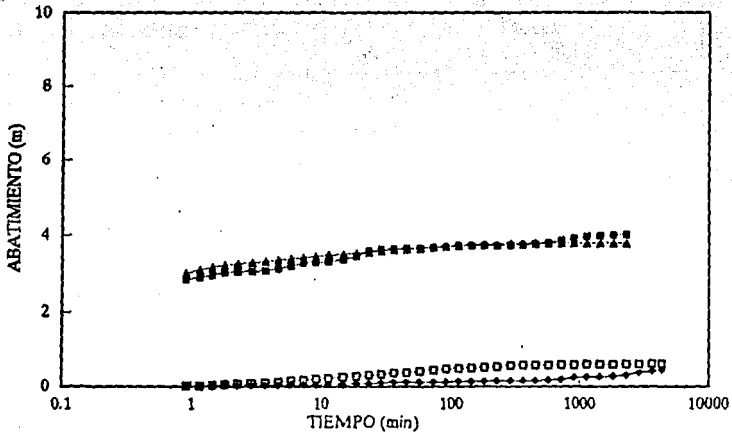


$W(u, r/D)_2 = 0.1$
 $1/u = 10^{-2}$
 $r/D = 1.5$
 $s = 0.03 \text{ m}$
 $t = 3780 \text{ s}$
 $b = 163 \text{ m}$
 $T = 7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 4.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
 $S_y = 0.03$

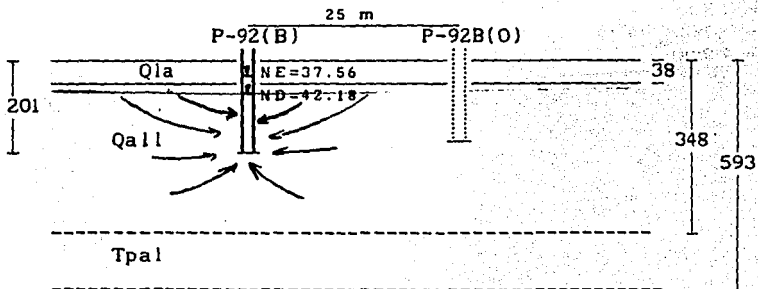
```

0.18,300.0
0.0,0.0,0.0,163.4,162.4,310.4
2
0.0,0.0
4.0,0.4,0.001,0.15
15.15,0.1,5.0,0.001,0.2
16.15,0.1,5.0,0.001,0.2
17.15,0.1,5.0,0.001,0.2
18.15,0.1,5.0,0.001,0.2
19.15,0.1,5.0,0.001,0.2
20.15,0.1,5.0,0.001,0.2
21.15,0.1,5.0,0.001,0.2
22.15,0.1,5.0,0.001,0.2
23.15,0.1,5.0,0.001,0.2
0.8,0.8,0.8,0.001,0.08
0.0
0.0
6.0,0.6,0.001
0.8,0.0,0.0,0.001
1.0,10.0,1.0
2
25.0,250.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
2575,0,1.0
0.0,0,3.42
-10.0,3.42

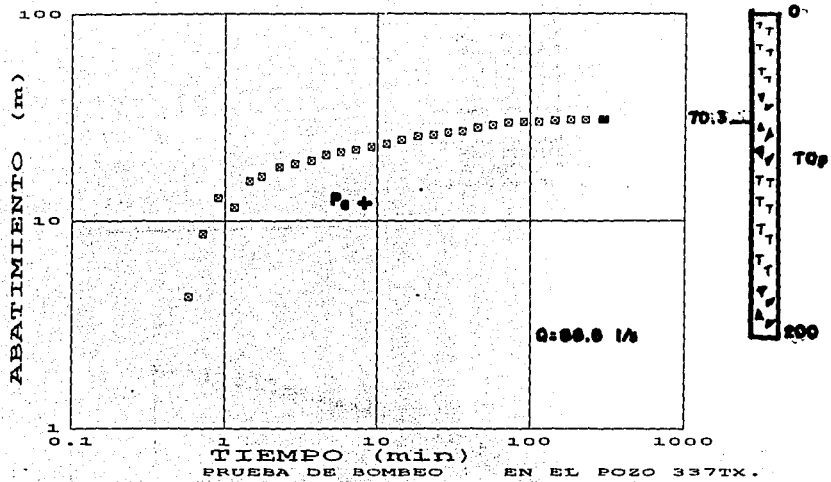
```



■ DATOS DE CAMPO P-92 ● DATOS DE CAMPO P-92B
 ▲ RESULTADOS DEL MODELO P-92 □ RESULTADOS DEL MODELO P-92B

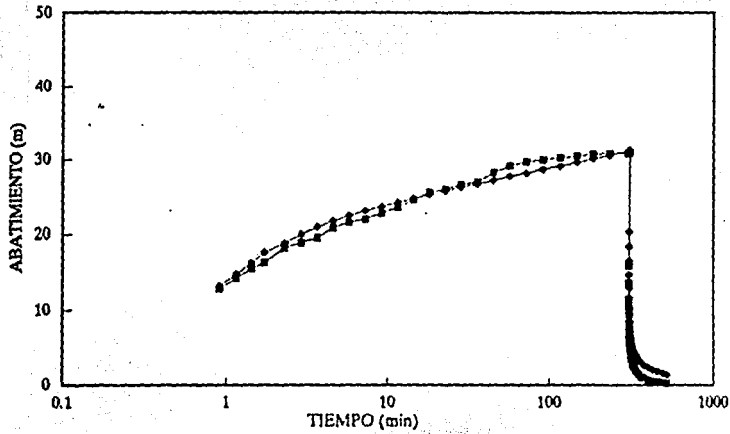


PJ

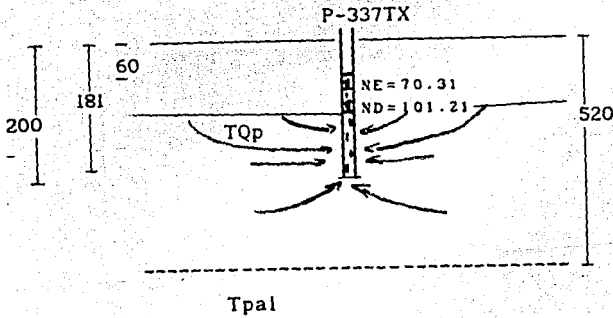


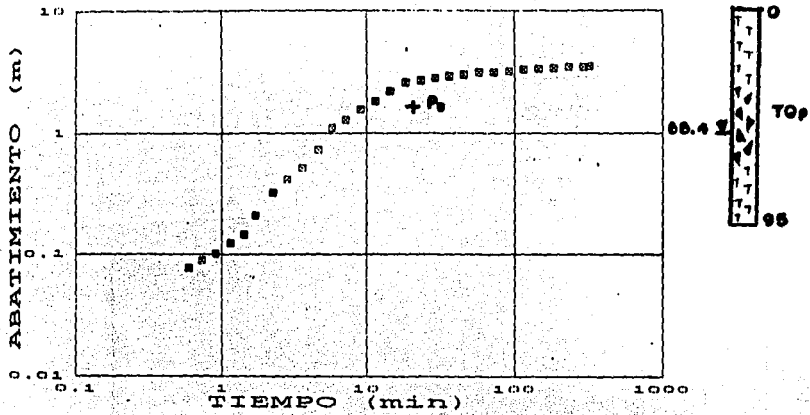
$W(u, r/D) = 2.0$
 $1/u = 10^{-1}$
 $r/D = 0.1$
 $s = 12.5$
 $t = 432 \text{ s}$
 $b = 111 \text{ m}$
 $T = 8.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 7.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,110.7,110.7,450.0
 2
 0.0,0.0
 1.8,0.18,0.001,0.08
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 1.8,0.18,0.001
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 5754.2,0.20833
 0.0,0.3541633
 -10.0,0.3541633



■ DATOS DE CAMPO P-337TX
 ● RESULTADOS DEL MODELO P-337TX





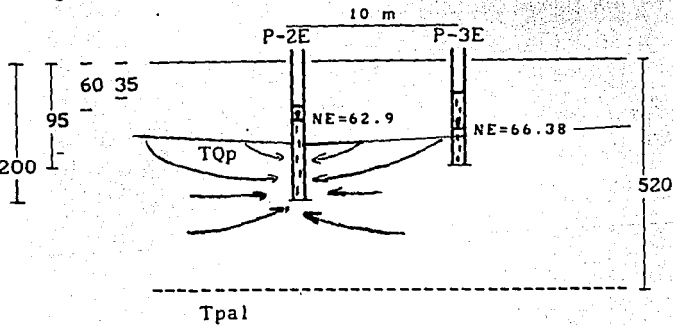
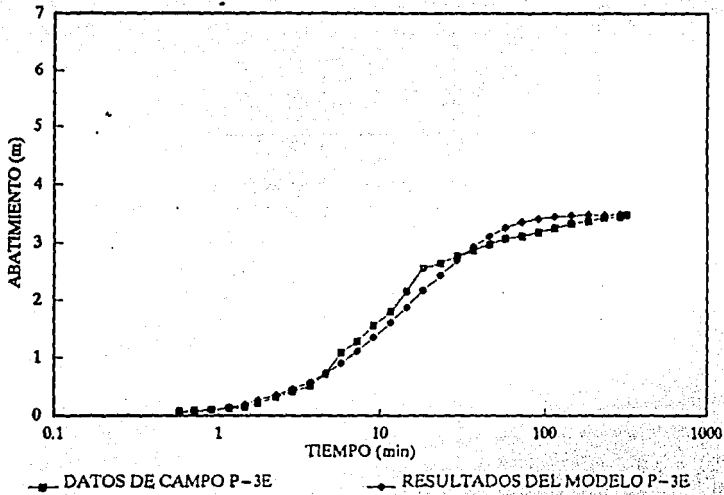
PRUEBA DE BOMBEO EN LOS POZOS 2E Y 3E.

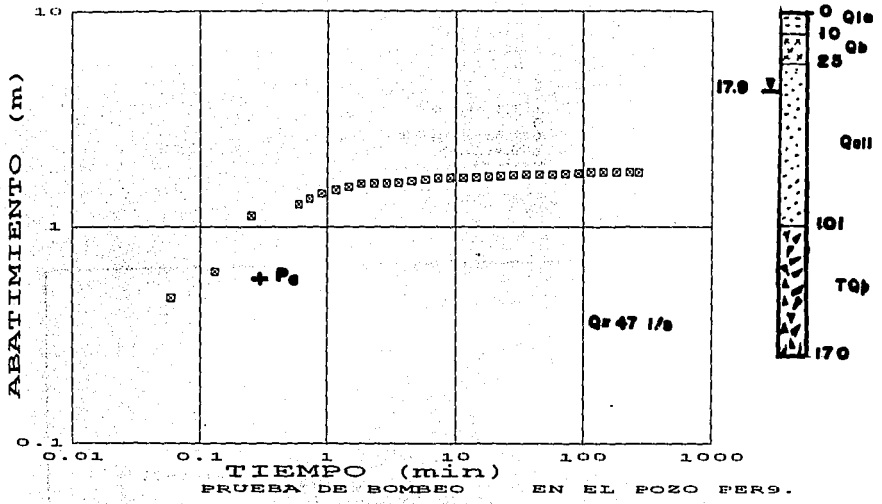
$W(u, r/D) = 1.0$
 $1/u = 10^{-2}$
 $r/D = 0.4$
 $s = 1.5 \text{ m}$
 $t = 1440 \text{ s}$
 $b = 137 \text{ m}$
 $T = 8.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 6.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

```

0.15,900.0
0.0,0.0,0.0,137.0,137.0,457.0
2
0.0,0.0
16.0,1.6,0.005,0.2
13.0,6.0,0.06,0.001,0.1
14.0,6.0,0.06,0.001,0.1
15.0,6.0,0.06,0.001,0.1
16.0,6.0,0.06,0.001,0.1
17.0,6.0,0.06,0.001,0.1
18.0,6.0,0.06,0.001,0.1
19.0,6.0,0.06,0.001,0.1
20.0,6.0,0.06,0.001,0.1
21.0,6.0,0.06,0.001,0.1
22.0,6.0,0.06,0.001,0.1
23.0,6.0,0.06,0.001,0.1
24.0,6.0,0.06,0.001,0.1
0.8,0.0,0.0,0.001,0.08
0.0
0.0,0
18.0,1.6,0.005
0.8,0.0,0.0,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
10.0,150.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1273.0,0.21875
-10.0,0.21875

```





$$W(u, r/D) = 1.0$$

$$1/u = 10^{-2}$$

$$r/D = 0.2$$

$$s = 0.5 \text{ m}$$

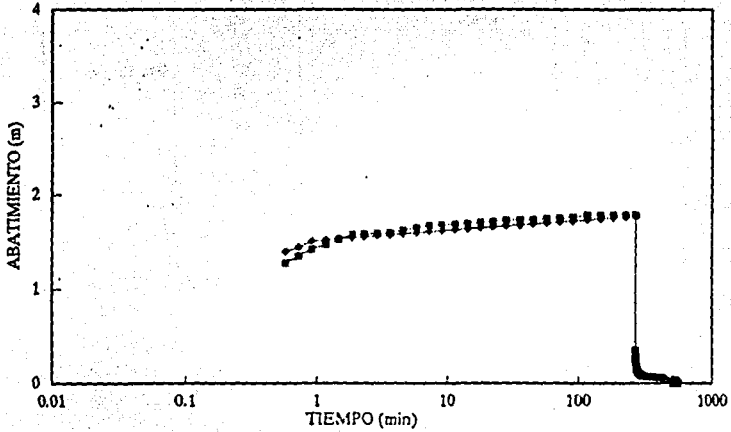
$$t = 11.7 \text{ s}$$

$$b = 152 \text{ m}$$

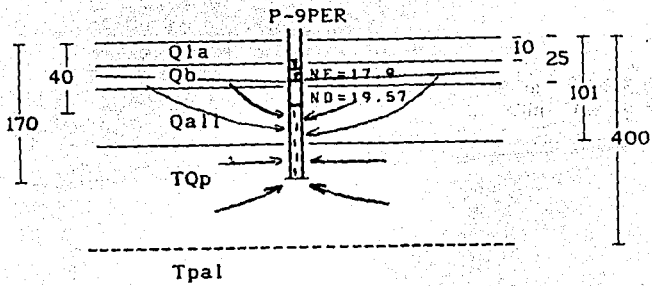
$$T = 7.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

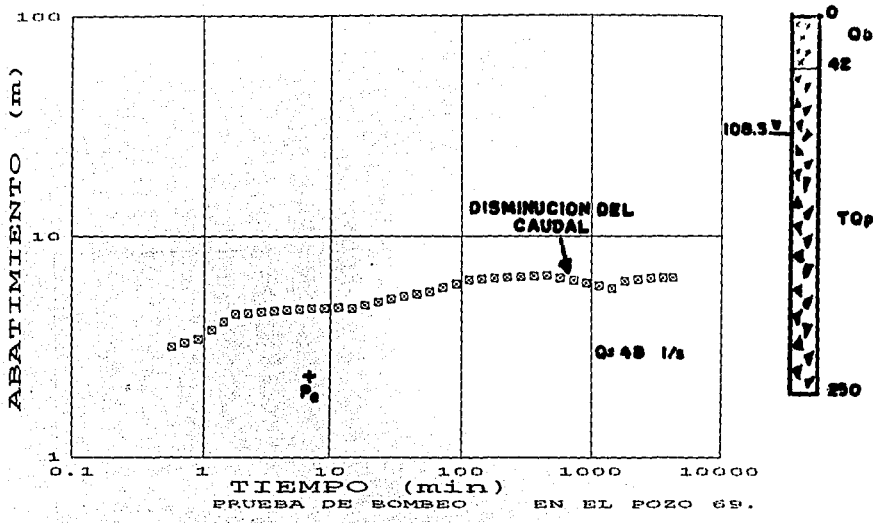
$$K = 5.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

0.17, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 83.1, 83.1, 152.1
 2
 0.0, 0.0
 27.0, 2.7, 0.005, 0.2
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0.0
 4.0, 0.4, 0.001
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001
 1.0, 1.0, 1.0
 3
 3
 15.0, 150.0, 350.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 4205.95, 0.1875
 0.0, 0.375
 -10.0, 0.375



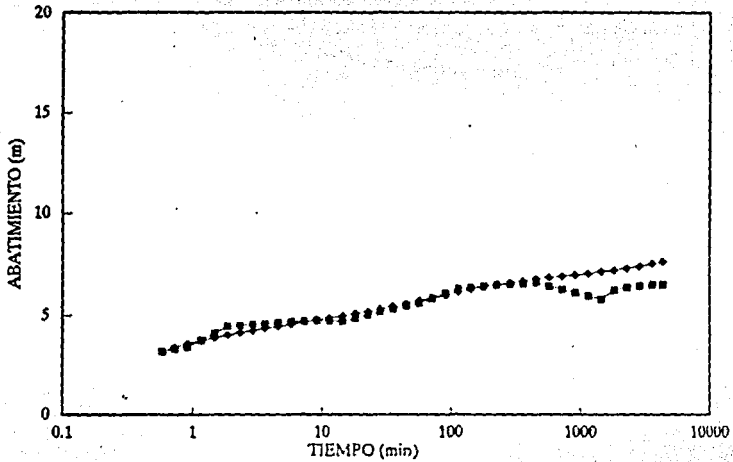
—•— DATOS DE CAMPO P-9PER
 —•— RESULTADOS DEL MODELO P-9PER



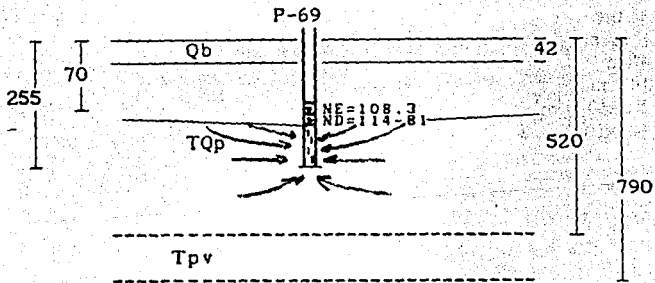


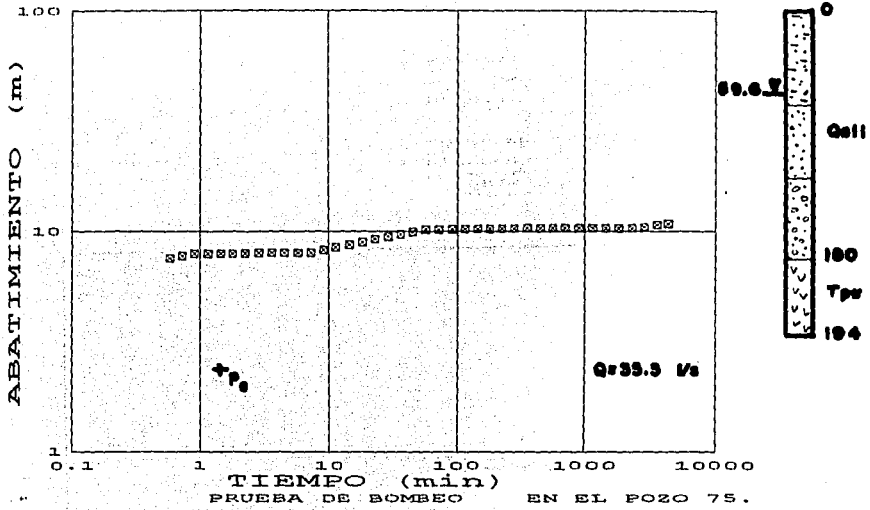
$W(u, r/D) = 0.6$
 $l/u = 10^{-2}$
 $r/D = 0.6$
 $s = 1.95 \text{ m}$
 $t = 48 \text{ s}$
 $b = 147 \text{ m}$
 $T = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 8.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

0.17,500.0
 0.0.0.0,0.0,146.7,146.7,411.7
 2
 0.0,0.0
 4.8,0.48,0.001,0.06
 0.8,0.0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 4.8,0.48,0.001
 0.8,0.0.8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 17.0,170.0,340.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 4147.2,3.0
 0.0,3.25
 -10.0,3.25



■ DATOS DE CAMPO P-69 ◆ RESULTADOS DEL MODELO P-69



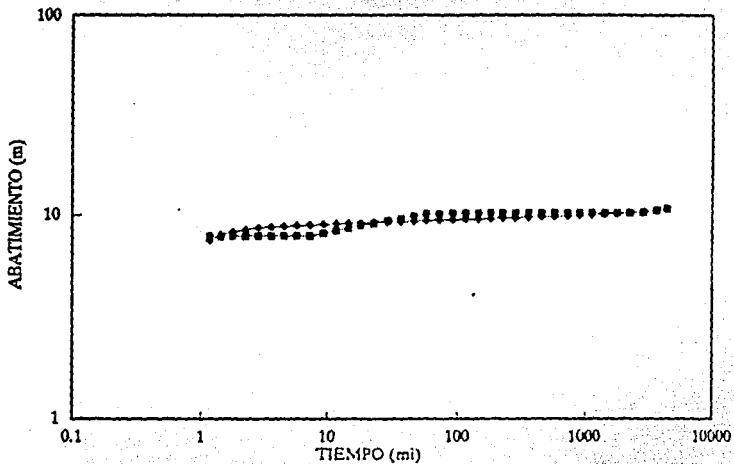


$W(u, r/D) = 1.0$
 $1/u = 10^{-1}$
 $r/D = 0.4$
 $s = 3.6 \text{ m}$
 $t = 81 \text{ s}$
 $b = 134 \text{ m}$
 $T = 7.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 5.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

```

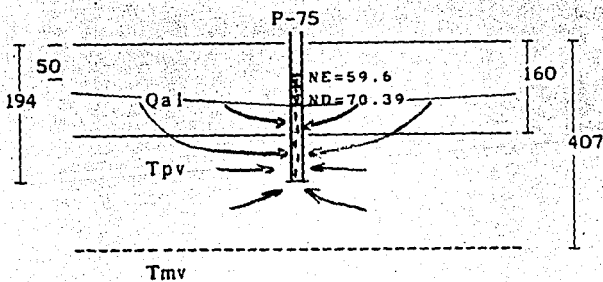
0.178,300.0
0.0,0.0,0.0,100.4,100.4,134.4
2
0.0,0.0
2.0,0.2,0.005,0.15
12.11,0.1,1.0,0.005,0.2
13.11,0.1,1.0,0.005,0.2
14.11,0.1,1.0,0.005,0.2
15.11,0.1,1.0,0.005,0.2
16.11,0.1,1.0,0.005,0.2
17.11,0.1,1.0,0.005,0.2
18.11,0.1,1.0,0.005,0.2
19.11,0.1,1.0,0.005,0.2
20.11,0.1,1.0,0.005,0.2
21.11,0.1,1.0,0.005,0.2
22.11,0.1,1.0,0.005,0.2
23.11,0.1,1.0,0.005,0.2
0.8,0.0,0.0,0.005,0.2
0.0
0.0
0.4,0.04,0.001
0.0,4,0.04,0.001
1.0,1,0,1.0
3
14.0,140,0,260,0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
3657,2,3,0
0.0,3,6667
-10.0,3,4667

```



■ DATOS DE CAMPO P-75

← RESULTADOS DEL MODELO P-75

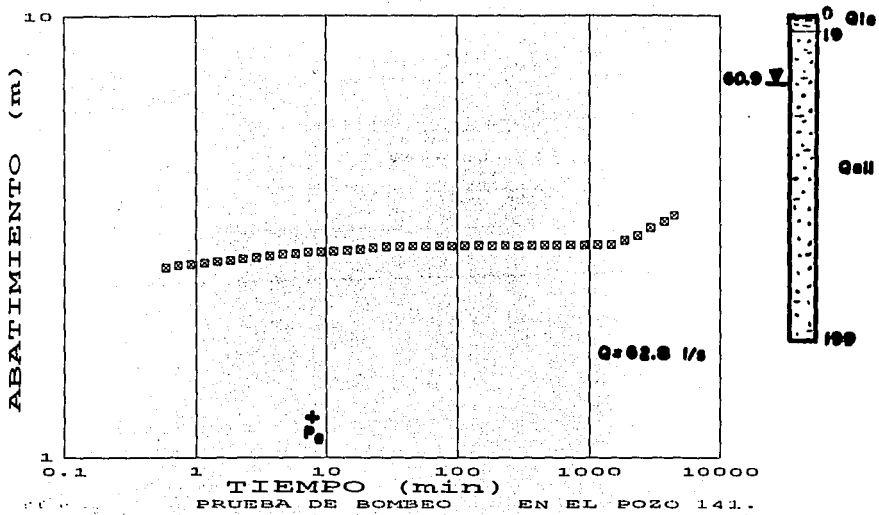


~~REVISAR~~ *Revisar*
PAGINA NO.

~~103 y 104~~

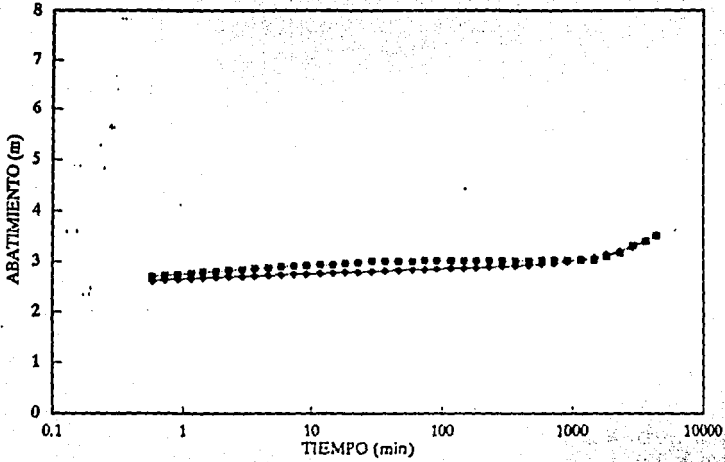
103 y 104

03090
1995
F2

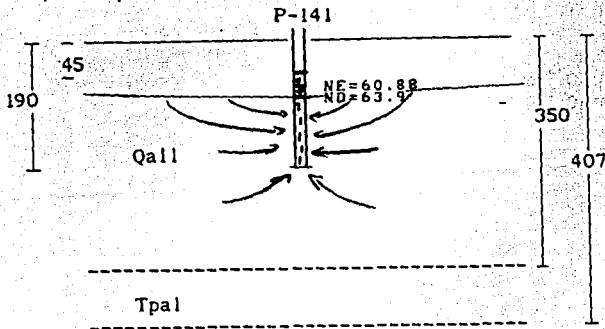


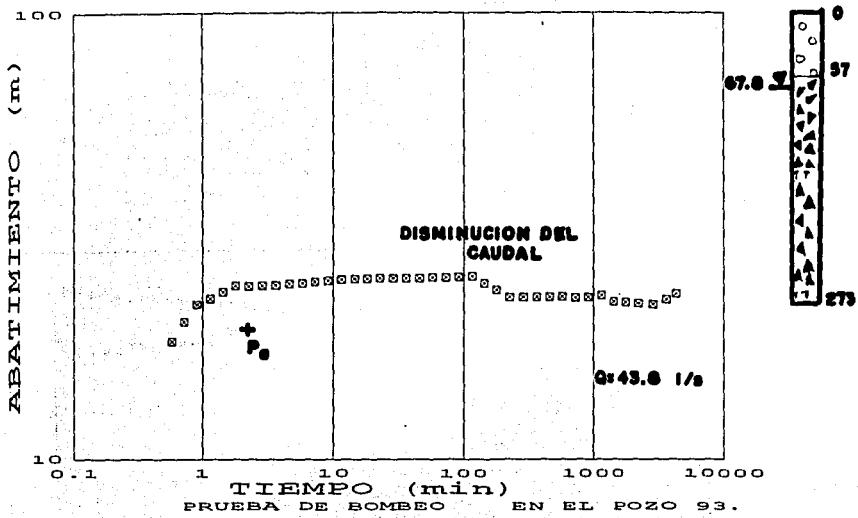
$W(u, r/D) = 2.0$
 $l/u = 1.0$
 $r/D = 0.1$
 $s = 1.21 \text{ m}$
 $t = 288 \text{ s}$
 $b = 129 \text{ m}$
 $T = 8.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 6.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

0.1524,500.0
 0.0,0.0,0.0,129.12,129.12,289.12
 2
 0.0,0.0
 15.0,1.5,0.001,0.2
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0,0,0
 15.0,1.5,0.001
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,2.0,1.0
 2
 3
 15.0,150.0,350.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 5428.51,3.0
 0.0,3.3333
 -10.0,3.3333

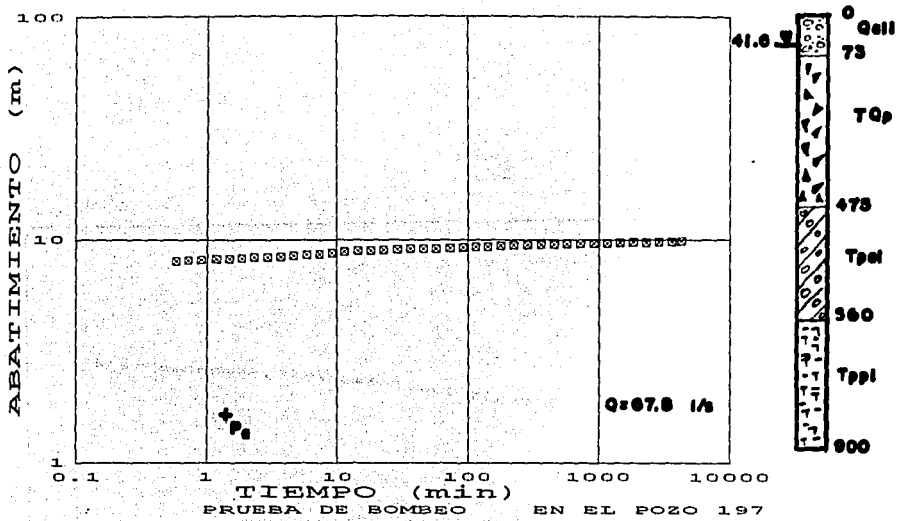


■ DATOS DE CAMPO P-141 ● RESULTADOS DEL MODELO P-141





$W(u, r/D) = 0.2$
 $1/u = 10^{-2}$
 $r/D = 0.8$
 $s = 4.3$
 $t = 540 \text{ s}$
 $b = 205 \text{ m}$
 $T = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 7.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

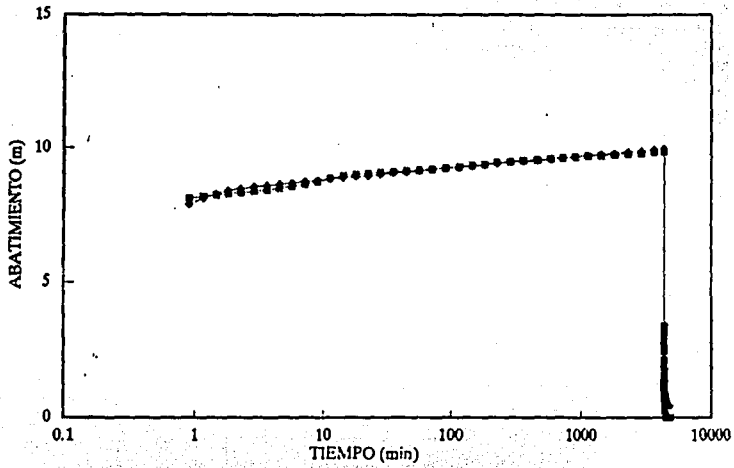


$$\begin{aligned}
 W(u, r/D) &= 1.0 \\
 l/u &= 10^{-1} \\
 r/D &= 0.2 \\
 s &= 2.6 \text{ m} \\
 t &= 66 \text{ s} \\
 b &= 518 \text{ m} \\
 T &= 2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\
 K &= 4.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

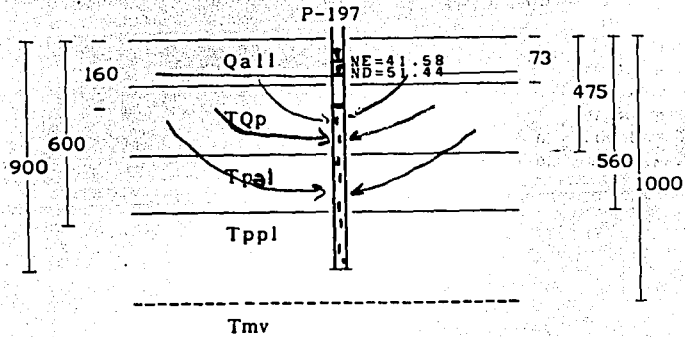

```

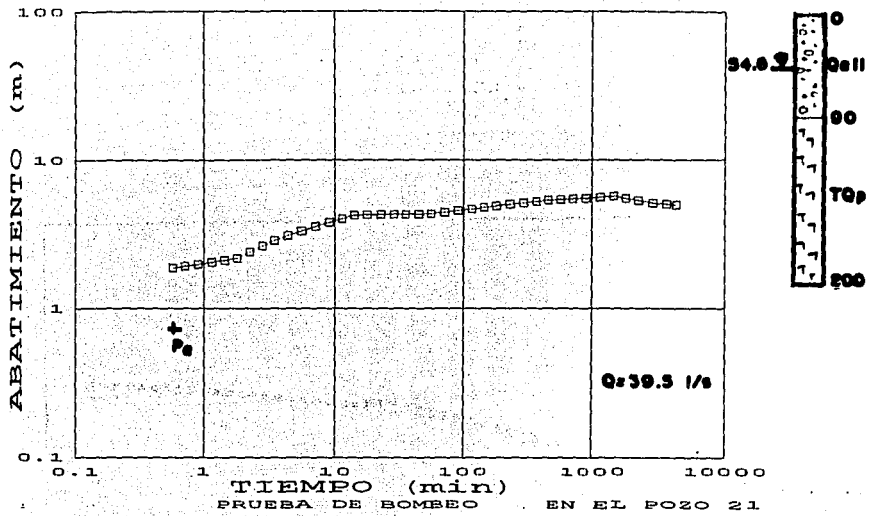
0.18,100.0
0.0,0.0,0.0,432.4,432.4,318.4
3
0.0,0.0
0.7,0.07,0.001,0.07
13.6,0.0,0.0,0.001,0.08
16.8,0.0,0.0,0.001,0.08
15.4,0.0,0.0,0.001,0.08
16.8,0.0,0.0,0.001,0.08
17.6,0.0,0.0,0.001,0.08
18.6,0.0,0.0,0.001,0.08
19.6,0.0,0.0,0.001,0.08
20.6,0.0,0.0,0.002,0.08
21.6,0.0,0.0,0.002,0.08
22.6,0.0,0.0,0.002,0.08
23.6,0.0,0.0,0.002,0.08
24.6,0.0,0.0,0.002,0.08
0.6,0.0,0.0,0.001,0.08
0.0,0.0
3,0,0,3,0,0005
0.8,0.0,0.0,0.001
1.0,1.0,1.0
3
18.0,180.0,500.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
8897.01,3.0
0.0,3.3323
-10.0,3.3323

```



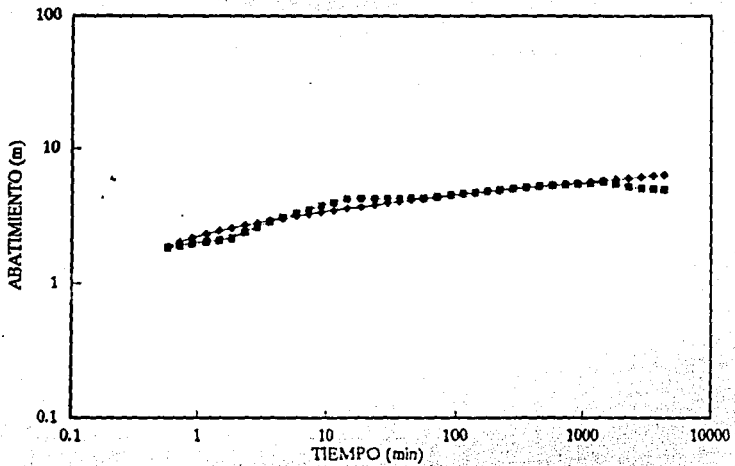
DATOS DE CAMPO P-197
 RESULTADOS DEL MODELO P-197





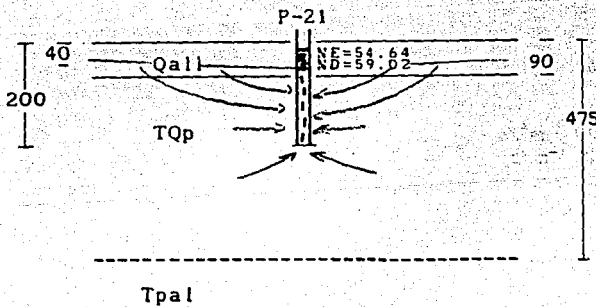
$W(u, r/D) = 0.6$
 $1/u = 10^{-2}$
 $r/D = 0.4$
 $s = 0.8 \text{ m}$
 $t = 21 \text{ s}$
 $b = 145 \text{ m}$
 $T = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 1.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

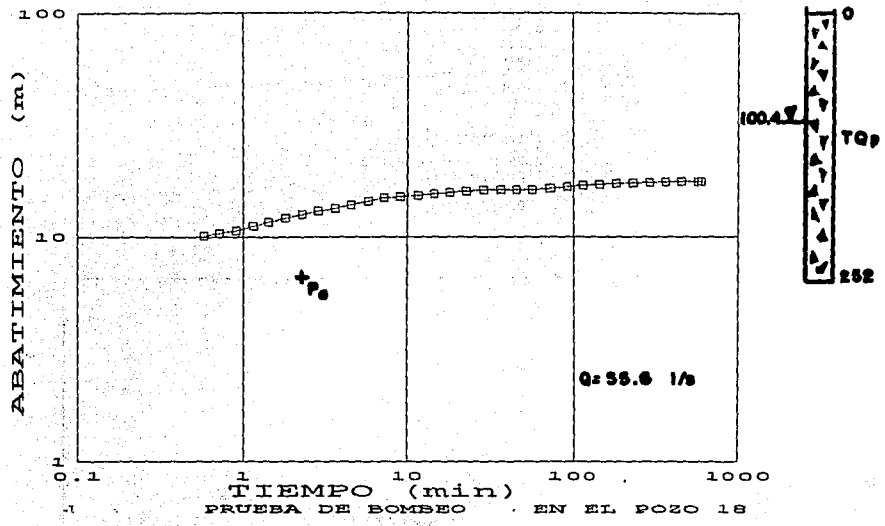
0.18, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 0.35, 4, 35.4, 145.4
 2
 0.0, 0.0
 15.0, 1.5, 0.005, 0.15
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0.0
 1.5, 0.15, 0.0007
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001
 1.0, 1.0, 1.0
 3
 3
 18.0, 180.0, 360.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 3411.9, 3.0
 0.0, 3.16667
 -10.0, 3.16667



← DATOS DE CAMPO P-21

← RESULTADOS DEL MODELO P-21



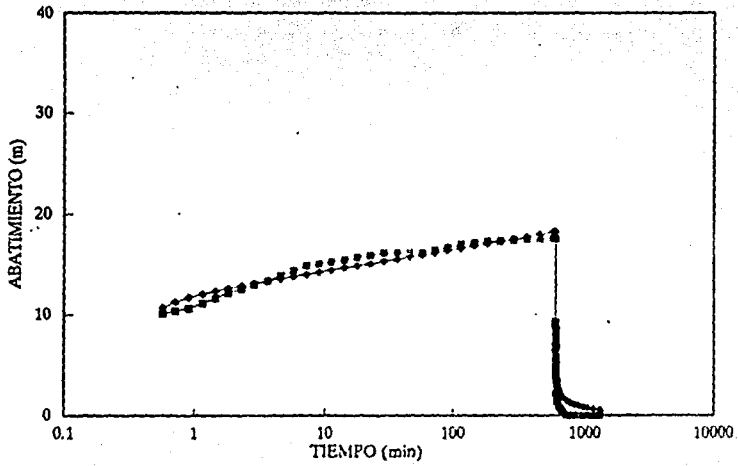


$W(u, r/D) = 2.0$
 $1/u = 10^{-1}$
 $r/D = 0.2$
 $s = 7.7 \text{ m}$
 $t = 48 \text{ s}$
 $b = 152 \text{ m}$
 $T = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 7.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

```

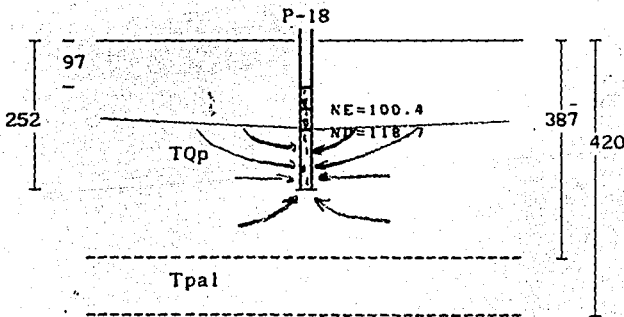
0.2,500.0
0.0,0.0,0.0,151.6,151.6,499.6
2
0.0,0.0
1.8,0.18,0.001,0.085
0.8,0.0,8,0.005,0.004
0.0
0.0,0
1.8,0.18,0.001
0.8,0.0,5,0.005
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
4803.8,0.416667
0.0,0.916667
-10.0,0.916667

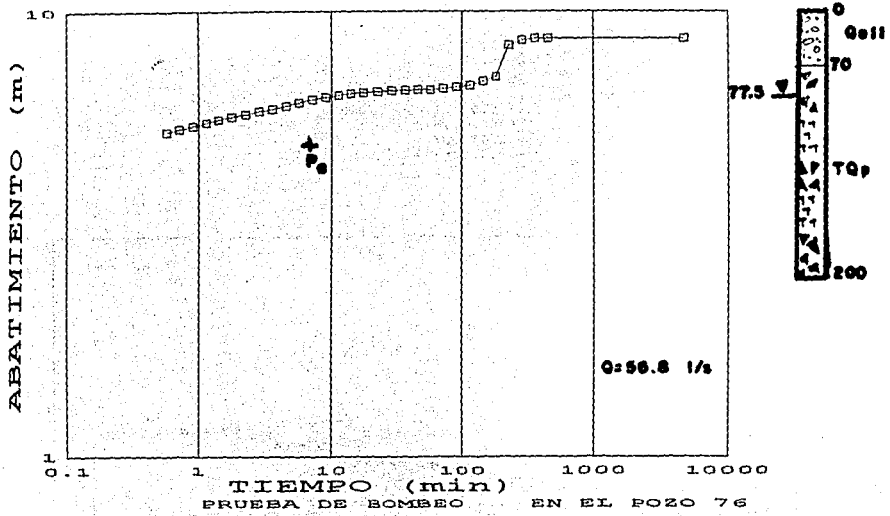
```



— DATOS DE CAMPO P-18

— RESULTADOS DEL MODELO P-18





$$W(u, r/D) = 1.0$$

$$l/u = 10^{-1}$$

$$r/D = 0.2$$

$$s = 1.75 \text{ m}$$

$$t = 45 \text{ s}$$

$$b = 123 \text{ m}$$

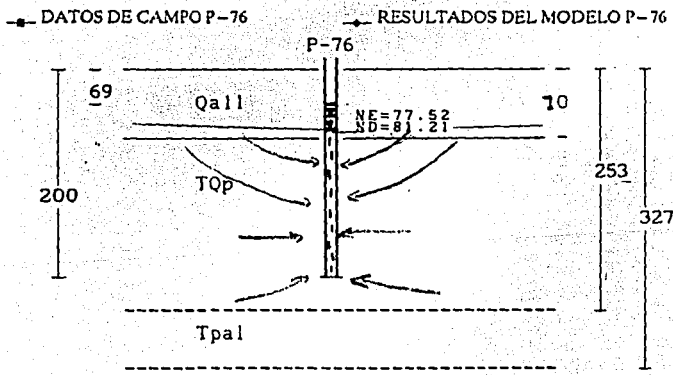
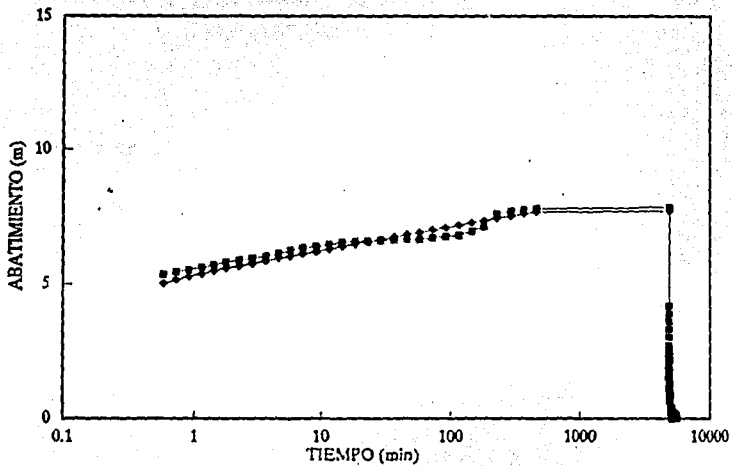
$$T = 2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

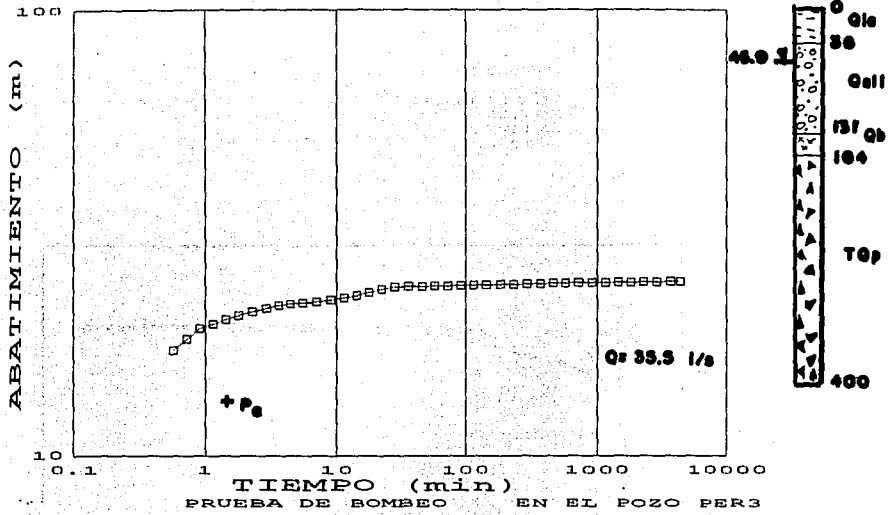
$$K = 2.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

```

0.2,300.0
0.0,0.0,0.0,122.48,122.48,172.48
2
0.0,0.0
6.0,0.6,0.001,0.07
0.8,0.0,0.8,0.005,0.004
0.0
0.0,0.0
6.0,0.6,0.001
0.8,0.0,0.8,0.005
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
4903.2,0.333
0.0,0.8333
-10.0,0.8333

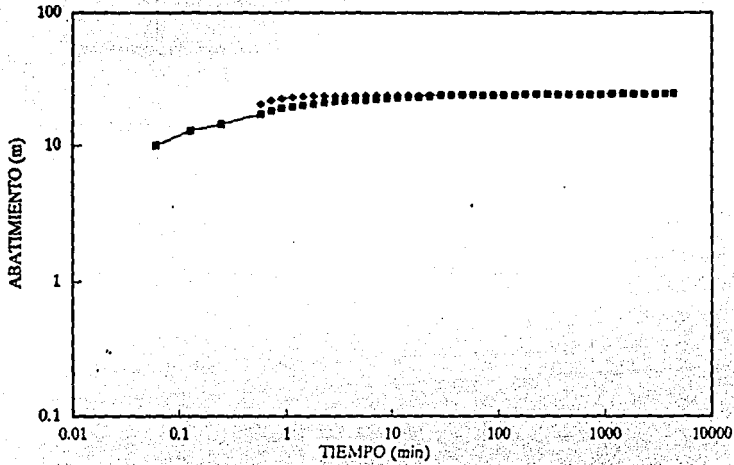
```



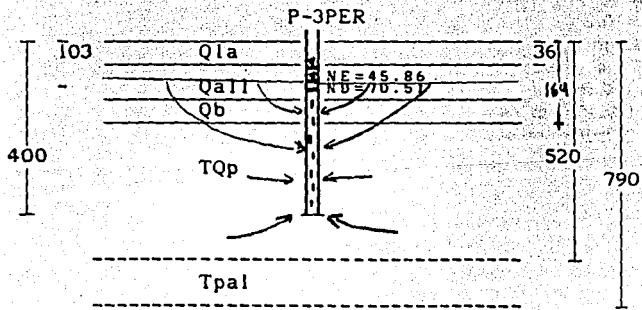


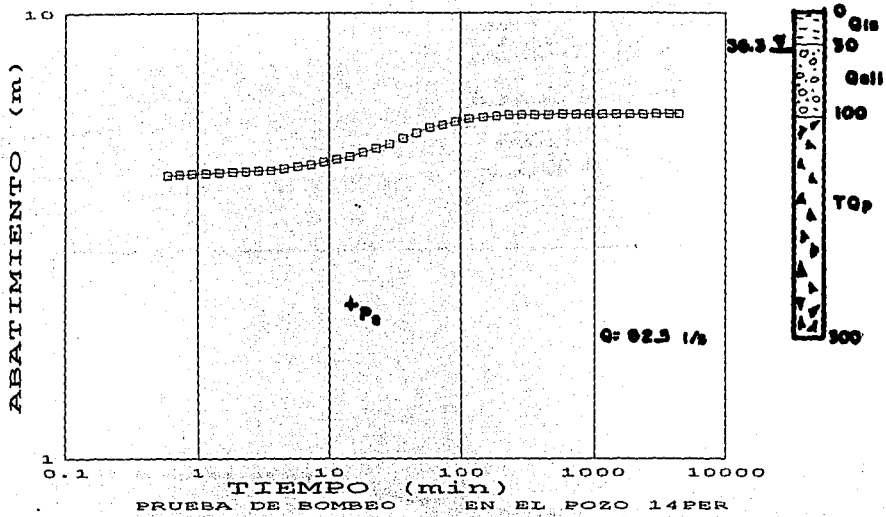
$W(u, r/D) = 2.0$
 $1/u = 10^{-1}$
 $r/D = 0.2$
 $s = 13 \text{ m}$
 $t = 72 \text{ s}$
 $b = 354 \text{ m}^3$
 $T = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 3.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

0.178, 700.0
 0.0, 0.0, 0.0, 118.1, 118.1, 354.1
 2
 0.0, 0.0
 20.0, 2.0, 0.005, 0.17
 0.8, 0.0, 8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 1.0, 0.1, 0.001
 0.8, 0.0, 8, 0.001
 1.0, 1.0, 10.0
 1
 3
 13.0, 130.0, 200.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 3067.2, 3.0
 0.0, 3.6667
 -10.0, 3.6667



■ DATOS DE CAMPO P-3PER ◆ RESULTADOS DE MODELO P-3PER





$$W(u, r/D) = 2.0$$

$$l/u = 10^{-1}$$

$$r/D = 0.1$$

$$s = 2.7 \text{ m}$$

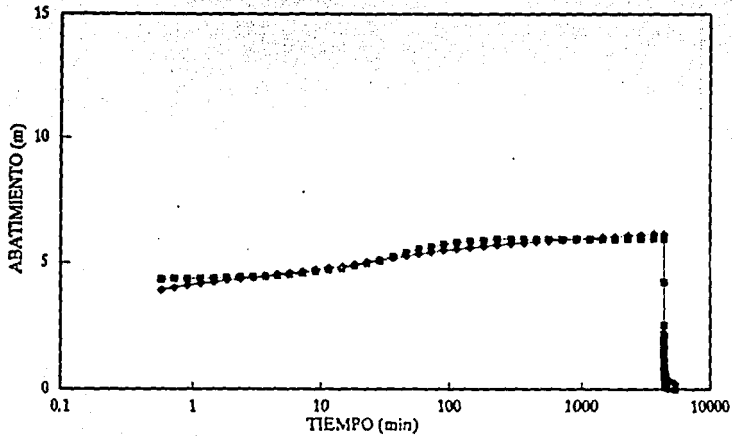
$$t = 1140 \text{ s}$$

$$b = 264 \text{ m}$$

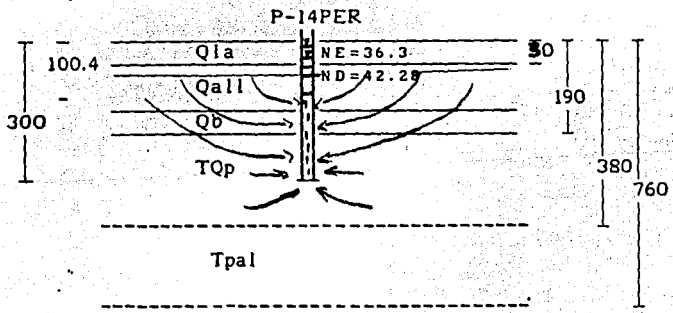
$$T = 3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K = 1.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

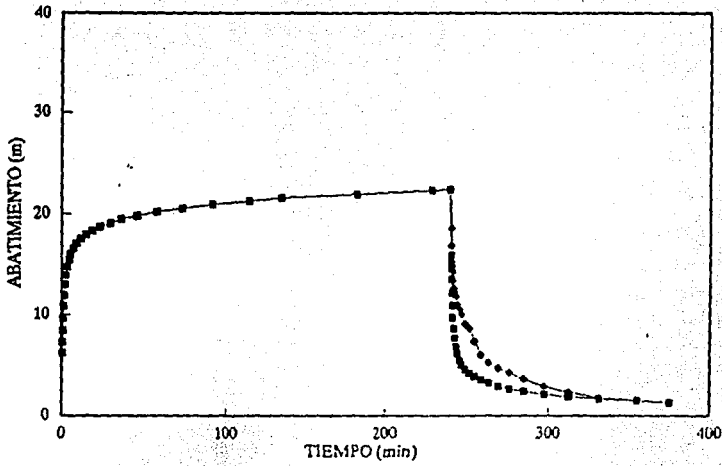
0.122,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.153,7,153.7,263.7
 2
 0.0,0.0
 10.0,1.0,0.005,0.2
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0.0
 1.0,0.1,0.0007
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,10.0,10.0
 3
 3
 18.0,80.0,120.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 5400.0,3.0
 0.0,3.6667
 -10.0,3.6667



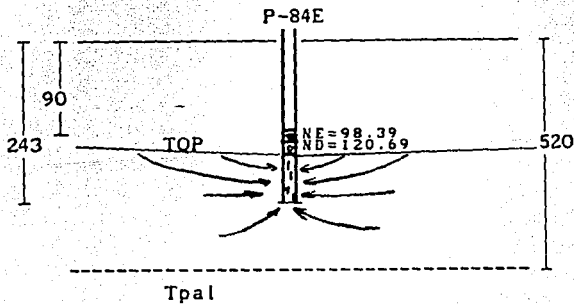
■ DATOS DE CAMPO P-PER14
 ● RESULTADOS DEL MODELO P-14PER



0.15, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 144.6, 144.6, 421.6
 2
 0.0, 0.0
 0.5, 0.05, 0.001, 0.09
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 0.5, 0.05, 0.001
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001
 1.0, 1.0, 1.0
 2
 3
 15.0, 150.0, 400.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 1728, 0.0, 15667
 0.0, 0.26042
 -10.0, 0.26042



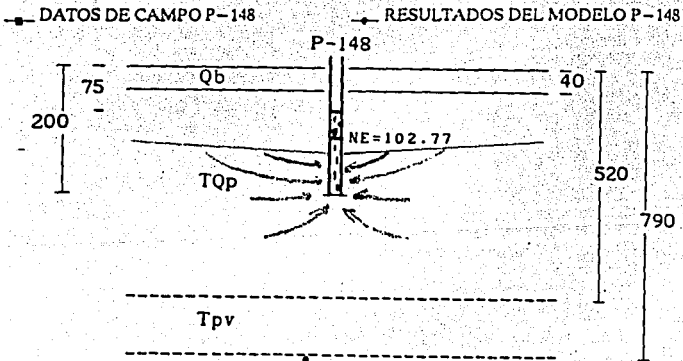
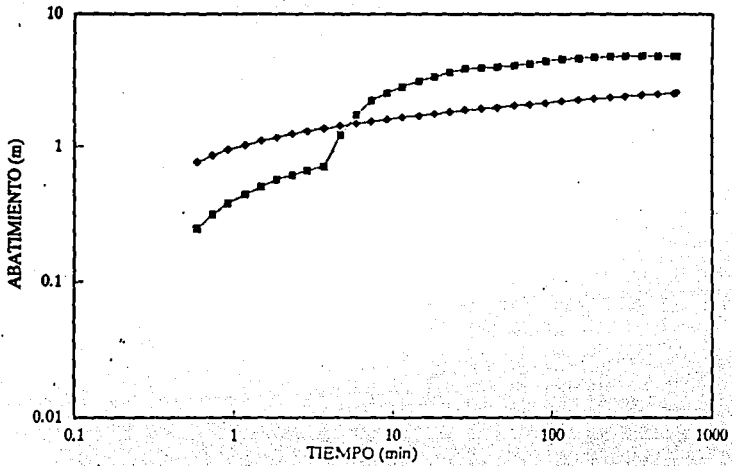
■ RESULTADOS DEL MODELO P-84E ● DATOS DE CAMPO P-84E



```

0.2032,500.0
0.0,0.0,0.0,97.0,97.0,597.0
2
0.0,0.0
2.9,0.29,0.001,0.08
0.8,0.0.8,0.001,0.08
0.0
0.0,0
2.9,0.29,0.001
0.8,0.0.8,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
803.52,0.41667
0.0,0.83333
-10.0,0.83333

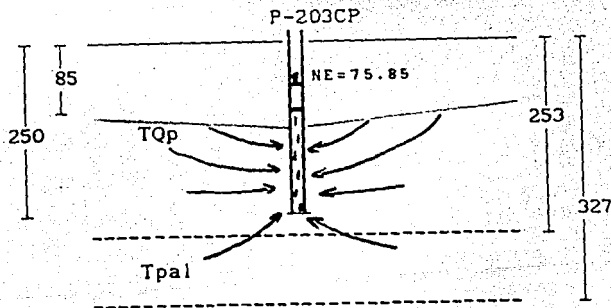
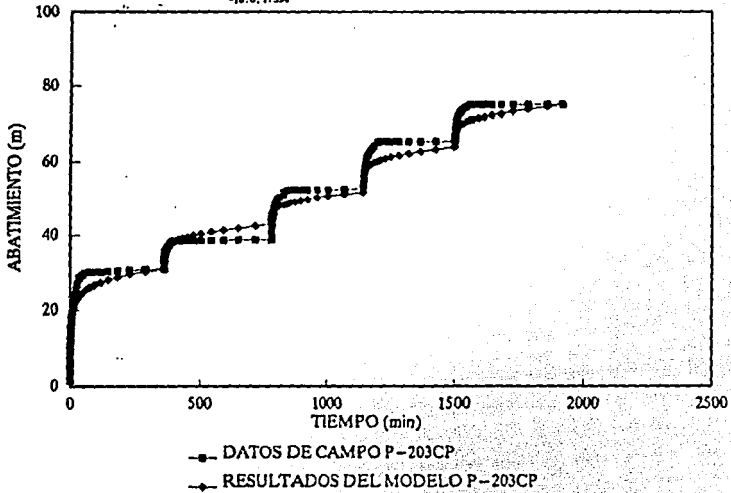
```



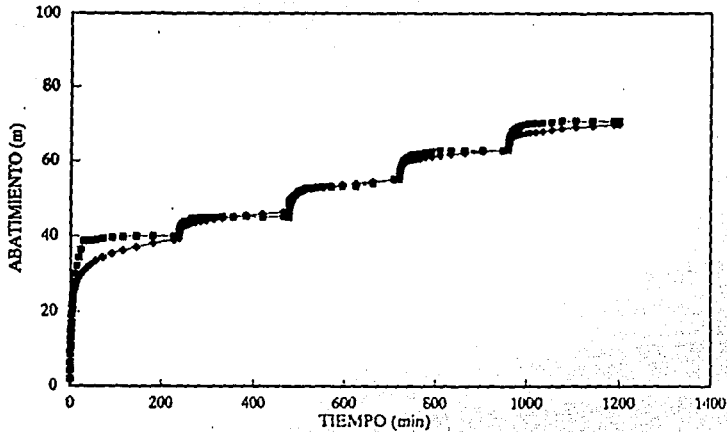
```

0.0,0.0,0.0,177.2,177.2,251.2
2
0.0,0.0
0.48,0.048,0.001,0.01
17.0,1.0,0.01,0.001,0.01
18.0,1.0,0.01,0.001,0.01
19.0,1.0,0.01,0.001,0.01
20.0,1.0,0.01,0.001,0.01
21.0,1.0,0.01,0.001,0.01
22.0,1.0,0.01,0.001,0.01
23.0,1.0,0.01,0.001,0.01
24.0,1.0,0.01,0.001,0.01
25.0,1.0,0.01,0.001,0.01
0.8,0.2,8.0,001,0.08
0.0
0.0,0
3.0,0.3,0.0003
0.8,0.2,8.0,001
1.0,1.0,1.0
2
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0,0
2798.4,0.25
3507.8,0.342
3557.1,0.782
4812.8,1.042
5071.7,1.334
-18.0,1.334

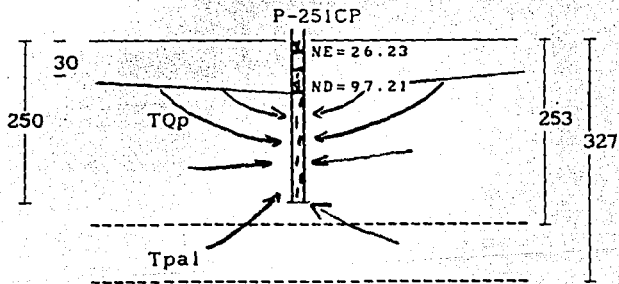
```



0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.226.8,226.8,300.8
 2
 0.0,0.0
 0.65,0.065,0.005,0.07
 0.8,0.0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 5.0,0.5,0.0005
 0.8,0.0.8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 6524.9,0.16667
 7196.3,0.33334
 8099.1,0.5
 8910.4,0.66667
 9534.2,0.83335
 -10.0,0.83335



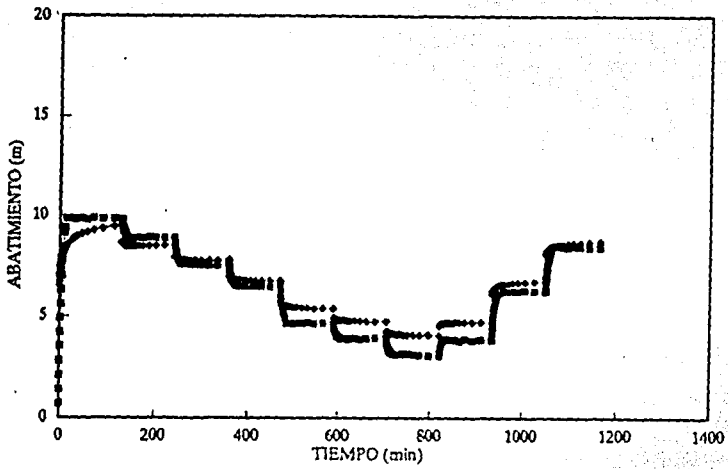
■ DATOS DE CAMPO P-251CP
 ● RESULTADOS DEL MODELO P-251CP



```

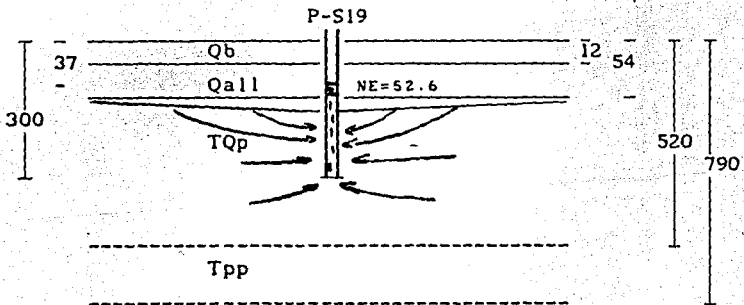
0.2,500.0
0.0,0.0,0.0,248.8,248.8,448.8
1
0.0003,0.0
7.0,0.7,0.001,0.1
0.8,0.0,0.0,001,0.08
0.0
0.0,0
7.0,0.7,0.001
0.8,0.0,0.0,001
1.0,1.0,1.0
1
2
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
14893.0,0.09
13113.0,0.17
14879.0,0.23
10206.0,0.33
8054.0,0.41
7074.0,0.49
3988.0,0.57
7074.0,0.63
10206.0,0.73
13113.0,0.81
-10.0,0.81

```



← DATOS DE CAMPO P-19S

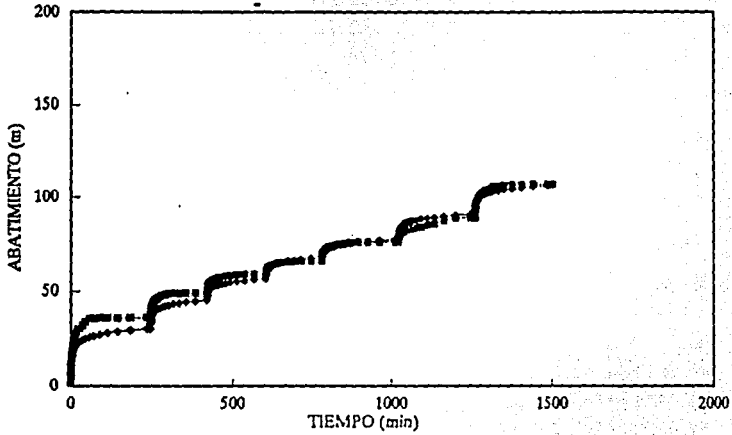
← RESULTADOS DEL MODELO P-19S



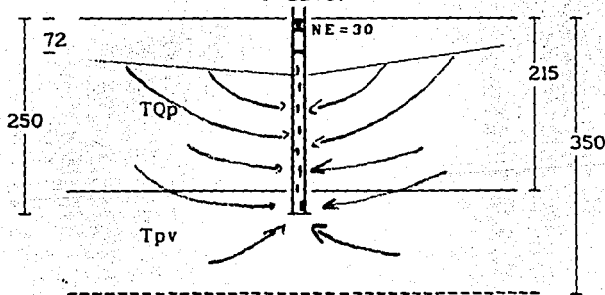

```

0.2,600.0
0.0,0.0,0.0,0.185.0,185.0,220.0
2
0.0,0.0
0.34,0.34,0.005,0.1
0.8,0.0,0.8,0.001,0.08
0.0
0.0,0.0
0.3,0.03,0.0007
0.8,0.0,0.8,0.001
1.0,2.0,1.0
3
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
2376.0,0.16667
3369.6,0.292
4017.6,0.417
4665.6,0.542
5097.6,0.7087
5788.8,0.8747
6566.4,1.0414
-10.0,1.0414

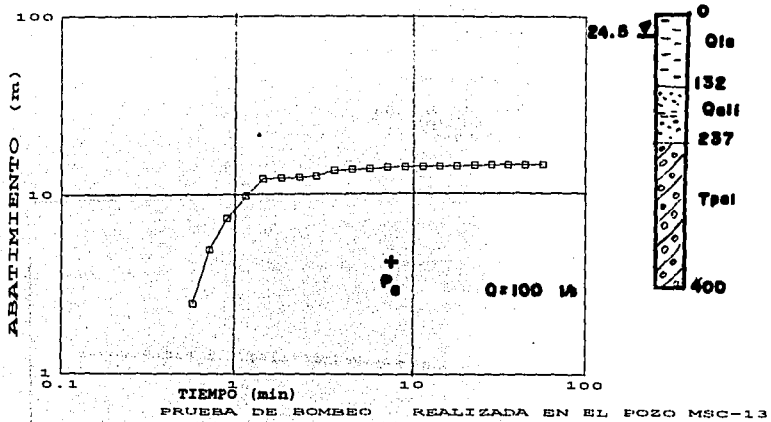
```



-●- DATOS DE CAMPO P-224CP
 -▲- RESULTADOS DEL MODELO P-224CP
 P-224CP

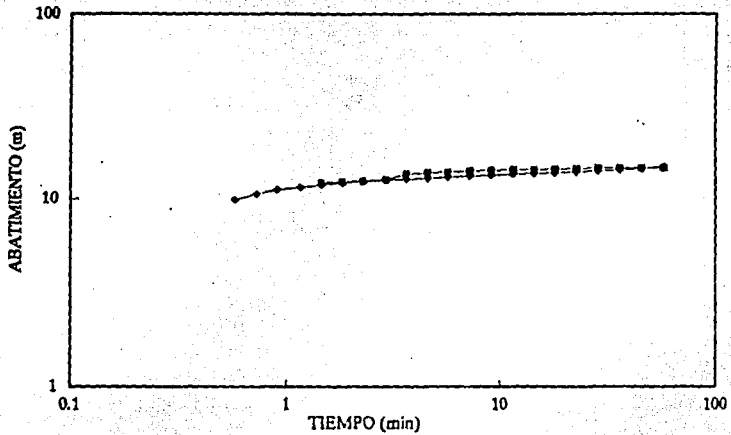


COMPORTAMIENTO SEMICONFINADO-MEDIO GRANULAR

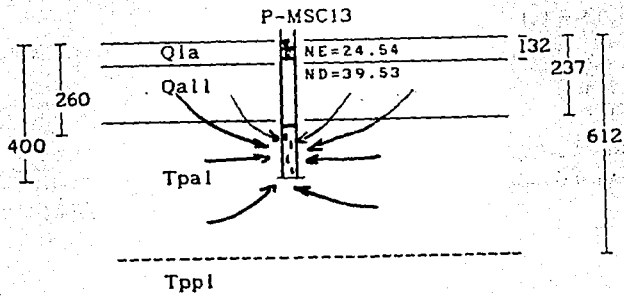


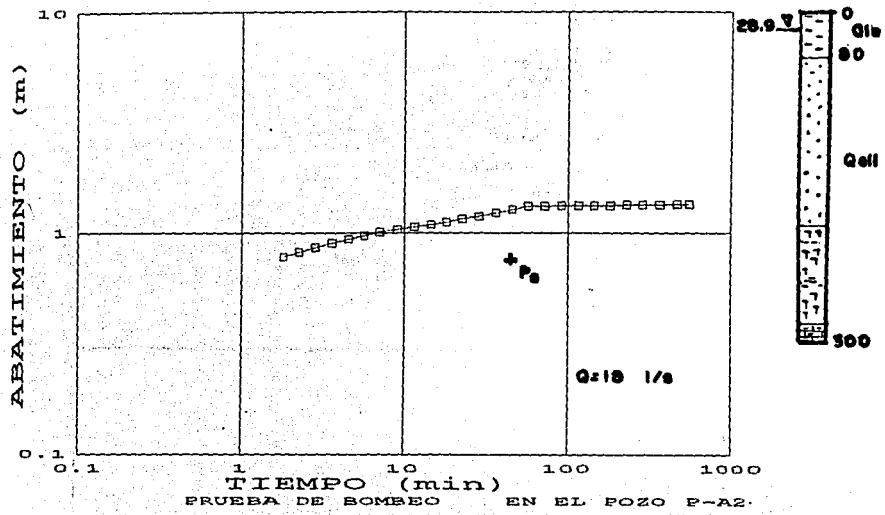
$W(u, r/L) = 0.1$
 $l/u = 10$
 $r/L = 0.9$
 $s = 7.8 \text{ m}$
 $t = 720 \text{ s}$
 $b = 140 \text{ m}$
 $T = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = -7.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

0.2, 300.0
 0.0, 0.0, 131.7, 236.7, 236.7, 399.7
 2
 0.0005, 0.0
 0.5, 0.05, 0.001, 0.15
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 4.2, 0.42, 0.0007
 0.8, 0.0, 8, 0.001
 -1.0, 1.0, 1.0
 1
 3
 20.0, 100.0, 200.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 8640.0, 0.03991
 -10.0, 0.03991



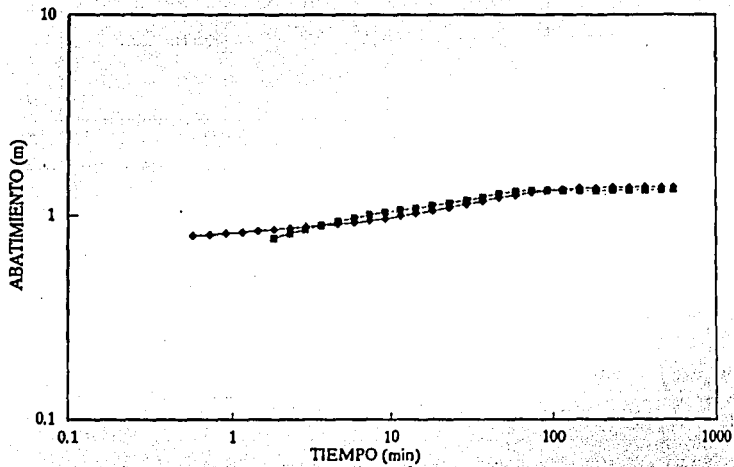
■ DATOS DE CAMPO P-13MS
 ○ RESULTADOS DEL MODELO P-13MS



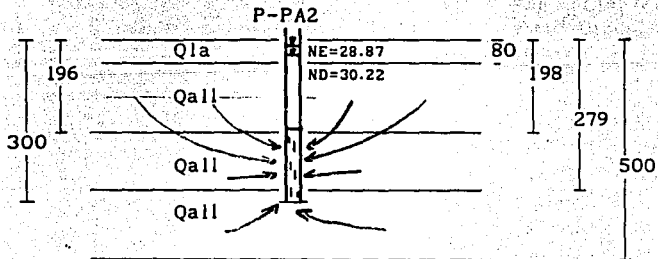


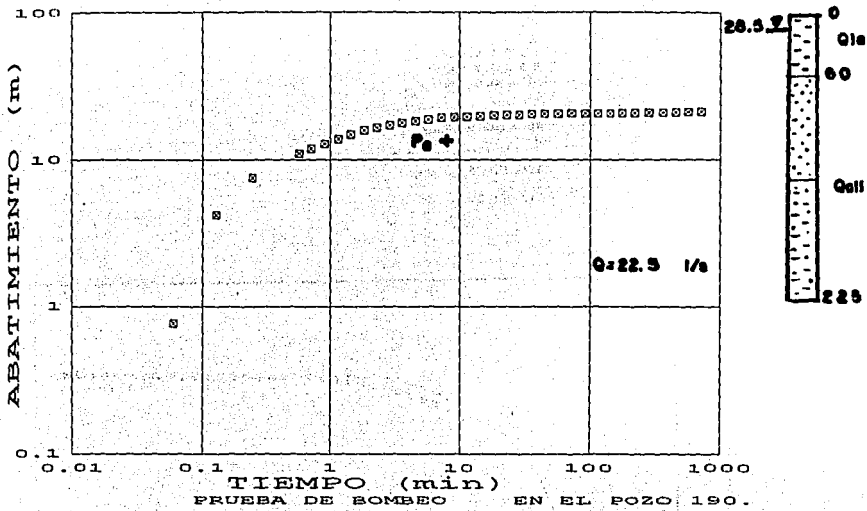
$W(u, r/L) = 2.0$
 $l/u = 10^3$
 $r/L = 0.075$
 $s = 0.7 \text{ m}$
 $t = 2220 \text{ s}$
 $b = 104 \text{ m}$
 $T = 4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 3.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

0.2, 500.0
 0.0, 0.0, 78.0, 196.0, 196.0, 277.0
 2
 0.0005, 0.0
 5.0, 0.0, 5.0, 0.005, 0.15
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0.0
 20.0, 2.0, 0.0, 0.002
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001
 -1.0, 1.0, 1.0
 1
 3
 20.0, 200.0, 400.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 1555.2, 0.375
 -10.0, 0.375



■ DATOS DE CAMPO P 2 ◀ RESULTADOS DEL MODELO P 2



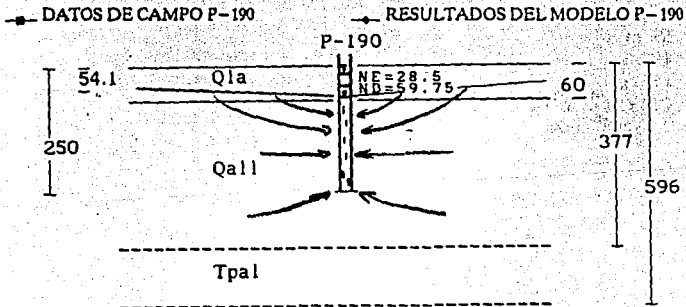
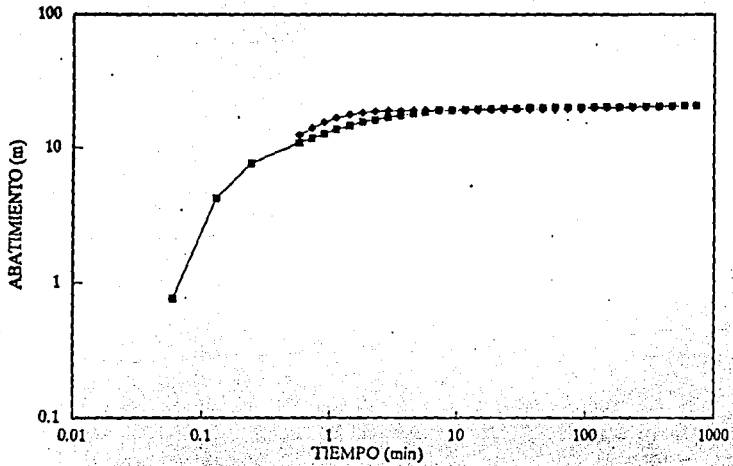


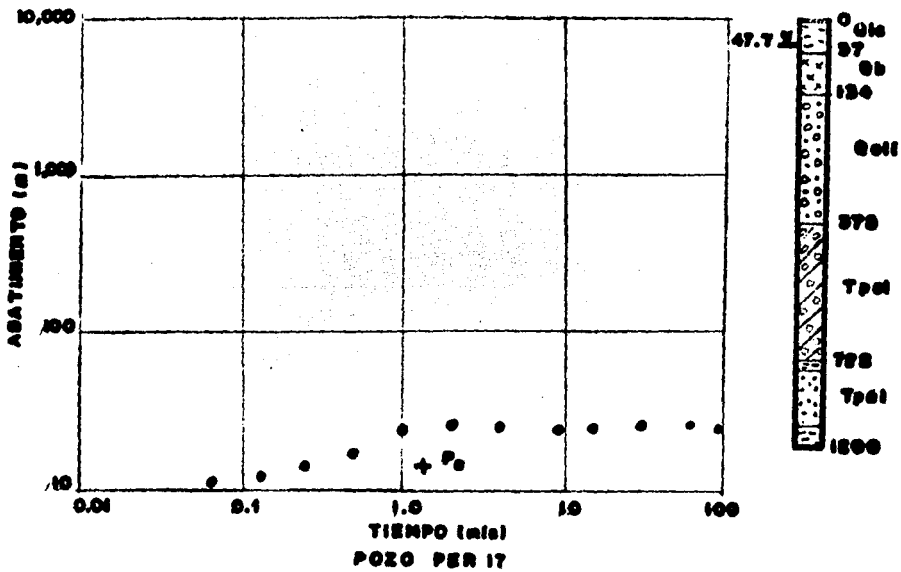
$W(u, r/L) = 2.0$
 $1/u = 10^2$
 $r/L = 0.3$
 $s = 15 \text{ m}$
 $t = 492 \text{ s}$
 $b = 145 \text{ m}$
 $T = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 1.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$


```

0.1,500.0
0.0,0.0,57.5,247.5,247.5,374.5
2
0.0005,0.0
1.0,0.1,0.00037,0.15
0.8,0.0,8,0.001,0.08
0.0
0.0,0
1.0,0.1,0.00037
0.8,0.0,8,0.001
-1.0,10.0,1.0
2
3
10.0,100.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1944,0,0.5
0.0,1.0
-10.0,1.0

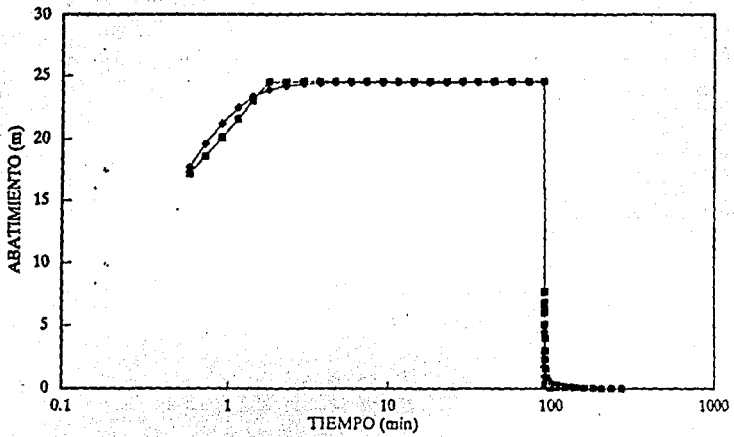
```



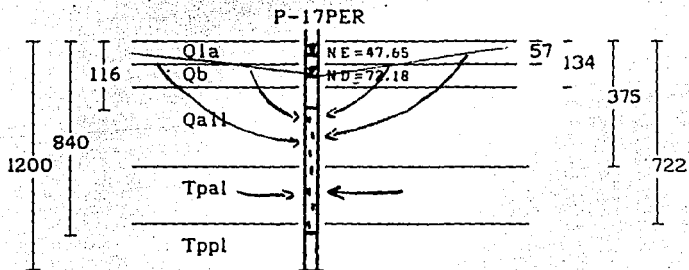


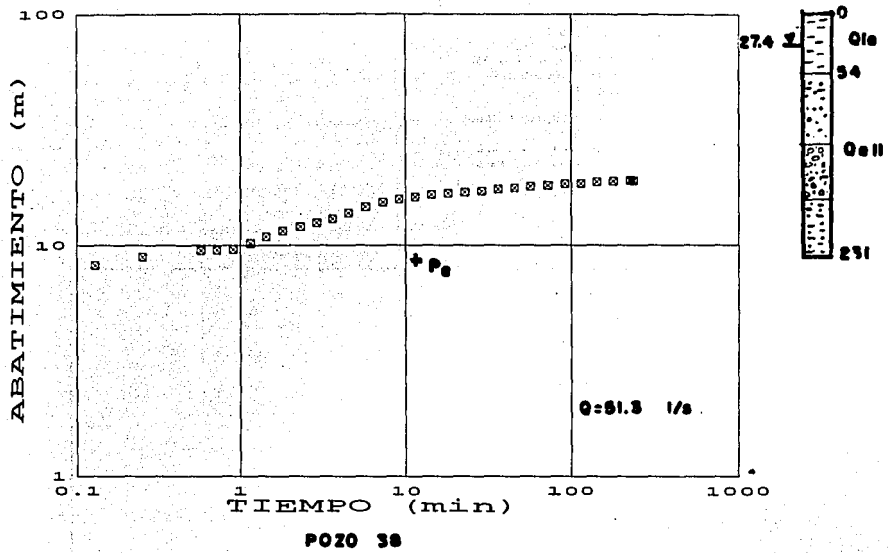
$W(u,r/L)=2.0$
 $1/u=100$
 $r/L=0.2$
 $s=14.5m$
 $r=0.4m$
 $b=0.05m$
 $T=0.00042 m^2/s$
 $K=0.3E-7 m/s$

0.1, 500.0
 0.0, 0.0, 56.0, 374.0, 374.0, 721.0
 2
 0.0005, 0.0
 0.5, 0.05, 0.0007, 0.15
 0.8, 0.0, 8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 0.15, 0.015, 0.0001
 0.8, 0.0, 8, 0.001
 1.0, 10.0, 10.0
 3
 3
 10.0, 100.0, 400.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 3306.5, 0.06225
 0.0, 0.1875
 -10.0, 0.1875



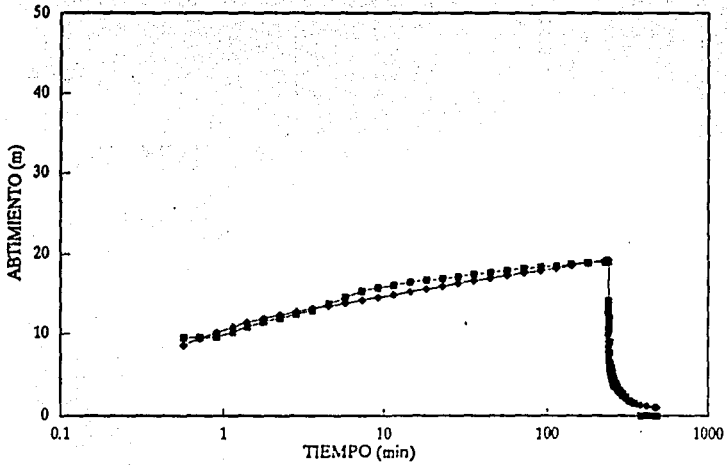
■ DATOS DE CAMPO P-17PER
 ◆ RESULTADOS DEL MODELO P-17PER



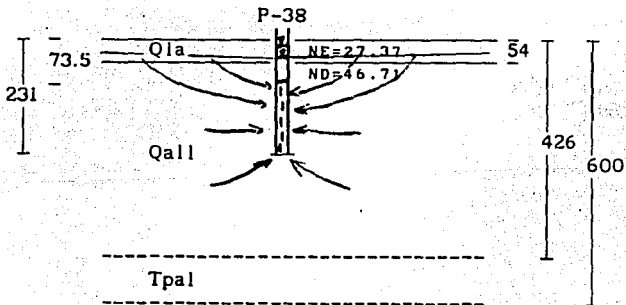


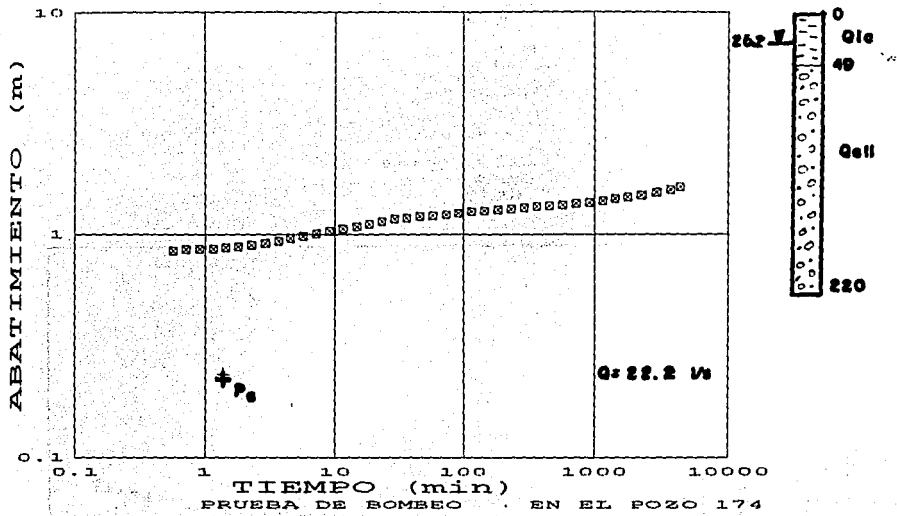
$W(u, r/L) = 2.0$
 $1/u = 10^2$
 $r/L = 0.15$
 $s = 9.5 \text{ m}$
 $t = 750 \text{ s}$
 $b = 177 \text{ m}$
 $T = 8.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 4.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

0.1524, 600.0
 0.0, 0.0, 52.0, 229.0, 229.0, 424.0
 2
 0.0005, 0.0
 1.6, 0.16, 0.0009, 0.15
 0.8, 0.8, 0.001, 0.08
 0, 0
 0, 0, 0
 1.6, 0.16, 0.0009
 0.8, 0.8, 0.001
 -1.0, 1.0, 1.0
 2
 3
 15.0, 150.0, 450.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 4430.59, 0.16667
 0.0, 0.3333
 -10.0, 0.3333

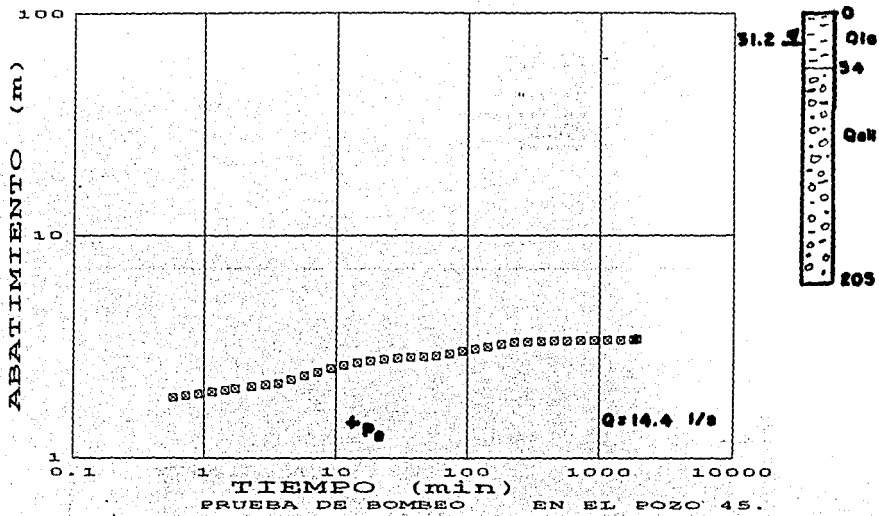


■ DATOS DE CAMPO P-38 ● RESULTADOS DEL MODELO P-38



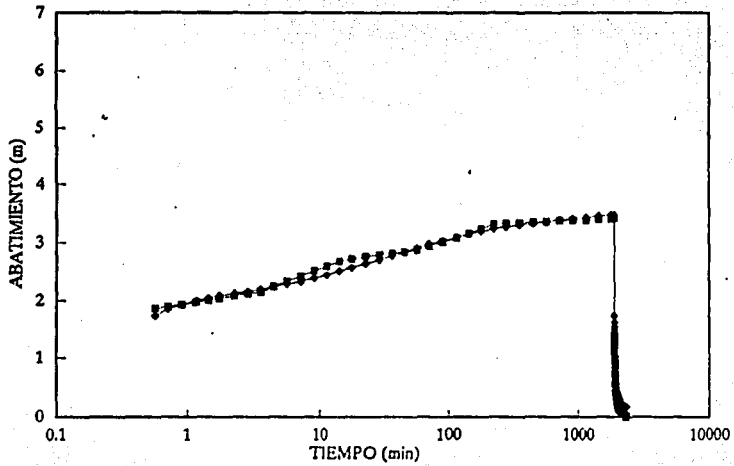


$W(u, r/L) = 1.0$
 $1/u = 10^2$
 $r/L = 0.2$
 $s = 0.3 \text{ m}$
 $t = 69 \text{ s}$
 $b = 171 \text{ m}$
 $T = 5.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 4.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

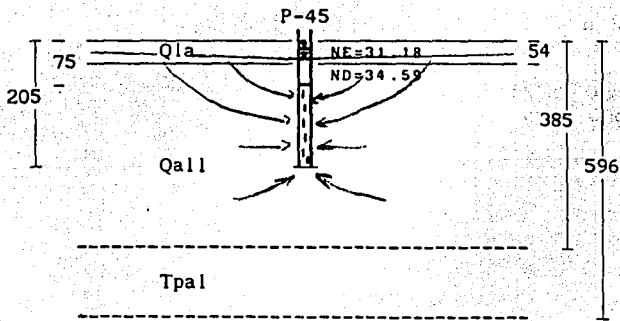


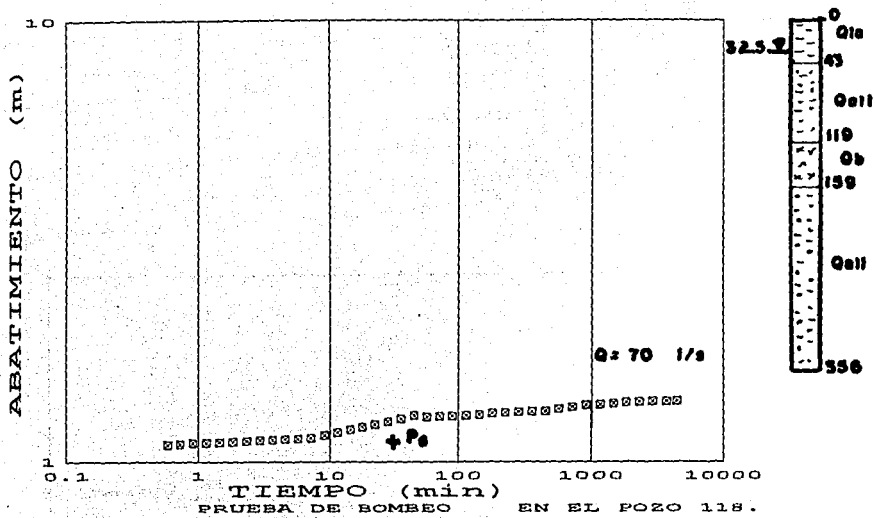
$W(u, r/L) = 2.0$
 $l/u = 10^7$
 $r/L = 0.1$
 $s = 1.42 \text{ m}$
 $t = 660 \text{ s}$
 $b = 151 \text{ m}$
 $T = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 1.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

0.1924, 900.0
 0.0, 0.0, 91.9, 202.9, 202.9, 282.9
 2
 0.0059, 0.0
 3.5, 0.79, 0.001, 0.2
 18.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 19.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 20.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 21.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 22.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 23.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 24.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 25.7, 0.0, 7, 0.002, 0.2
 0.8, 0.0, 8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 3.4, 0.36, 0.001
 0.8, 0.0, 8, 0.001
 -1.0, 2.0, 1.0
 2
 2
 15.0, 190.0, 290.0
 2
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 1244.14, 1.3333
 0.0, 1.4647
 -10.0, 1.4647



■ DATOS DE CAMPO P-45 ◆ RESULTADOS DEL MODELO P-45





$$W(u, r/L) = 0.1$$

$$l/u = 10$$

$$r/L = 2.0$$

$$s = 0.48 \text{ m}$$

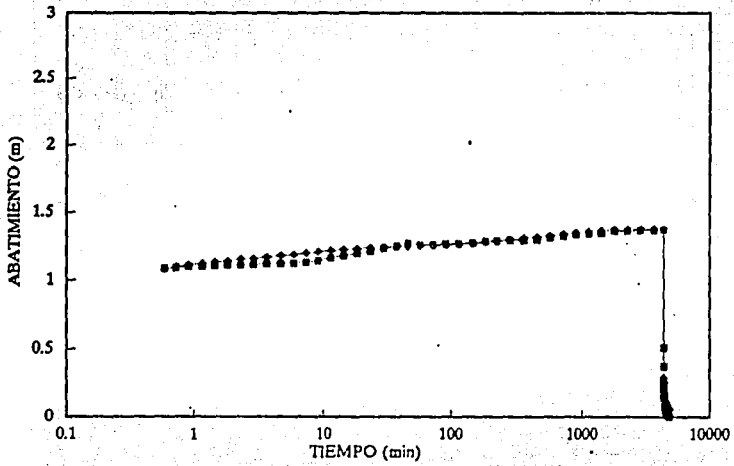
$$t = 330 \text{ s}$$

$$b = 225 \text{ m}$$

$$T = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

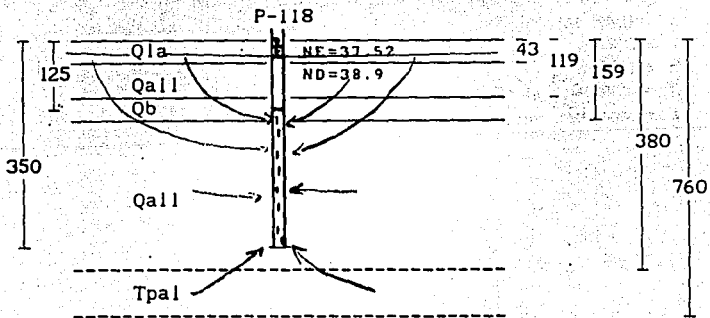
$$K = 5.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

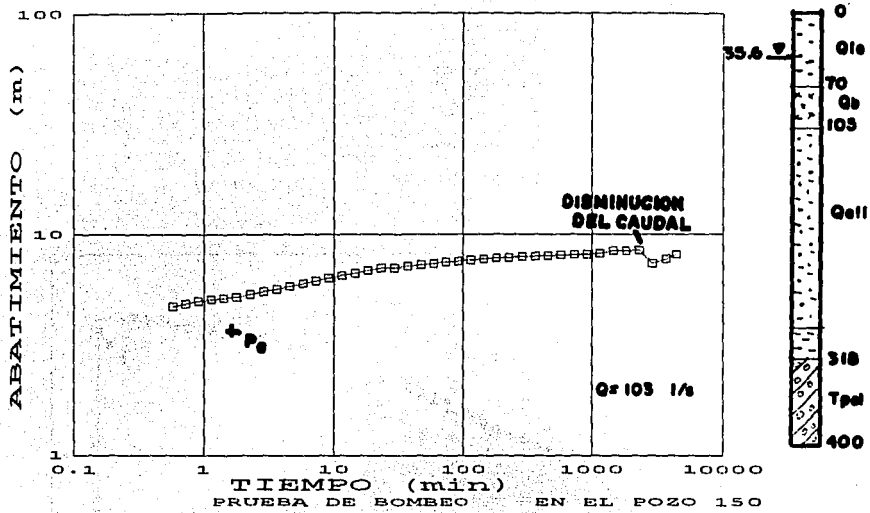
0.18, 700.0
 0.0, 0.0, 36.0, 378.0, 378.0, 758.0
 2
 0.0005, 0.0
 19.0, 1.9, 0.005, 0.15
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 1.9, 1.9, 0.0005
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001
 1.0, 3.0, 1.0
 2
 3
 18.0, 180.0, 500.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 6018.62, 3.0
 0.0, 3.3333
 -10.0, 3.3333



■ DATOS DE CAMPO P-118

◀ RESULTADOS DEL MODELO P-118





$$W(u, r/L) = 2.0$$

$$1/u = 10^3$$

$$r/L = 0.1$$

$$s = 3.5 \text{ m}$$

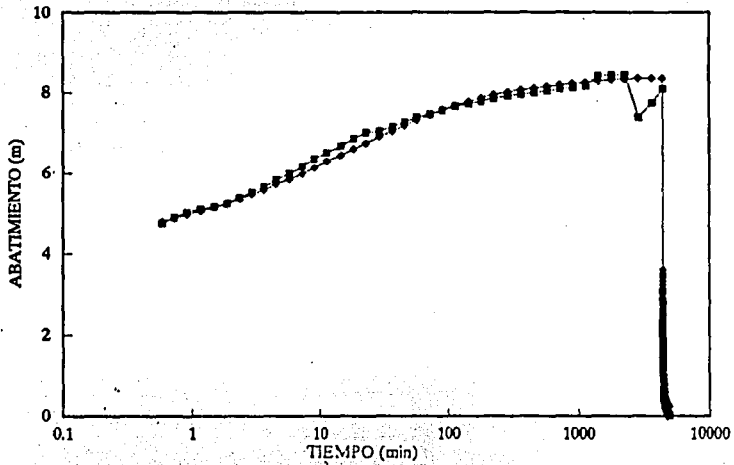
$$t = 87 \text{ s}$$

$$b = 298 \text{ m}$$

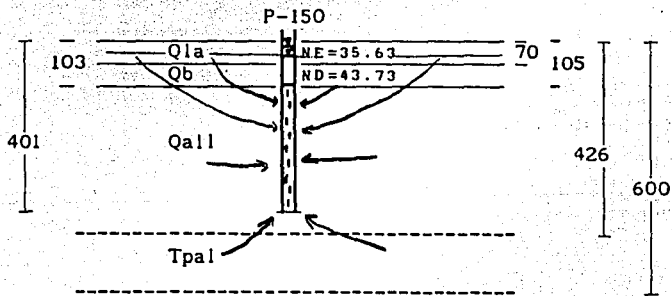
$$T = 4.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

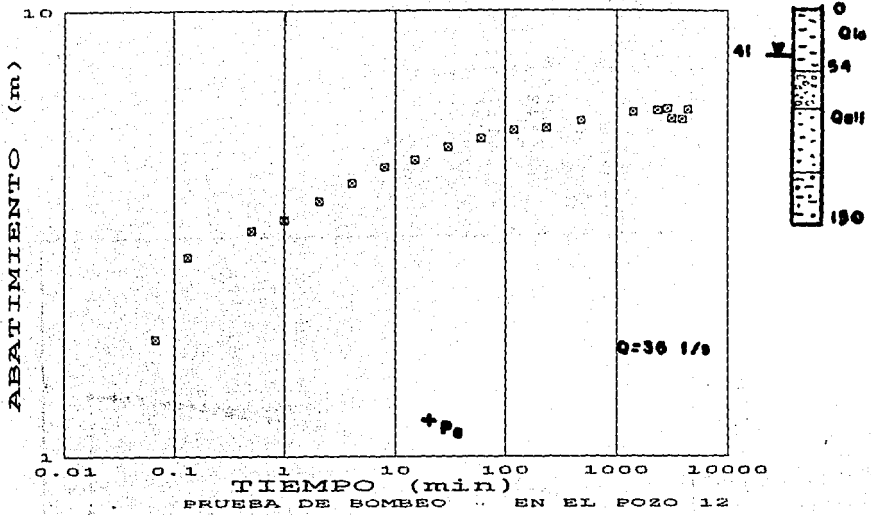
$$K = 1.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

0.122,700.0
 0.0,0.0,68.5,424.5,424.5,598.5
 2
 0.0005,0.0
 4.5,0.45,0.0007,0.1
 21,8,0,0.8,0.0033,0.1
 22,8,0,0.8,0.0033,0.1
 23,8,0,0.8,0.0033,0.1
 24,8,0,0.8,0.0033,0.1
 25,8,0,0.8,0.0033,0.1
 0,8,0,0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0
 2.0,0.2,0.0004
 0,8,0,0.8,0.001
 -1.0,1.0,1.0
 2
 3
 12.0,120.0,500.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 8865,5,3,0
 0.0,3.3333
 -10.0,3.3333



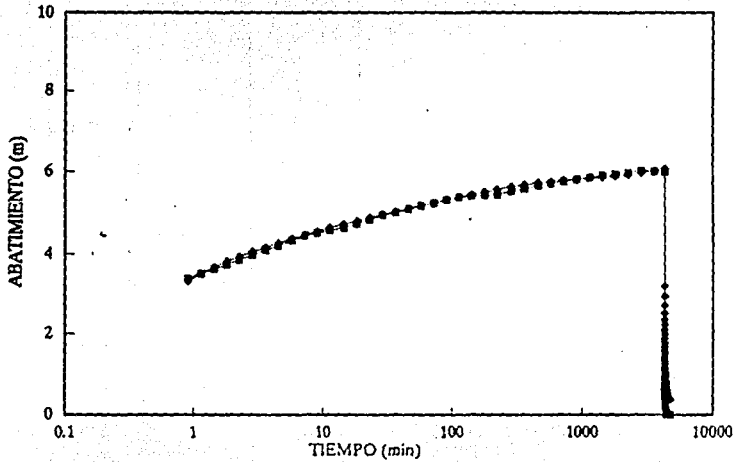
■ DATOS DE CAMPO P-150 ▲ RESULTADOS DEL MODELO P-150



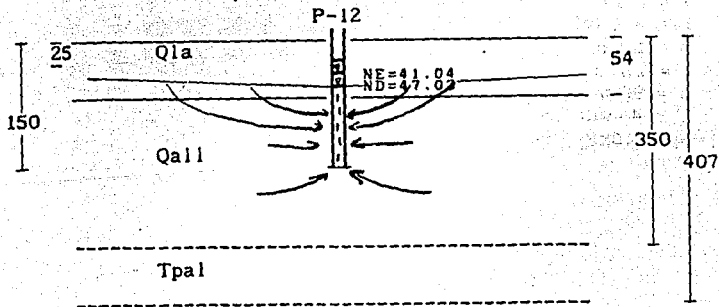


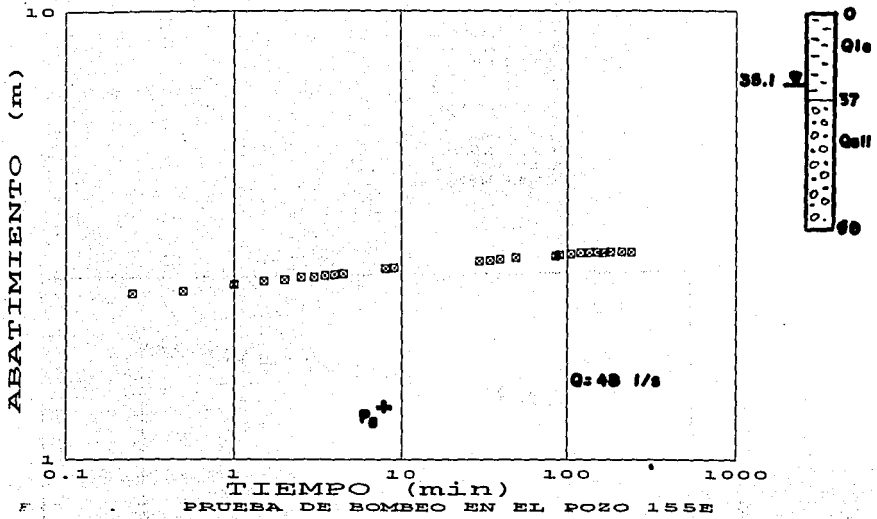
$W(u, r/L) = 2.0$
 $1/u = 10^3$
 $r/L = 0.015$
 $s = 1.3 \text{ m}$
 $t = 192 \text{ s}$
 $b = 96 \text{ m}$
 $T = 4.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

0.2032, 700.0
 0.0, 0.0, 52.0, 148.0, 148.0, 348.0
 2
 0.0005, 0.0
 8.0, 0.8, 0.004, 0.15
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 8.0, 0.8, 0.004
 0.8, 0.0, 8.0, 0.001
 -1.0, 3.0, 1.0
 2
 3
 20.0, 200.0, 400.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 3115.07, 3.0
 0.0, 3.3333
 -10.0, 3.3333



■ DATOS DE CAMPO P-12 ● RESULTADOS DEL MODELO P-12



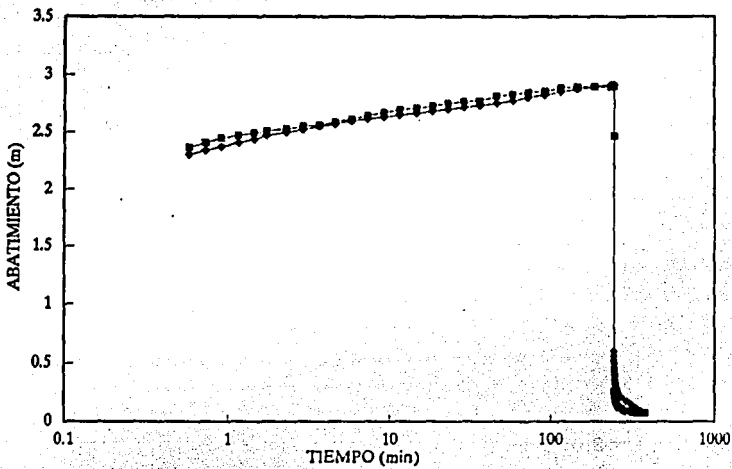


$W(u, r/L) = 3.0$
 $1/u = 10^3$
 $r/L = 0.05$
 $s = 1.25 \text{ m}$
 $t = 59 \text{ s}$
 $b = 53 \text{ m}$
 $T = 9.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $K = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

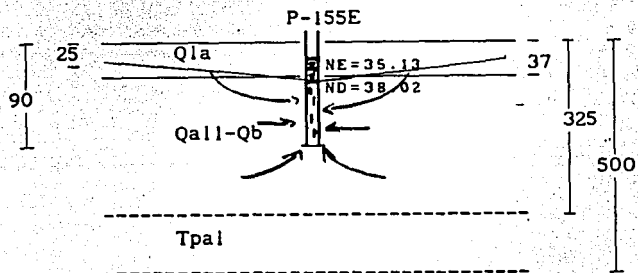

```

0.2,500.0
0.0,0.0,0.0,0.0,54.9,54.9,289.9
2
0.0,0.0
315.0,31.5,0.005,0.2
0.8,0.0,0.8,0.001,0.08
0.0
0.0,0
315.0,31.5,0.005
0.8,0.0,0.8,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
41378.6,0.16667
0.0,0.24042
-10.0,0.24042

```



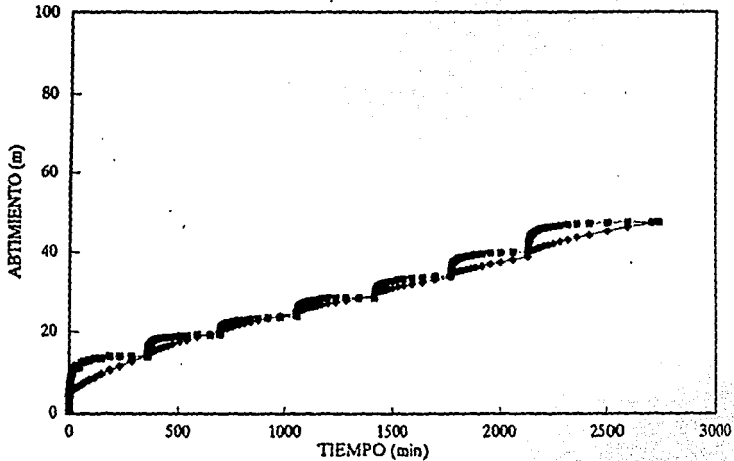
DATOS DE CAMPO P-155E
 RESULTADOS DEL MODELO P-155E



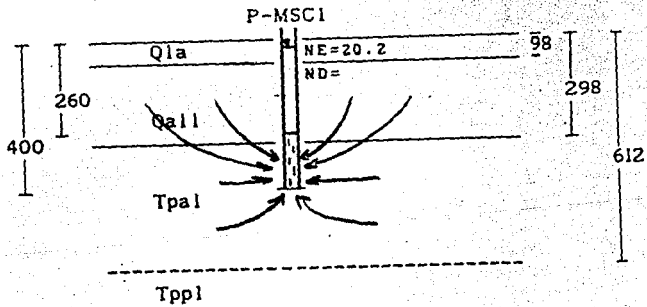
```

0.18,1000.0
0.0,0.0,97.7,297.7,297.7,299.7
3
0.0009,0.0
0.1,0.01,0.001,0.1
0.8,0.0,8,0.001,0.08
0.0
0.0,0,-,8
7,0,0,7,0,0002
0.8,0,0,8,0,001
-1,0,1,0,1,0
1
3
20,0,100,0,200,0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
6739.2,0.23
7603.2,0.48
8284.0,0.73
9138.0,0.98
10195.0,1.23
11106.0,1.48
12132.0,1.7
-10.0,1.9

```



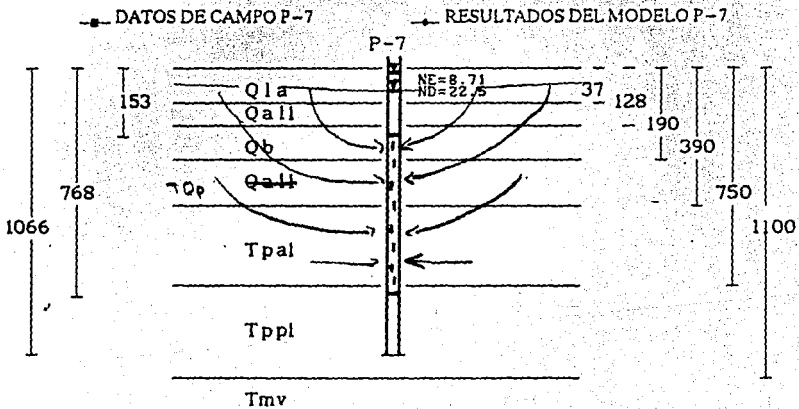
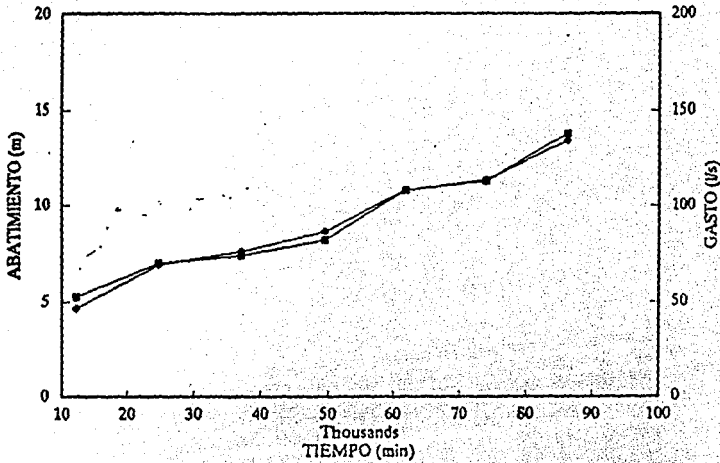
—■— DATOS DE CAMPO P-1MS
—●— RESULTADOS DEL MODELO P-1MS



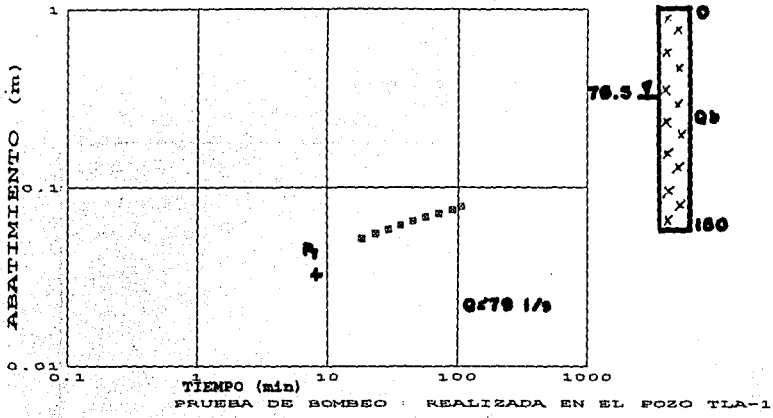
```

0.17,1000.0
0.0,0.0,34.9,287.9,287.9,747.5
7
0.0000,0.0
4.0,0.4,0.001,0.2
0.0,0.0,0.0,0.001,0.00
0.0,0
1.3,0.19,0.0001
0.0,0.0,0.0,0.001
-1.0,1.0,1.0
3
7
17.0,170.0,700.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
3987.9,0.14289
8640.0,0.28371
9221.0,0.42857
10288.0,0.57143
12860.0,0.71429
13295.9,0.85714
15888.9,1.0
-10.0,1.0

```

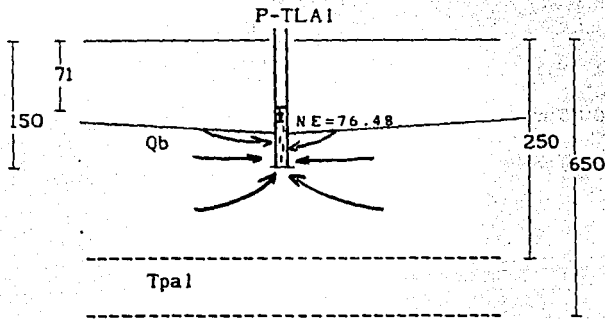
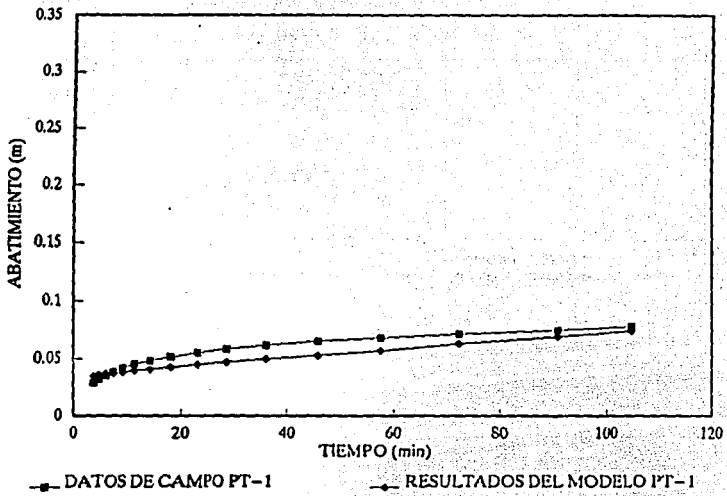


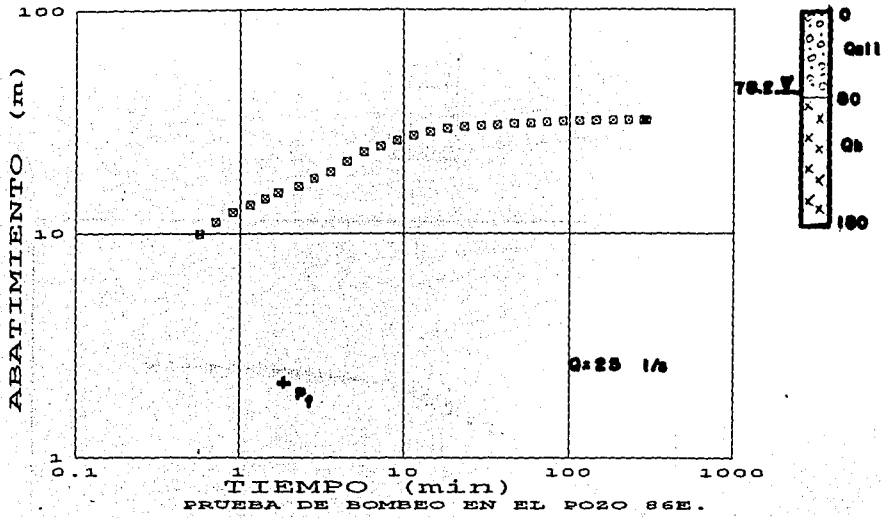
COMPORTAMIENTO LIBRE-MEDIO FRACTURADO



$W(r, \theta_1) = 0.1$
 $\theta_1 = 10^{-2}$
 $s_1 = 0.0045 \text{ m}^2$
 $t_1 = 480 \text{ s}$
 $"Tr" = 0.14 \text{ m}^2/\text{s}$

0.13,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.73.5,73.5,173.4
 2
 0.0,0.0
 2500.0,250.0,0.005,0.06
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 2500.0,250.0,0.005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 13.0,130.0,390.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 6825.6,0.0729
 -10.0,0.0729



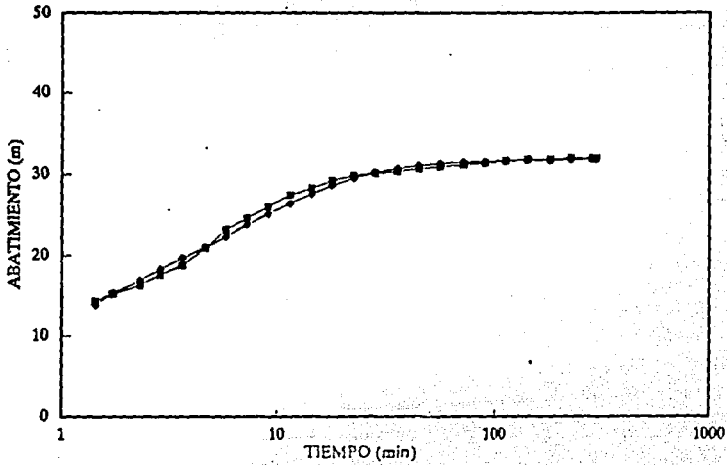


$W(r, \theta_1) = 0.1$
 $\theta_1 = 0.01$
 $s_1 = 2.3 \text{ m}$
 $t_1 = 255 \text{ s}$
 $"T_r" = 8.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

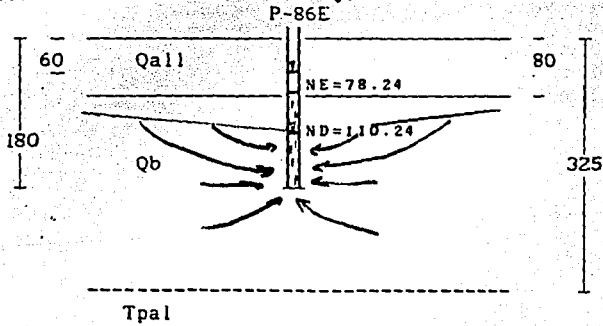
```

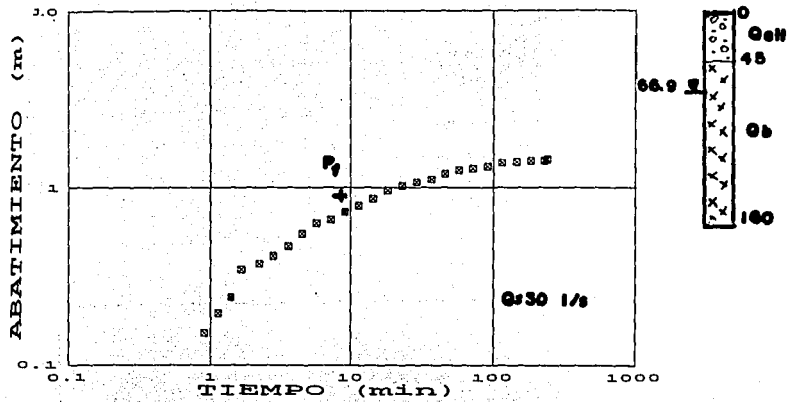
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
2
0.0,0.0
1.0,0.1,0.001,0.07
10.2,0.2,0.001,0.07
11.2,0.2,0.001,0.07
12.2,0.2,0.001,0.07
13.2,0.2,0.001,0.07
14.2,0.2,0.001,0.07
15.2,0.2,0.001,0.07
16.2,0.2,0.001,0.07
17.2,0.2,0.001,0.07
18.2,0.2,0.001,0.07
19.2,0.2,0.001,0.07
20.2,0.2,0.001,0.07
22.2,0.2,0.001,0.07
23.2,0.2,0.001,0.07
24.2,0.2,0.001,0.07
0.4,0.4,0.001,0.06
0.0
0.0
1.0,0.1,0.001
0.4,0.4,0.001
1.0,10.0,1.0
2
3
18.0,180.0,600.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
210.0,0.20833
-10.0,0.20833

```



DATOS DE CAMPO P-86E
 RESULTADO DEL MODELO P-86E





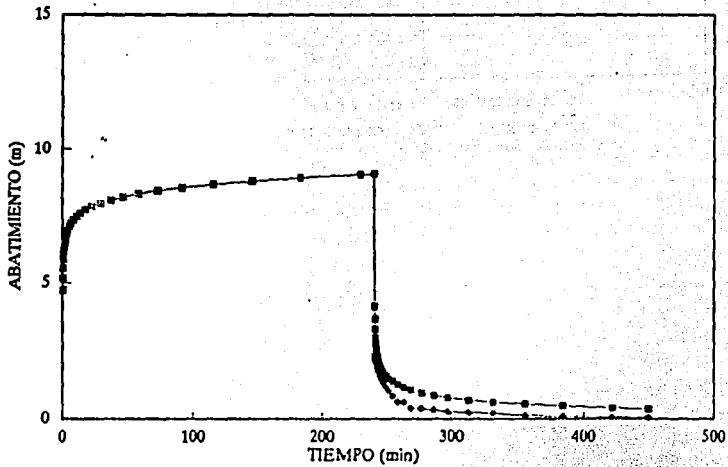
POZO DE OBSERVACION 93E
 PRUEBA DE BOMBEO EN LOS POZOS 92E Y 93E.

$W(r, \theta_1) = 1.0$
 $\theta_1 = 0.1$
 $s_1 = 0.83 \text{ m}$
 $t_1 = 564 \text{ s}$
 $r = 31.8 \text{ m}$
 $"T_f" = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
 $"S_f" = 0.065$

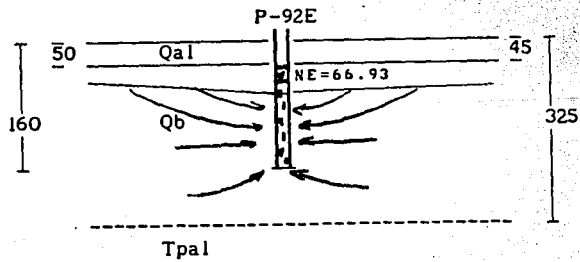
```

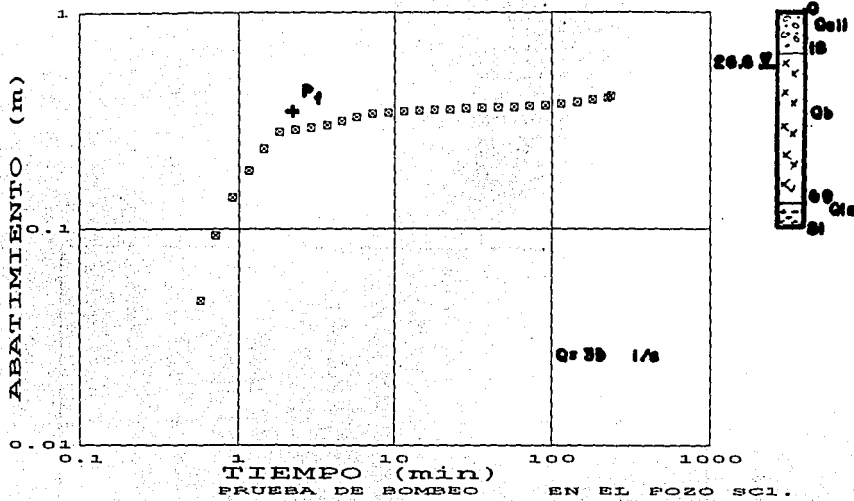
0.15,500.0
0.0,0.0,0.0,0.93,1.93,1.258,1
2
0.0,0.0
6.2,0.62,0.001,0.1
0.8,0.0,8.0,0.001,0.08
0.0
0.0,0.0
6.2,0.62,0.001
0.8,0.0,8.0,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
15.0,150.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0,0
2592,0,0.16667
0.0,0.3125
-10.0,0.3125

```



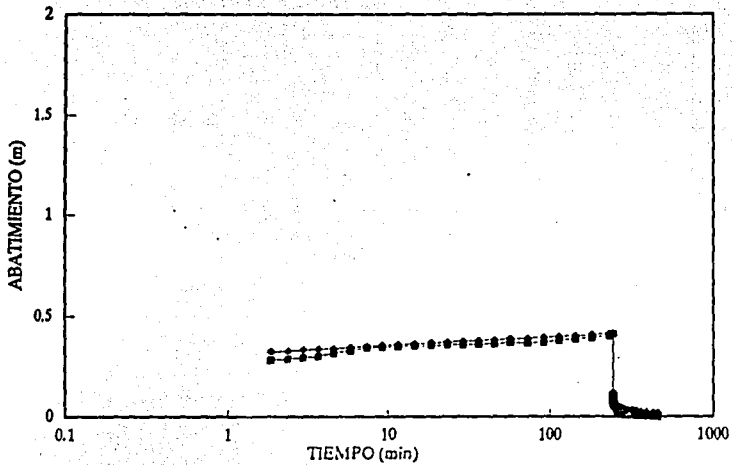
■ RESULTADOS DEL MODELO P-92E ● DATOS DE CAMPO P-92E



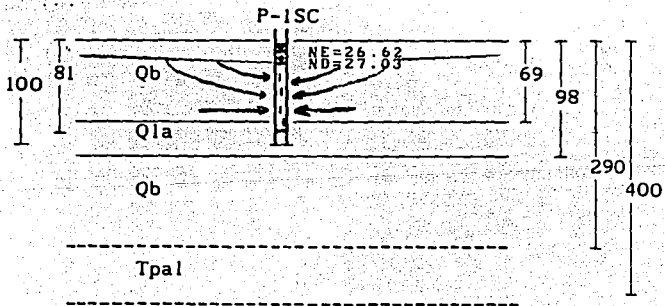


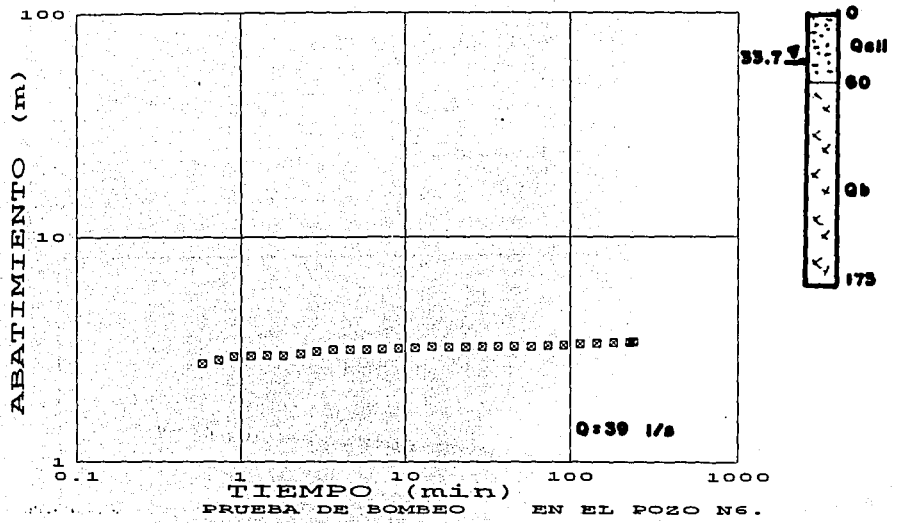
$W(r, \theta_1) = 1.0$
 $\theta_1 = 0.01$
 $s_1 = 0.34 \text{ m}$
 $t_1 = 240 \text{ s}$
 $"Tr" = 8.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

0.178,300.0
 0.0,0.0,0.0,42.4,71.4,263.4
 2
 0.0,0.0
 320.0,32.0,0.001,0.07
 0.8,0.0,8.0,0.001,0.08
 0.0005
 0;0.0
 320.0;32.0,0.001
 0.8,0.0,8.0,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 18.0,180.0,250.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 3049.92,0.16667
 0.0,0.31250
 -10.0,0.31250



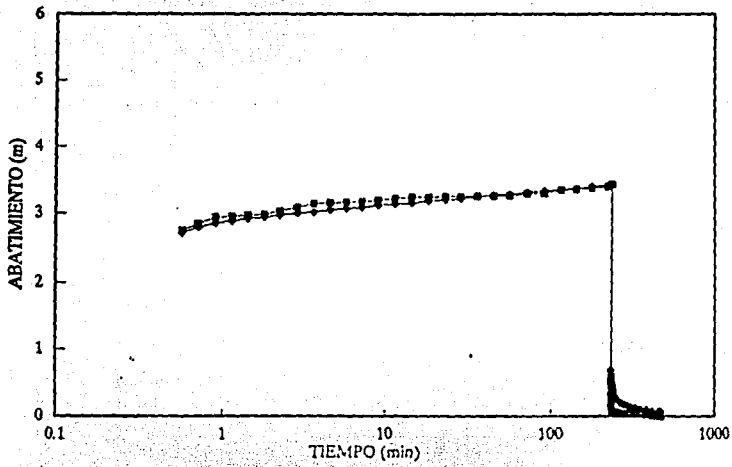
■ DATOS DE CAMPO P-ISC ● RESULTADOS DEL MODELO P-ISC



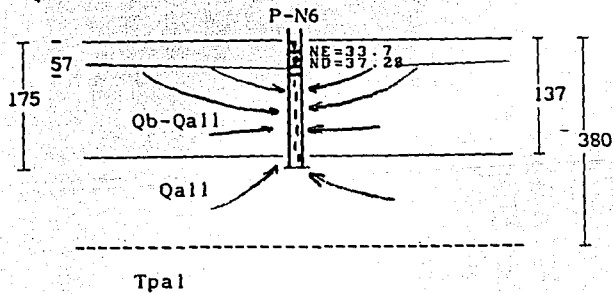


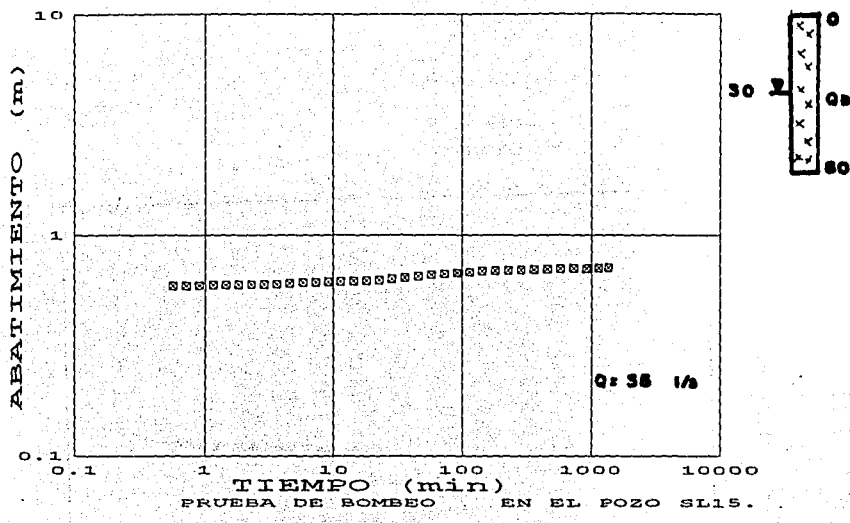
NO INTERPRETABLE

0.15, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 103.3, 103.3, 346.3
 2
 0.0, 0.0
 10.0, 1.0, 0.001, 0.15
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0005
 0.0, 0.0
 2.0, 0.2, 0.001
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001
 1.0, 1.0, 1.0
 2
 3
 15.0, 150.0, 350.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 3352.32, 0.16667
 0.0, 0.3333
 -10.0, 0.3333



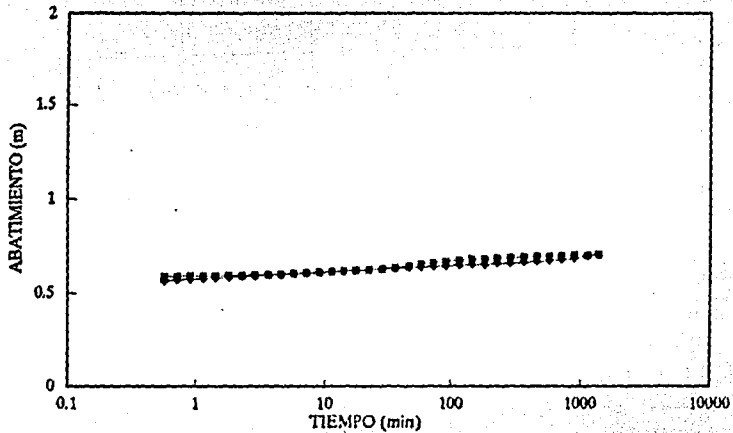
■ DATOS DE CAMPO P-6N ← RESULTADOS DEL MODELO P-6N



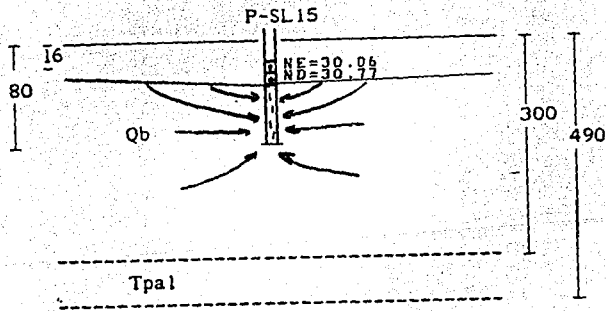


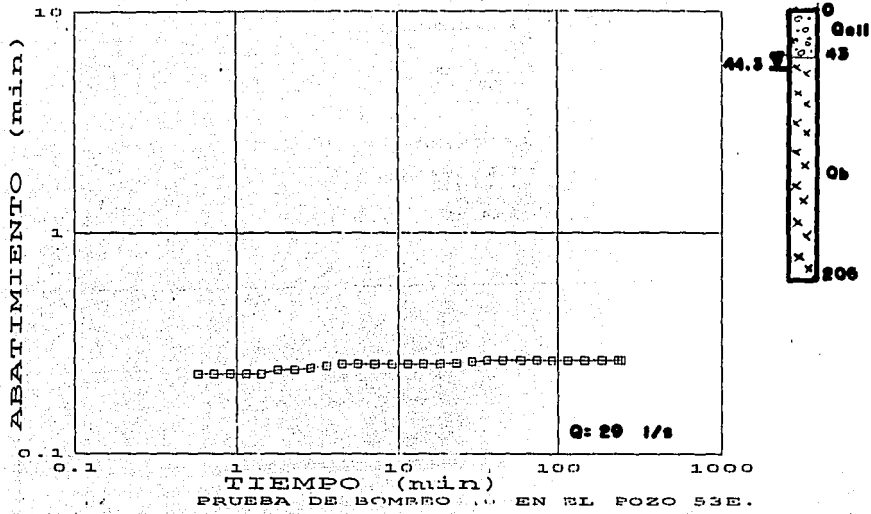
NO INTERPRETABLE

0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,50.0,50.0,270.0
 2
 0.0,0.0
 100.0,10.0,0.001,0.1
 0.8,0.0,0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 100.0,10.0,0.001
 0.8,0.0,0.8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,100.0,200.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 2985.6,0.95833
 0.0,1.04166
 -10.0,1.04166



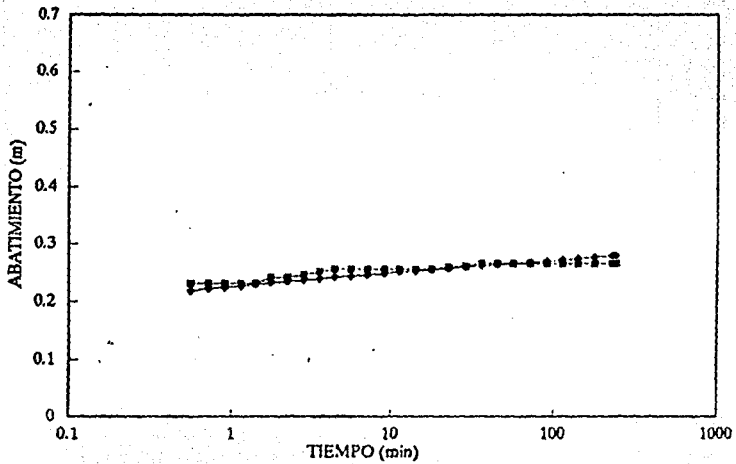
■ DATOS DE CAMPO P-15SL
 ▲ RESULTADOS DEL MODELO P-15SL



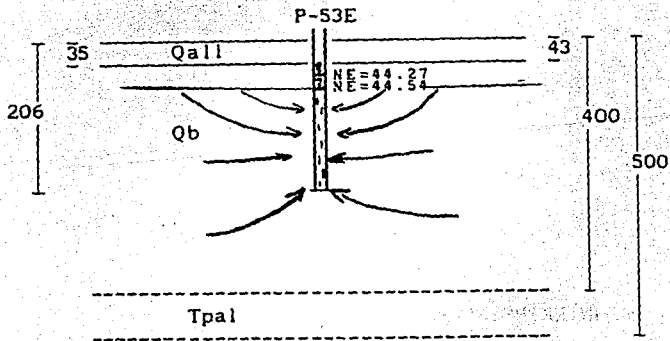


NO INTERPRETABLE

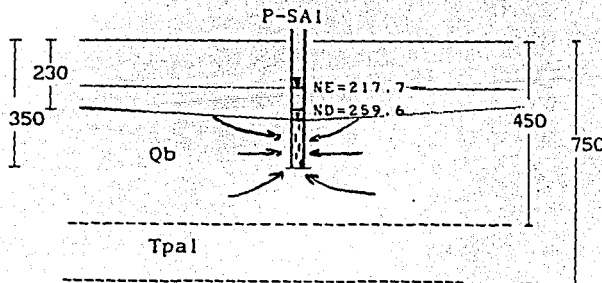
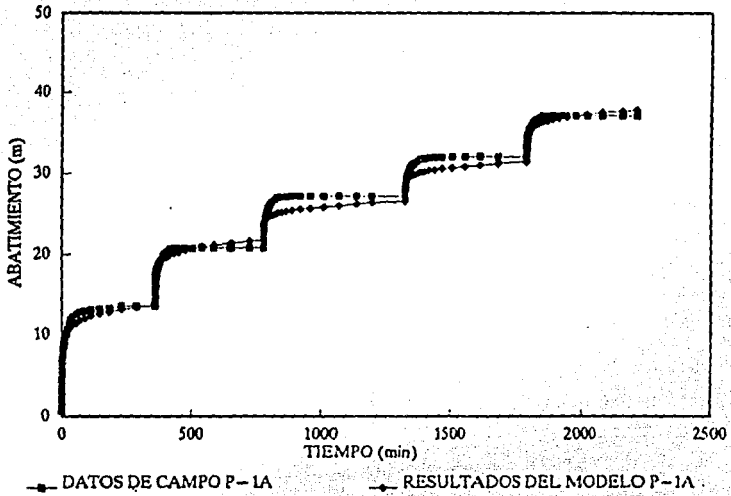
0.18, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 161.7, 161.7, 205.7
 2
 0.0, 0.0
 80.0, 8.0, 0.005, 0.08
 0.8, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 80.0, 8.0, 0.005
 0.8, 0.8, 0.001
 1.0, 3.0, 1.0
 2
 3
 18.0, 180.0, 360.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 2505.6, 0.16667
 0.0, 0.29167
 -10.0, 0.29167



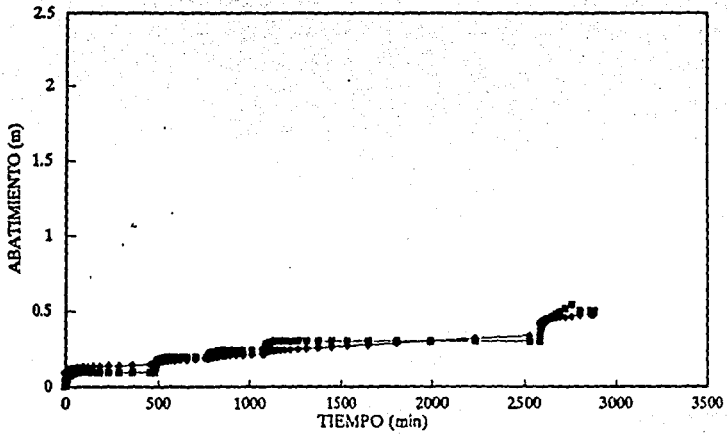
■ DATOS DE CAMPO P-53E ◀ RESULTADOS DEL MODELO P-53E



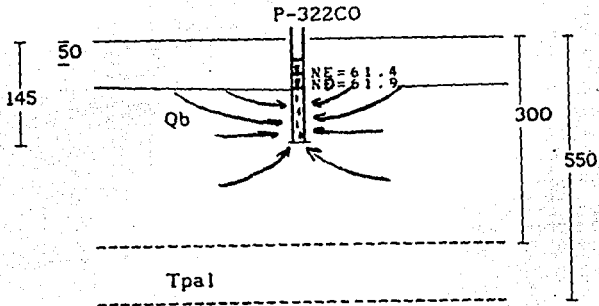
0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.0,132.3,132.3,232.2
 2
 0.0,0.0
 1.5,0.15,0.005,0.1
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0,0,0
 1.5,0.15,0.005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 2592.0,0.25
 3831.0,0.54
 4424.0,0.92
 5068.0,1.25
 5930.0,1.54
 6750.0,1.87
 -10.0,1.87



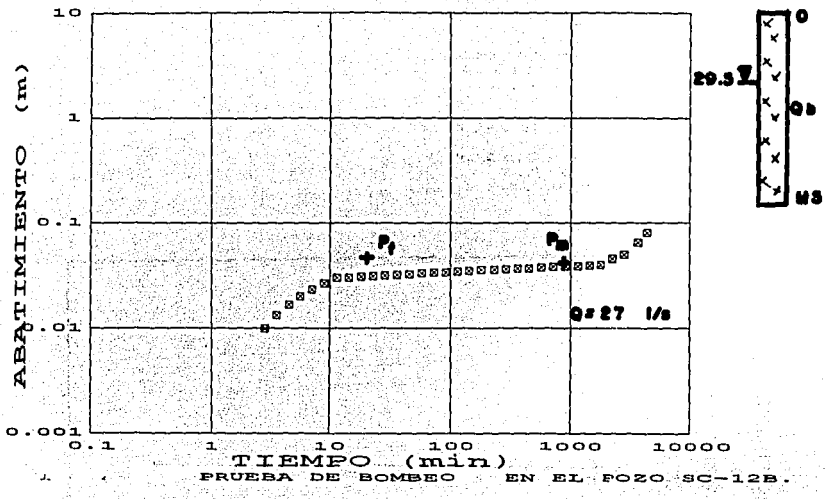
0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,83.6,83.6,238.6
 2
 0.0,0.0
 600.0,60.0,0.005,0.1
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 600.0,60.0,0.005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 4890.2,0.3333
 5581.4,0.54167
 6091.2,0.75
 6799.7,1.79167
 10644.5,2.0
 -10.0,2.0



- DATOS DE CAMPO P-322CO
 - RESULTADOS DEL MODELO P-322CO



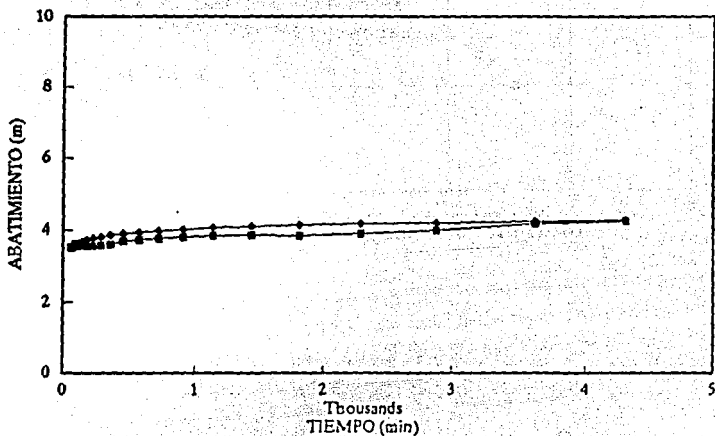
COMPORTAMIENTO LIBRE-MEDIO FRACTURADO DE DOBLE POROSIDAD



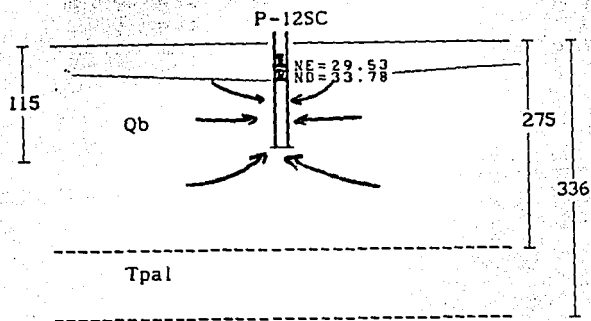
$W(r, \theta_1) = 1.0$
 $\theta_1 = 0.1$
 $s_1 = 0.036 \text{ m}$
 $t_1 = 960 \text{ s}$
 $"Tr" = 5.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

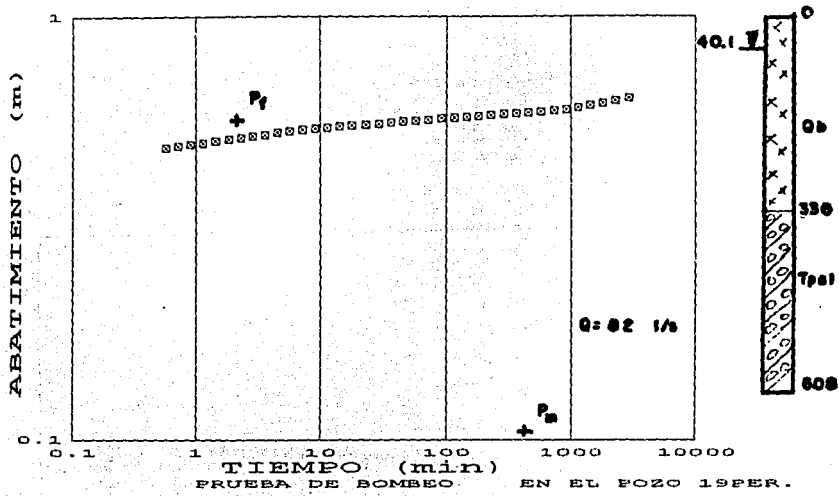
$W(r, \theta_2) = 1.0$
 $\theta_2 = 1.0$
 $s_2 = 0.036 \text{ m}$
 $t_2 = 54000 \text{ s}$
 $"Tm" = 5.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

0.22,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.85.5,85.5,245.5
 2
 0.0,0.0
 11.0,1.1,0.005,0.07
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0.0
 11.0,1.1,0.005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,10.0,1.0
 2
 3
 22.0,150.0,350.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 2306.9,3.0
 -10.0,3.0



■ DATOS DE CAMPO
 ▲ RESULTADOS DEL MODEL C





$$W(r, \theta_1) = 1.0$$

$$\theta_1 = 0.01$$

$$s_1 = 0.4 \text{ m}$$

$$t_1 = 150 \text{ s}$$

$$T_r = 1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$W(r, \theta_2) = 1.0$$

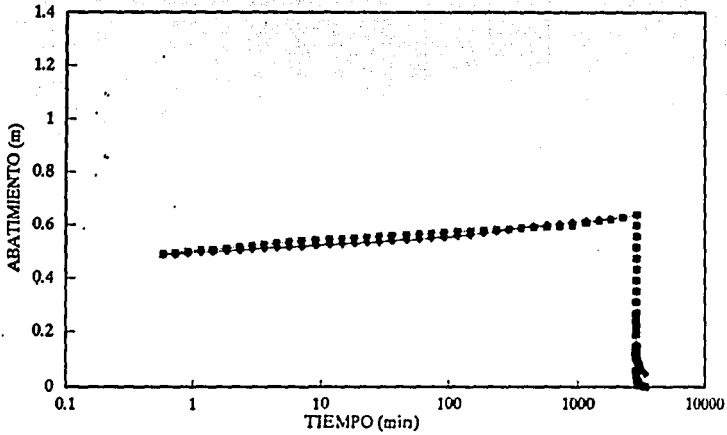
$$\theta_2 = 10$$

$$s_2 = 0.1$$

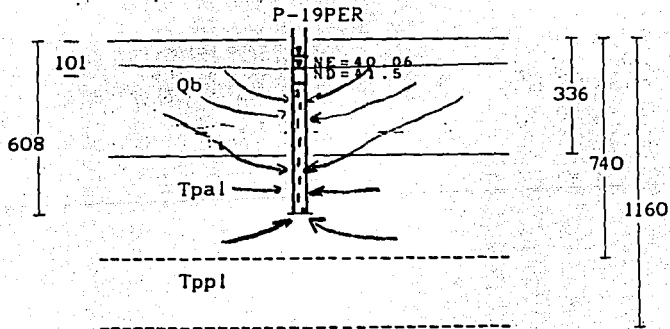
$$t_2 = 4320 \text{ s}$$

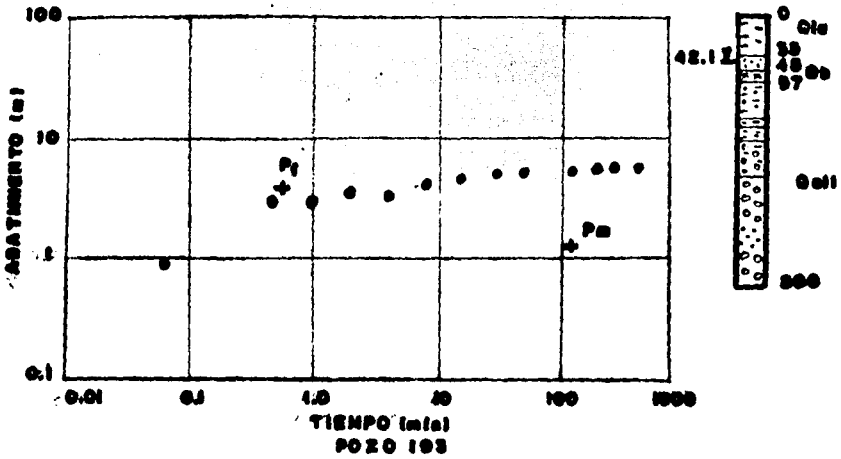
$$T_m = 6.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

0.1032.700.0
 0.0,0.0,0.0,295.9,295.9,699.9
 2
 0.0,0.0
 60.0,6.0,0.005,0.08
 0.8,0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0.0
 4.0,0.4,0.0005
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 3
 3
 10.0,100.0,500.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 7084.8,2.0
 0.0,2.3333
 -10.0,2.3333



— DATOS DE CAMPO P-19PER
 — RESULTADOS DEL MODELO P-19PER

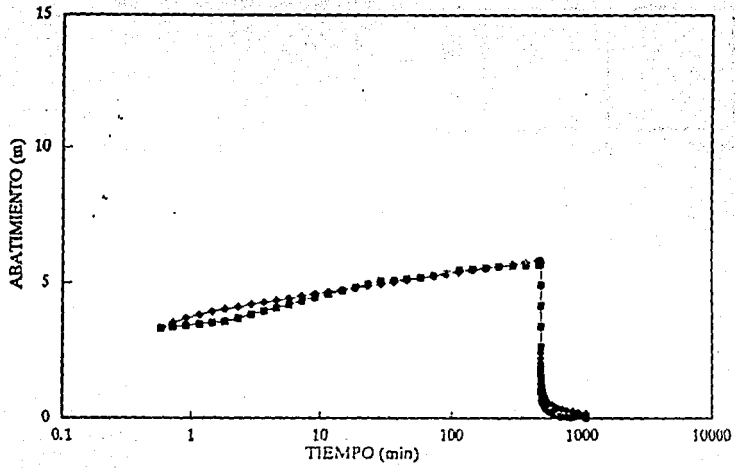




Wfr. 0.12 ± 1.0
 Q = 0.01
 h = 3.0 m
 t = 33 s
 "T_m" = 0.0012 m/s

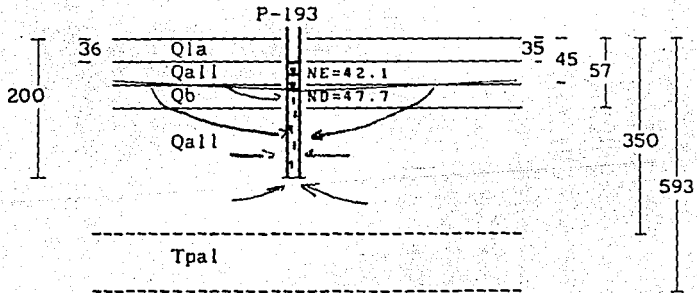
Wfr. 0.21 ± 1.0
 Q = 10
 h = 1.2 m
 t = 7200 s
 "T_m" = 0.0030 m/s

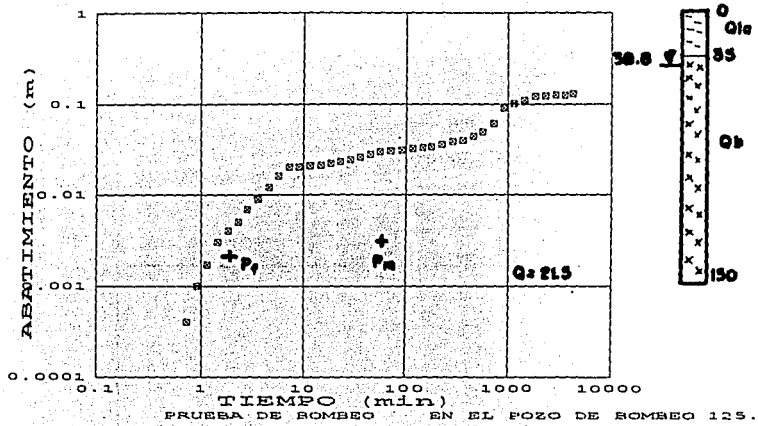
0.2032,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.158.0,158.0,308.0
 2
 0.0,0.0
 5.7,0.57,0.005,0.15
 0.8,0.0.8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 5.7,0.57,0.005
 0.8,0.0.8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 5097.6,0.3333
 0.0,0.75
 -10.0,0.75



← DATOS DE CAMPO P-193

← RESULTADOS DEL MODELO P-193





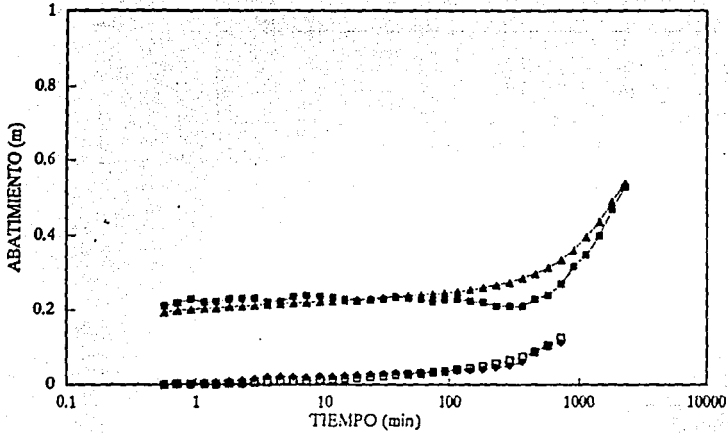
$W(r, \theta_1) = 0.1$
 $\theta_1 = 0.01$
 $s_1 = 0.023 \text{ m}$
 $t_1 = 105 \text{ s}$
 $r = 19.2 \text{ m}$
 $T_r = 7.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

$W(r, \theta_2) = 0.1$
 $\theta_2 = 1.0$
 $s_2 = 0.029 \text{ m}$
 $t_2 = 4200 \text{ s}$
 $T_m = 5.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

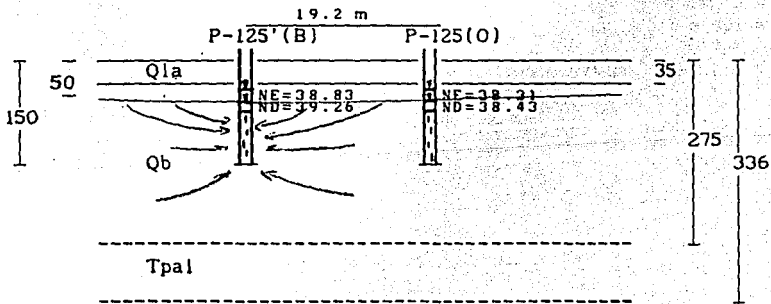
```

0.13,250.0
0.0,0.0,0.0,111.2,111.2,311.6
2
0.0,0.0
130.0,13.0,0.005,0.08
0.8,0.0,8.0,0.005,0.05
0.0
0.0,0.0
130.0,13.0,0.005
0.8,0.0,8.0,0.0001
1.0,1.0,1.0
2
3
19.2,75.0,100.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1857.0,3.0
0.0,3.58
-10.0,3.58

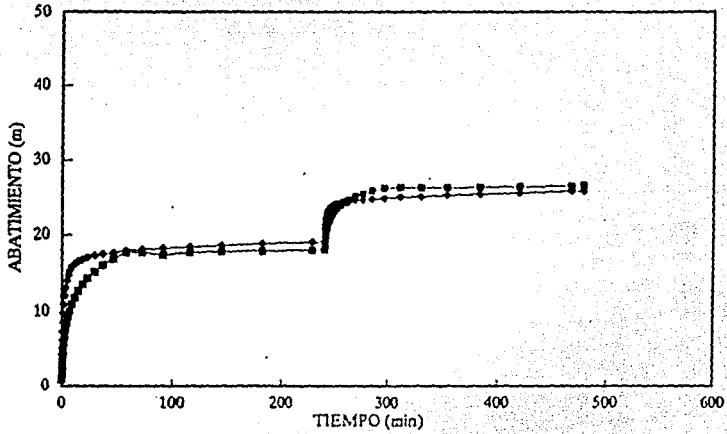
```



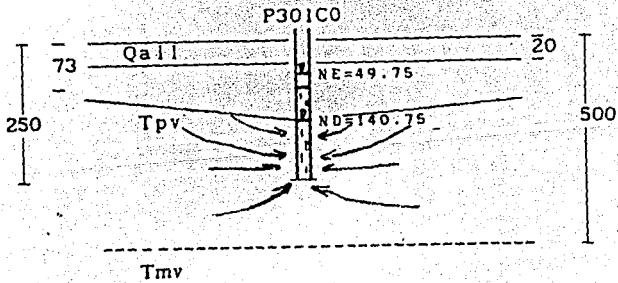
■ DATOS DE CAMPO P-125' ▲ DATOS DE CAMPO P-125
 □ RESULTADOS DEL MODELO P-125' △ RESULTADOS DEL MODELO P-125



0.2, 500.0
 0.0, 0.0, 0.0, 200.3, 200.3, 450.3
 2
 0.0, 0.0
 0.4, 0.04, 0.0005, 0.08
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001, 0.08
 0.0
 0.0, 0
 0.4, 0.04, 0.0005
 0.8, 0.0, 0.8, 0.001
 1.0, 1.0, 1.0
 2
 3
 20.0, 200.0, 400.0
 3
 0.01, 0.1, 1.0, 0.0, 0.0
 1753.9, 0.16667
 2289.6, 0.3333
 -10.0, 0.3333



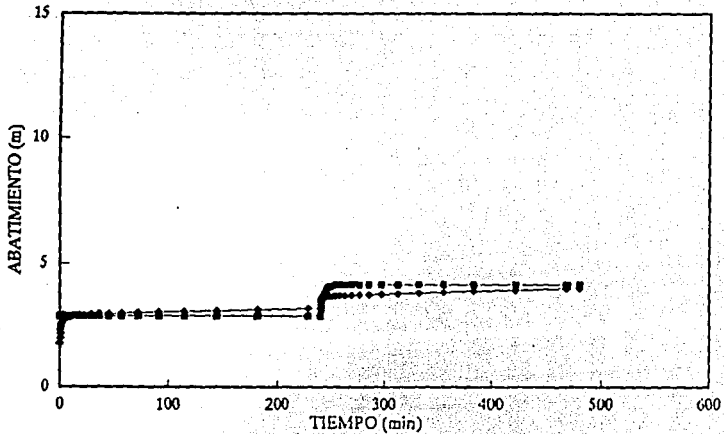
- DATOS DE CAMPO P-301CO
 - RESULTADOS DEL MODELO P-301CO



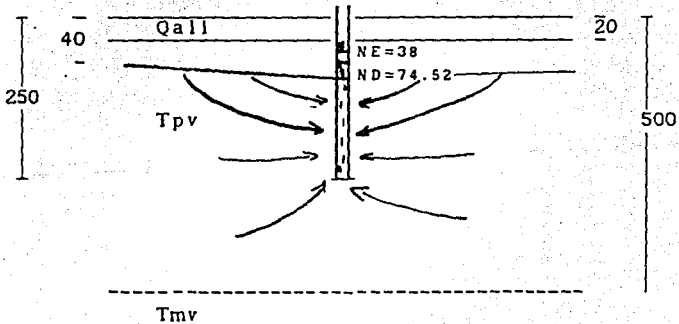
```

0.2,500.0
0.0,0.0,0.0,0.212,0,212,0,462,0
2
0.0,0.0
2.0,0.2,0.0001,0.05
0.8,0.0,8,0.001,0.08
0.0
0,0,0
2.0,0.2,0.0001
0.8,0.0,8,0.001
1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
1211.3,0.16667
1425.6,0.33334
-10.0,0.33334

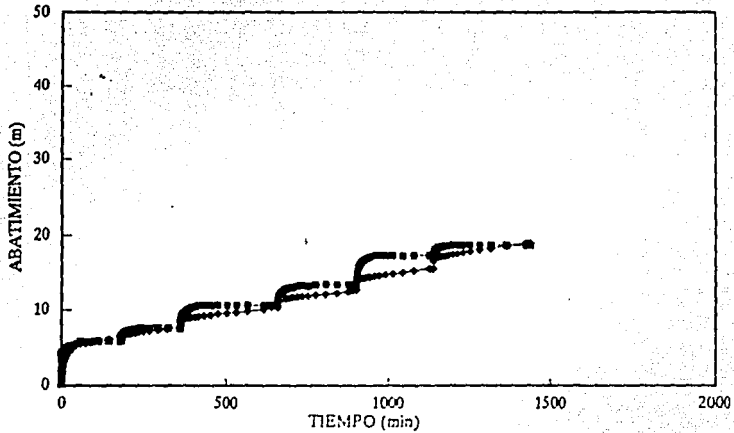
```



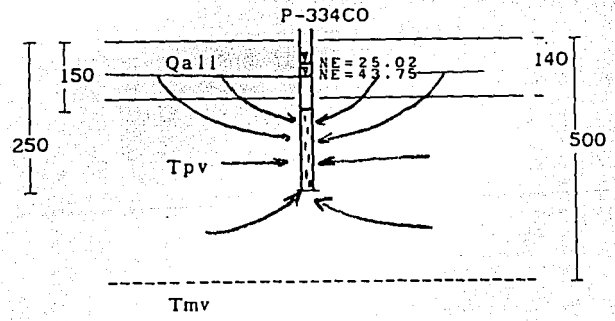
— DATOS DE CAMPO P-302CO
 — RESULTADOS DEL MODELO P-302CO
 302-CO



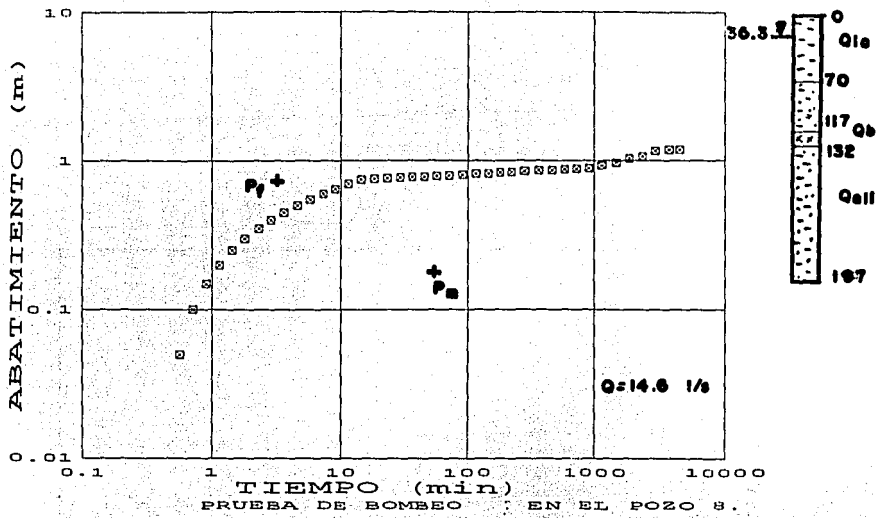
0.2,500.0
 0.0,0.0,0.0,0.115,0.115,0.225,0
 2
 0.0,0.0
 0.5,0.06,0.001,0.1
 0.8,0.0,8.0,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 7.0,0.7,0.00019
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 1
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 2600.6,0.125
 2872.8,0.250
 3451.7,0.4583
 3986.5,0.625
 4723.5,0.7917
 5416.4,0.9584
 -10.0,0.9584



■ DATOS DE CAMPO P-334CO
 ● RESULTADOS DEL MODELO P-334CO



COMPORTAMIENTO SEMICONFINADO-MEDIO DE DOBLE POROSIDAD



$$W(r, \theta_1) = 1.0$$

$$\theta_1 = 0.01$$

$$s_1 = 0.7 \text{ m}$$

$$t_1 = 180 \text{ s}$$

$$"T_r" = 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$W(r, \theta_2) = 1.0$$

$$\theta_2 = 10$$

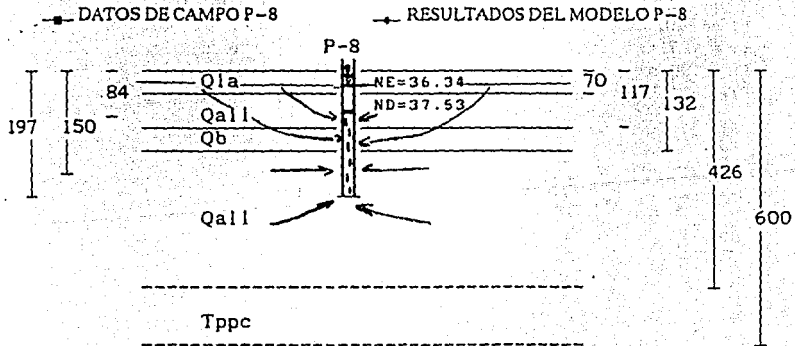
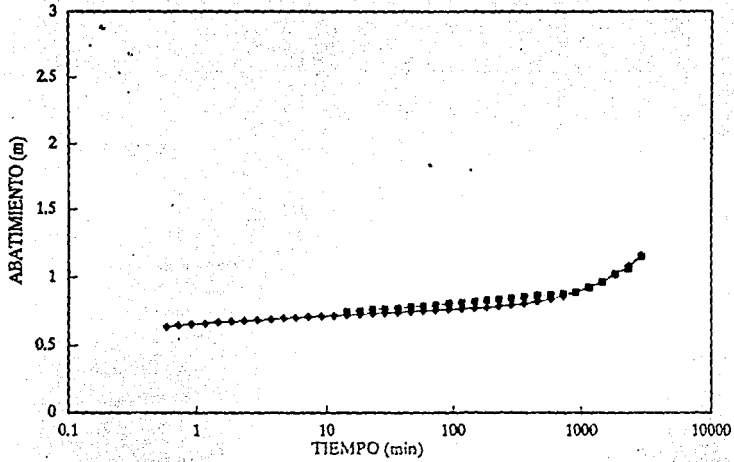
$$s_2 = 0.18 \text{ m}$$

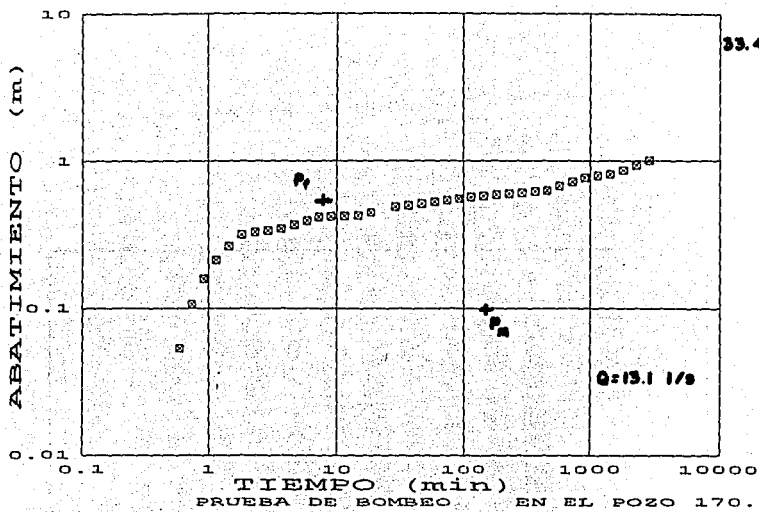
$$t_2 = 1680 \text{ s}$$

$$"T_m" = 6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

FALLA DE ORIGEN

0.127,500.0
 0.0.0.0,69.5,149.5,149.5,425.5
 ?
 0.0005,0.0
 50.0,5.0,0.0033,0.1
 0.8,0,0,8,0.001,0.08
 0.0
 0,0,0
 50.0,5.0,0.0033
 0.8,0,0,8,0.001
 -1.0,3.0,1.0
 2
 3
 13.0,130.0,330.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 1261.44,3.0
 0.0,3.3333
 -10.0,3.3333





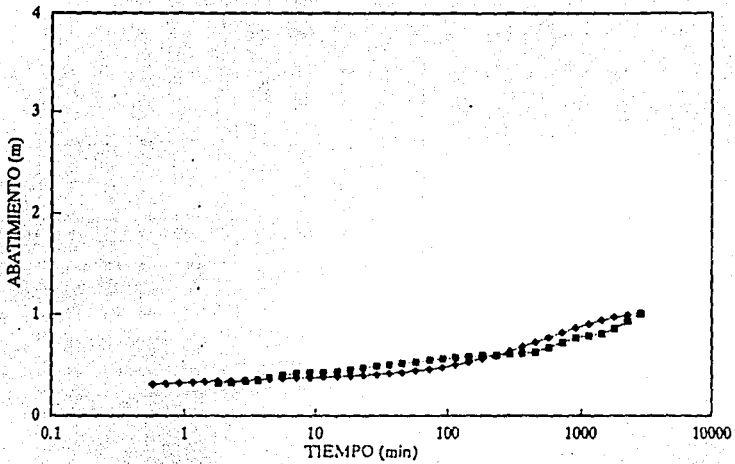
0	Q10
1	Q11
2	Q12
3	Q13
4	Q14
5	Q15
6	Q16
7	Q17
8	Q18
9	Q19
10	Q20
11	Q21
12	Q22
13	Q23
14	Q24
15	Q25
16	Q26
17	Q27
18	Q28
19	Q29
20	Q30
21	Q31
22	Q32
23	Q33
24	Q34
25	Q35
26	Q36
27	Q37
28	Q38
29	Q39
30	Q40
31	Q41
32	Q42
33	Q43
34	Q44
35	Q45
36	Q46
37	Q47
38	Q48
39	Q49
40	Q50
41	Q51
42	Q52
43	Q53
44	Q54
45	Q55
46	Q56
47	Q57
48	Q58
49	Q59
50	Q60
51	Q61
52	Q62
53	Q63
54	Q64
55	Q65
56	Q66
57	Q67
58	Q68
59	Q69
60	Q70
61	Q71
62	Q72
63	Q73
64	Q74
65	Q75
66	Q76
67	Q77
68	Q78
69	Q79
70	Q80
71	Q81
72	Q82
73	Q83
74	Q84
75	Q85
76	Q86
77	Q87
78	Q88
79	Q89
80	Q90
81	Q91
82	Q92
83	Q93
84	Q94
85	Q95
86	Q96
87	Q97
88	Q98
89	Q99
90	Q100

$W(r, \theta_1) = 1.0$
 $\theta_1 = 0.01$
 $s_1 = 0.4 \text{ m}$
 $t_1 = 240 \text{ s}$
 $"T_r" = 2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

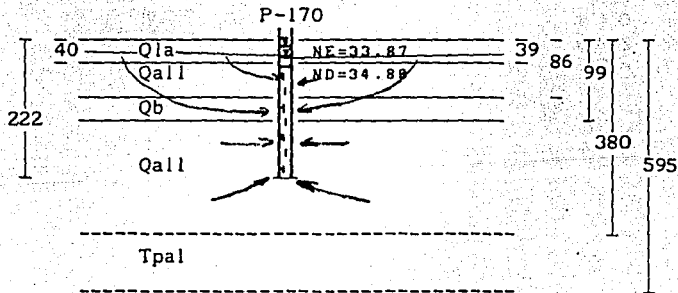
$W(r, \theta_2) = 1.0$
 $\theta_2 = 30$
 $s_2 = 0.1 \text{ m}$
 $t_2 = 9600 \text{ s}$
 $"T_m" = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$

FALLA DE ORIGEN

0.178,500.0
 0.0,0.0,37.5,220.5,220.5,378.5
 2
 0.0005,0.0
 150.0,15.0,0.003,0.1
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 150.0,15.0,0.003
 0.8,0.0,8,0.001
 1.0,1.0,1.0
 2
 3
 18.0,180.0,360.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 11295.94,2.0
 0.0,2.3333
 -10.0,2.3333



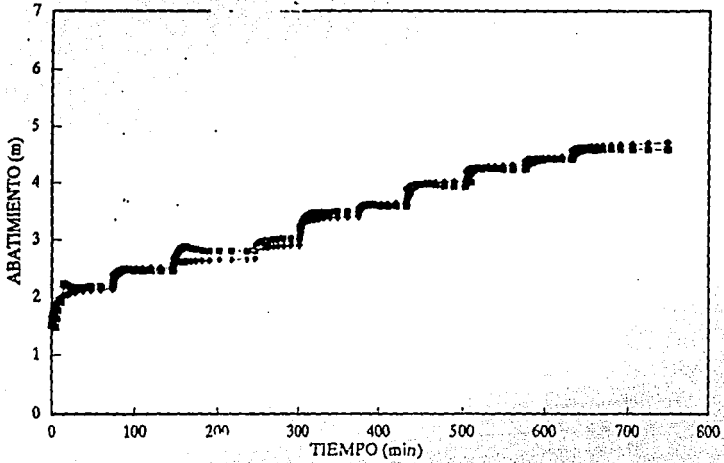
■ DATOS DE CAMPO P-170 ◆ RESULTADOS DEL MODELO P-170



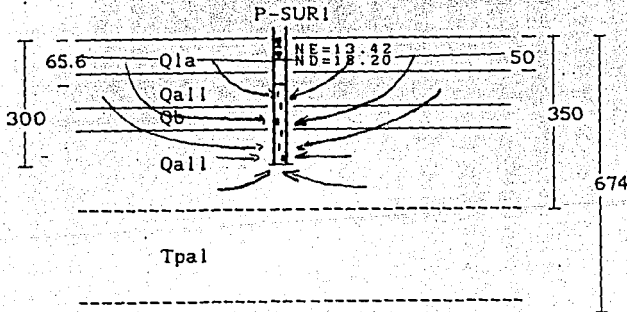
```

0.18,600.0
0.0,0.0,49.0,219.0,219.0,349.0
2
0.0003,0.0
20.0,2.0,0.008,0.18
0.8,0.2,8.0,003,0.08
0.0
0.0,0
20.0,2.0,0.003
0.8,0.0,8.0,001
-1.0,1.0,1.0
2
3
20.0,200.0,400.0
3
0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
3720,0.0,0.05
8911,0.0,1
9300,0.0,0.17
10077,0.0,21
11743,0.0,26
12463,0.0,3
13649,0.0,25
14514,0.0,4
15315,0.0,52
-10.0,0.32

```

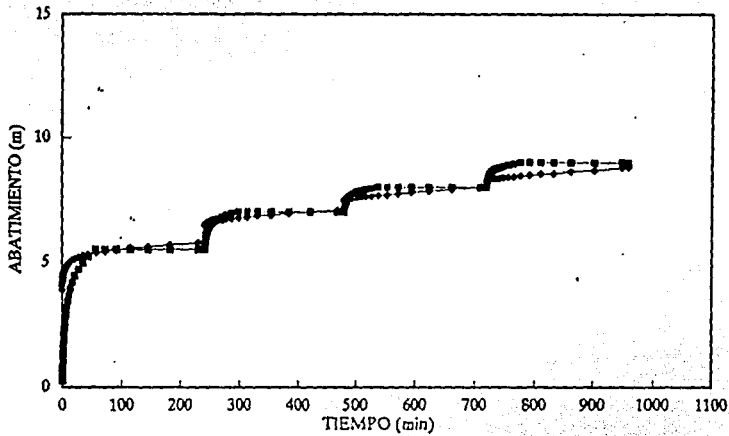


→ DATOS DE CAMPO P-1S
→ RESULTADOS DEL MODELO P-1S

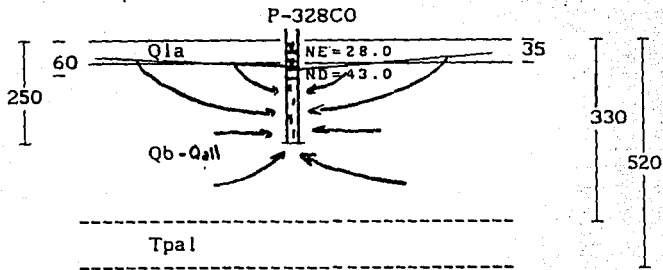


FALLA DE ORIGEN

0.2,500.0
 0.0,0.0,38.0,248.0,248.0,328.0
 2
 0.0005,0.0
 7.0,0.7,0.003,0.1
 0.8,0.0,8,0.001,0.08
 0.0
 0.0,0
 7.0,0.7,0.003
 0.8,0.0,8,0.001
 -1.0,1.0,1.0
 2
 3
 20.0,200.0,400.0
 3
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0,0.0
 6912.0,0.16667
 8035.2,0.33333
 8640.0,0.5
 9072.0,0.66667
 -10.0,0.66667

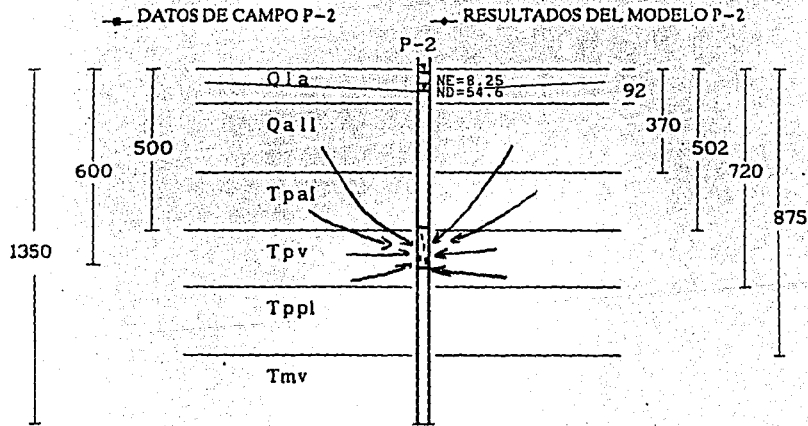
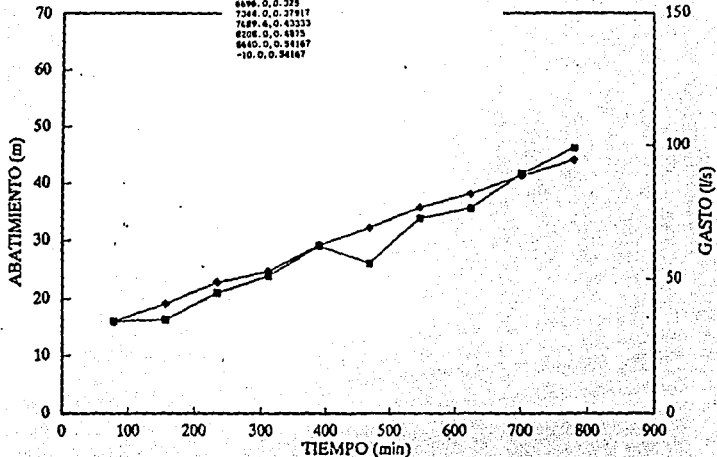


← DATOS DE CAMPO P-328CO
 ← RESULTADOS DEL MODELO P-328CO



FALLA DE ORIGEN

0.0,0.0,89.5,367.5,449.5,597.5
 2
 0.0005,0.0
 2.0,0.2,0.0007,0.13
 0.8,0.0,8.0,001,0.08
 0.5
 0.0,0
 2.0,0.33,0.0001
 18,1,1,0,11,0.001
 30,1,1,0,11,0.001
 21,1,1,0,11,0.001
 22,1,1,0,11,0.001
 23,1,1,0,11,0.001
 24,1,1,0,11,0.001
 25,1,1,0,11,0.001
 26,1,1,0,5,0.001
 0.8,0.0,8,0.001
 -1,0,1,0,1,0
 1
 0
 18.0,520.0,700.0
 2
 0.01,0.1,1.0,0.0,0.0
 2888.0,0.05817
 8108.4,0.10823
 5097.4,0.1625
 5283.4,0.21683
 4320.8,0.27083
 8896.0,0.232
 7314.0,0.27817
 7689.4,0.43333
 8208.0,0.4835
 8440.0,0.54187
 -10.0,0.34187



FALLA DE ORIGEN