




FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS



MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo

RESUMEN DE LAS PRINCIPALES
CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL
ACUÍFERO DEL VALLE DE PENJAMO –
ABASOLO, GTO.

EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

***RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO
DEL VALLE DE PÉNJAMO-ABASOLO, GTO.***

CONTENIDO

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

CAPITULO 2.- GEOLOGÍA

CAPITULO 3.- HIDROGEOLOGIA

CAPÍTULO 4.- MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- ANTECEDENTES

El agua subterránea constituye un pilar del desarrollo agropecuario e industrial del Estado de Guanajuato y un reclamo de la sociedad. La Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado (CEASG), viene realizando la actualización de los estudios geohidrológicos de los acuíferos existentes en todo el estado, cuyo conocimiento y seguimiento se había detenido en los últimos años debido, entre otras cosas, a los problemas económicos por los que a atravesado el país. A partir del año de 1997. La CEASG reactivó los estudios geohidrológicos en el estado a fin de programar el manejo de los acuíferos. El presente corresponde al resumen de resultados de uno de dichos estudios, en este caso, para el Valle de Penjamo-Abasolo, elaborado por la Compañía Lesser y Asociados, S.A. de C.V mediante el contrato CEAS/APA/GTO/97-01, con una duración de 12 meses.

El informe completo puede ser consultado en el CEASG, Autopista Guanajuato-Silao, Km.1, Guanajuato, Gto.

1.2.- OBJETIVOS

Los principales objetivos del presente trabajo fueron:

Conocer la cantidad de aprovechamientos de agua subterránea existentes y su volumen de extracción.

Realizar un balance del agua subterránea.

Aplicar un modelo matemático del acuífero y (a través de él) elaborar un proyecto de manejo del agua subterránea.

Los alcances del trabajo fueron los siguientes:

- a).- Actualizar el censo de pozos del acuífero.
- b).- Determinar las principales estructuras geológicas que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea.
- c).- Conocer la superficie piezométrica del acuífero.
- d).- Determinar las características hidráulicas del acuífero.
- e).- Cuantificar y delimitar las zonas de recarga/descarga del acuífero.
- f).- Definir los volúmenes de extracción y proponer las zonas que requieran de protección.
- g).- Determinar las condiciones actuales de explotación del acuífero.
- h).- Realizar un balance hidrogeológico del acuífero.
- i).- Predecir el comportamiento del acuífero.
- j).- Representar el acuífero mediante un modelo matemático.
- k).- Determinar la posible disponibilidad adicional de agua subterránea.

- l).- Determinar la calidad del agua subterránea.
- m).- Proponer políticas y estrategias para administrar los recursos hidráulicos.

1.3.- LOCALIZACIÓN

El Valle de Pénjamo-Abasolo se localiza en la parte centro-sureste del Estado de Guanajuato entre los paralelos 20° 10' y 20° 39' de latitud norte y los meridianos 101° 22' y 102° 02' de longitud oeste. Incluye principalmente a los municipios de Pénjamo, Abasolo, Cuernamero, Pueblo Nuevo e Irapuato y abarca 3425 kilómetros cuadrados.

El valle en estudio se encuentra limitado al norte y noroeste por la Sierra de Pénjamo al noreste por la Sierra de El Veinte, al sur por las sierras de Tacubaya y Abasolo.

CAPITULO 2.- GEOLOGÍA

3.1.- GEOLOGÍA GENERAL

La zona estudiada forma parte del eje neovolcánico caracterizado por existir numerosos volcanes. Las sierras se encuentran constituidas por lavas y tobas tanto de composición basáltica y Edad Cuaternaria como riolitas del Terciario. Los valles corresponden a zonas planas donde se presentan acumulaciones de sedimentos lacustres del Terciario y aluviones del Cuaternario.

Se encuentran fallas de gran magnitud entre las que destacan aquellas que dan forma a los gravens de Numarán y Penjamo-Abasolo, así como al horst de Tacubaya.

Fallas y fracturas de menor magnitud se encuentran afectando a las rocas volcánicas que constituyen a las sierras.

2.2.- ESTRATIGRAFÍA

Las rocas y materiales de la zona en estudio presentan edades que van del Terciario al Reciente. Han sido descrita informalmente en algunos trabajos y la denominación aquí presentada fue obtenida del estudio realizado por Ariel Construcciones (1991), con modificaciones realizadas por esta Empresa. Los contactos geológicos se basaron en la carta topográfica del INEGI y se incluyen en la figura 2.1.

A continuación se describen las unidades de roca, cuya posición estratigráfica se muestra en la figura 2.2 .

2.2.1.- BASAMENTO.-

No aflora ni ha sido detectado mediante perforaciones. De acuerdo a la estratigrafía de la región, corresponde al Conglomerado Rojo de Edad Terciaria y/o a sedimentos de calcareos del Cretácico.

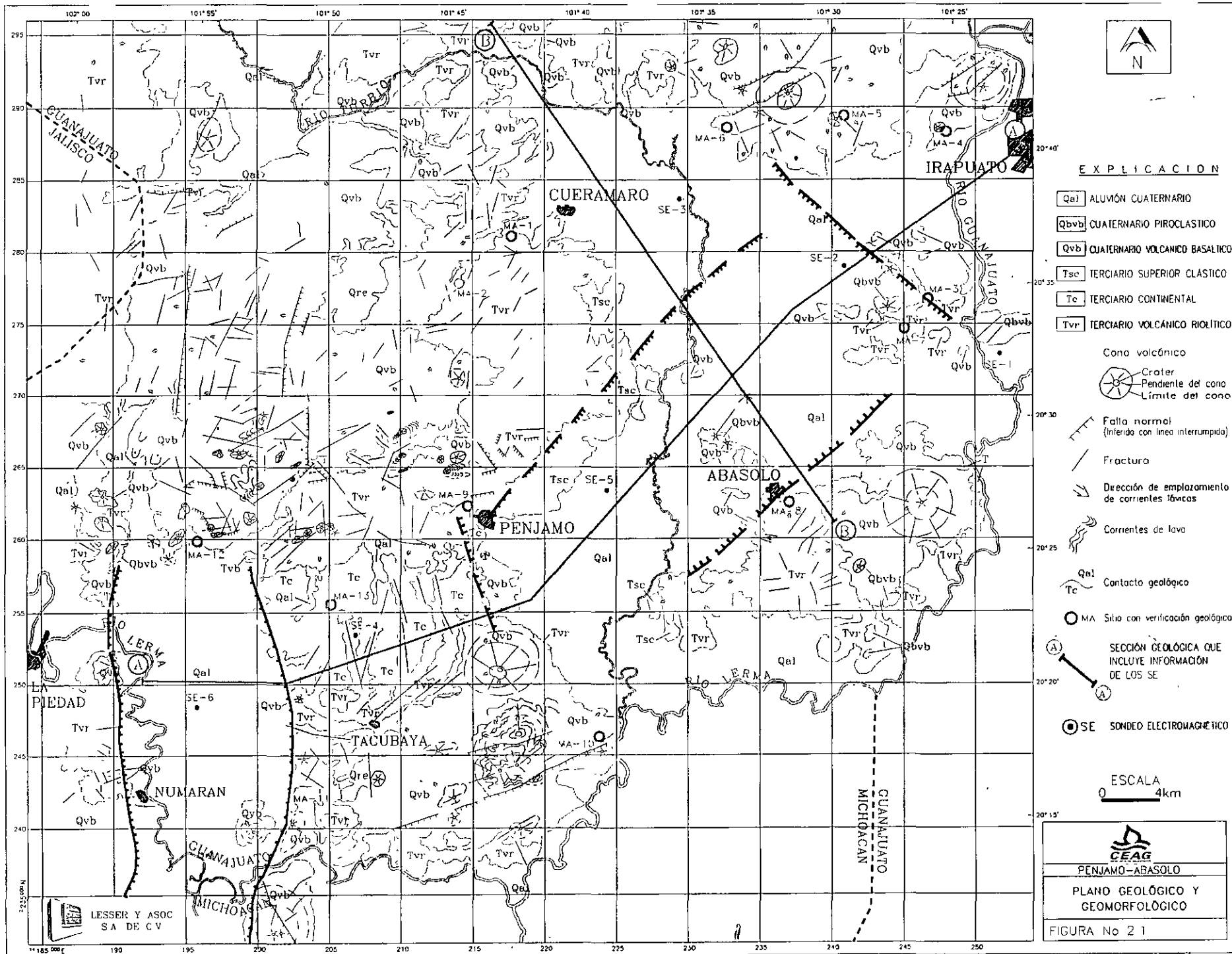
2.2.2.- TERCIARIO VOLCANICO RIOLITICO (T_{vr})-

Corresponde a una serie de rocas volcánicas estrusivas de composición riolítica que constituyen el núcleo de las principales sierras. Sus mayores afloramientos se encuentran sobre el oriente y sur de la Sierra de Pénjamo. Incluyen riolitas, ignimbritas, tobas y vidrios. Presentan coloraciones variadas, predominando tonalidades marrones y rojizas.

En diversas perforaciones efectuadas se ha detectado a esta unidad riolítica en el subsuelo donde se caracteriza por formar acuíferos de buen rendimiento además de tener la particularidad de contener agua termal, generalmente entre 30 y 40°C.

2.2.3.- TERCIARIO CONTINENTAL (T_c)

Corresponde a sedimentos de origen lacustre entre los que se incluyen lutitas, margas, calizas y areniscas calcareas, generalmente de colores blanquesinos. Su estratificación y consolidación es muy variable.



encontrándose zonas donde los estratos se encuentran bien definidos y su consistencia es compacta; sin embargo, hacia otras zonas se llegan a encontrar prácticamente delesnables y a perder o dificultar la observación de los estratos. Esta unidad sedimentaria lacustre ha sido estudiada por varios autores. Presenta continuidad hacia gran parte del centro de la República Mexicana. Estratigráficamente se encuentra sobreyaciendo o interdigitada con riolitas del Terciario y cubierta por rocas volcánicas o materiales granulares del Cuaternario. Estudios palinológicos realizados por la exSARH, le asignaron una edad del Terciario inferior y medio.

2.2.4.- Terciario Superior Continental (Tsc)

Corresponde a una serie de materiales granulares que incluyen gravas, arenas y arcillas, y que en parte se encuentran semiconsolidadas formando un conglomerado. Afloramientos de esta unidad se encuentran principalmente en el flanco sur-este de la Sierra de Pénjamo. Se considera a esta unidad más nueva que los sedimentos terciarios descritos en el párrafo anterior (Tc) y más antiguos que los basaltos cuaternarios (Qvb), aunque no existen mediciones de su edad. Se le ha asignado al Terciario Superior. En perforaciones se encuentra interdigitada en su base con basaltos compactos.

2.2.5.- Cuaternario Volcánico Basáltico (Qvb)

Corresponde a materiales del Cuaternario que se encuentran formando aparatos volcánicos, así como en forma de corrientes lávicas. Incluye principalmente a basaltos vesiculares de color negro, en ocasiones vesiculares y fracturados y en otras compactos. Intercalados se encuentran tezontles, tobas y vitrófidos. Constituyen uno de los afloramientos de mayor extensión en la zona de trabajo. Forman casi en su totalidad a la Sierra del Veinte, a la mayor parte de la Sierra de Pénjamo en su extremo noroeste, a la Sierra de Tacubaya y a la mitad oriental de la Sierra de Abasolo.

2.2.6.- Cuaternario Aluvial (Qal)

Esta unidad esta formada por gravas, arenas y arcillas con bajo grado de compactación, presenta espesores reducidos y se encuentra ampliamente distribuida en el valle. En general se considera permeable propiciando la infiltración vertical en la medida que su contenido arcilloso lo permita.

CAPITULO 3.- HIDROGEOLOGÍA

3.1.- CENSO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se realizó un barrido de la zona de trabajo mediante el cual se detectaron los aprovechamientos de agua subterránea existentes. Durante los recorridos de campo se obtuvieron las características constructivas y de operación de cada uno de los aprovechamientos, cuyos datos se presentan tanto en forma digitalizada en una base de datos, como en las tablas que constituyen el anexo 1 del informe principal. Se les asignó un número progresivo al que se le antepuso la letra L. Cada sitio censado se marcó en el campo con pintura y se obtuvo de él una fotografía. El album fotográfico se presentó en 5 carpetas. De cada aprovechamiento se obtuvieron los datos siguientes: El o los números de identificación que han sido utilizados en otros trabajos y que se encontraban marcados en el campo. El lugar, municipio, nombre del propietario, nivel estático, profundidad total, diámetro de descarga, diámetro de ademe, año de perforación, diámetro y longitud de la columna del equipo, potencia del motor, tipo de descarga, cultivo, superficie regada, uso del agua, régimen de operación, carta INEGI en que se ubica, tipo de equipo de bombeo y observaciones generales. Asimismo, se midió el nivel estático y/o el nivel dinámico, el caudal de extracción, la localización geográfica del pozo, el pH, temperatura, conductividad eléctrica, y el potencial redox del agua.

Se censaron un total de 2926 aprovechamientos de agua subterránea que fueron identificados con una numeración que va del L-1 al L-2926. De los aprovechamientos censados 2769 corresponden a pozos, 152 a norias y 5 a manantiales (figuras No 3.1 y 3.2).

De los 2926 aprovechamientos 2519 se encuentran activos y el resto inactivos. De los inactivos, 24 se encuentran en perforación, 74 en rehabilitación o cambio de equipo de bombeo, 158 se encuentran abandonados y 151 no operan por diferentes razones, en algunos casos por problemas mecánicos del equipo y en otros por problemas constructivos.

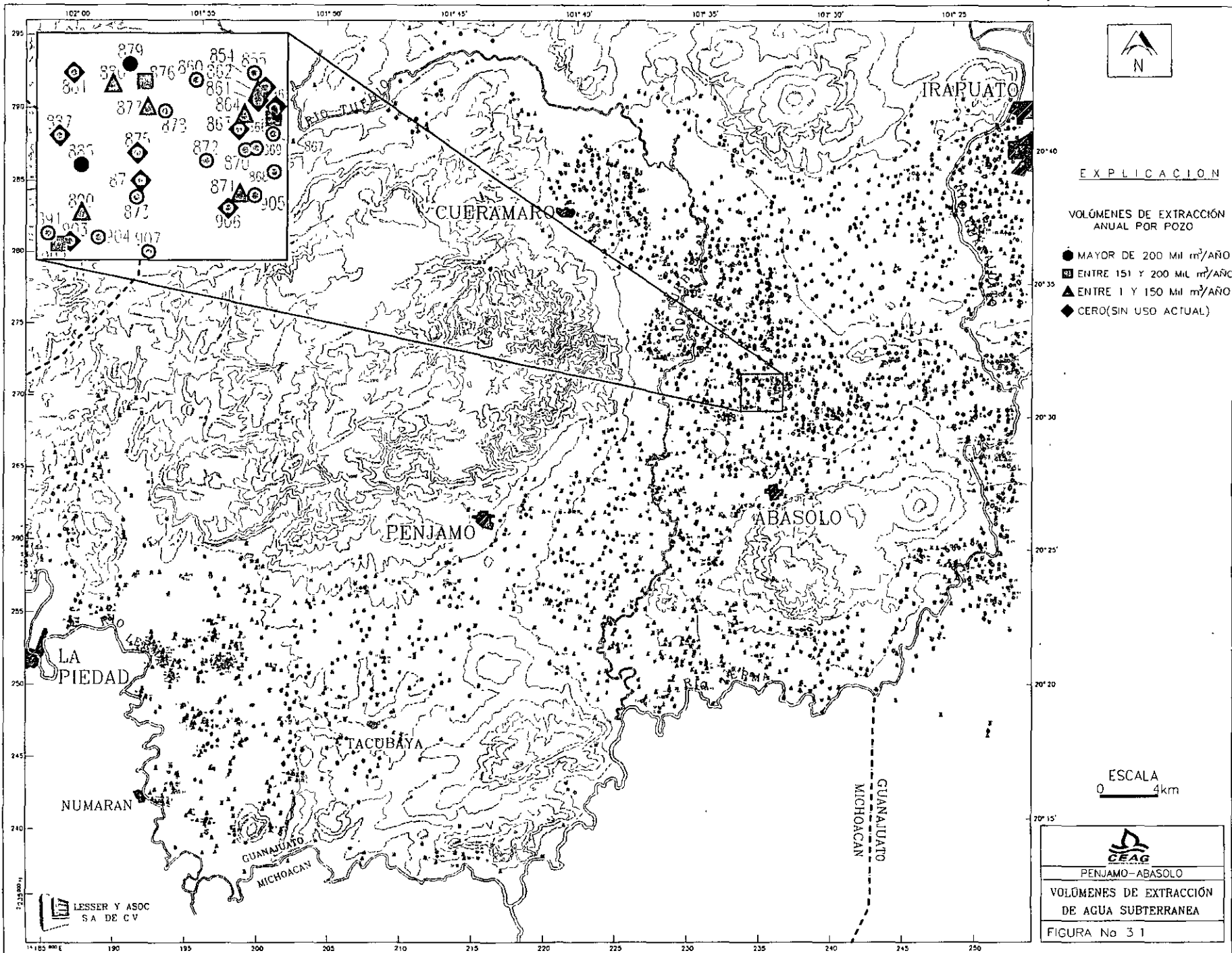
Del total de los aprovechamientos activos, 2099 se utilizan para la agricultura, 309 para agua potable, 36 en la industria y 75 en abrevadero (figura No. 3.2).

Por lo que respecta a la clasificación por caudales de extracción, 715 aprovechamientos extraen caudales entre 31 y 60 lps; 1382 rinden entre 6 y 30 lps; en 227 aprovechamientos el caudal es menor de 5 lps y; en 195 es mayor de 61 lps.

Los aprovechamientos que se encontraban equipados se clasificaron de acuerdo a su diámetro de descarga; 125 tienen menos de 2", 2104 entre 3 y 6" y en 457 la descarga es mayor de 7".

3.2.- VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN

Para cada uno de los aprovechamientos inventariados se calculó el volumen de extracción tomando en cuenta el caudal y el tiempo de operación, obtenidos durante el censo. Los registros y cálculos se incluyen en las hojas de censo (anexo 1 del informe original). Se llevo a cabo una clasificación de los pozos de acuerdo a su volumen de extracción. Por una parte, los que presentan volúmenes de extracción mayores de



200,000 m³/año, observándose que se encuentran principalmente alrededor del poblado de Tacubaya, sobre la margen derecha del Río Turbio a la altura de Pénjamo, y en el norte de la zona de trabajo en una franja entre Cuerámara y Pueblo Nuevo.

Por otra parte, se diferenciaron los pozos que presentan volúmenes reducidos de extracción de agua subterránea, entre 1 y 150,000 metros cúbicos anuales. Se marcaron estos pozos con un triángulo observándose que predominan en el valle de Numarán y sobre la margen izquierda del Río Turbio al oriente de Abasolo.

Se marcó con un cuadrado a aquellos pozos que presentan un caudal de extracción intermedio entre los dos mencionados anteriormente y que corresponde al rango entre 151,000 y 200,000 m³/año. Estos pozos se encuentran principalmente al sur y suroeste de la Ciudad de Abasolo.

Finalmente, se marcaron con un rombo los pozos que se encuentran sin uso actual, observándose que la mayor parte de ellos se presenta en una franja alargada entre Cuerámara, Abasolo y Pueblo Nuevo.

Se hace notar que el abatimiento de niveles ha provocado el agotamiento de los horizontes acuíferos *somero e intermedio*, obligando a los agricultores a profundizar sus pozos. Este efecto inició en la parte norte entre Cuerámara e Irapuato y avanza hacia el sur.

En la parte norte, alrededor de Guadalupe de Rivera, prácticamente todos los pozos existentes son profundos y presentan volúmenes de extracción altos. Al sur de Guadalupe de Rivera es donde se encuentra la franja donde existen un gran número de pozos que han dejado de operar en su mayor parte se encuentran abandonados y han sido sustituidos por pozos más profundos que rinden volúmenes de extracción altos. Continuando hacia el sur, en los alrededores de Abasolo, los volúmenes de extracción son reducidos. Conforme los pozos presentan agotamiento, se reponen como "sustitución" a mayor profundidad.

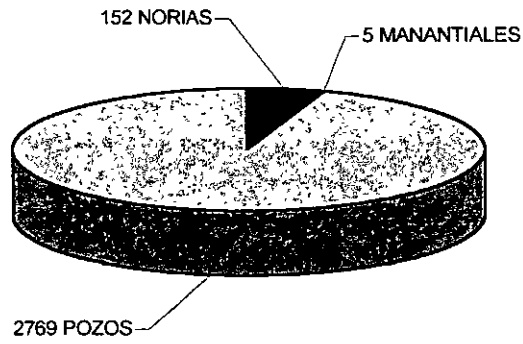
La sustitución de pozos someros por pozos profundos, presenta una forma de ola que viene avanzando desde el norte para encontrarse actualmente a la altura de Abasolo y tender a circular hacia el sur, especialmente sobre la margen izquierda del Río Turbio.

Se calculó el volumen de extracción de agua subterránea en cada pozo cuyos datos se presentan en las tablas del anexo I. La extracción total para el año de 1998 fue de 721.2 millones de m³/año. En capítulos posteriores se describirá la extracción para el área de balance, la cual fue de 440.2 millones m³/año.

Los volúmenes de extracción de acuerdo al horizonte acuífero son: *somero* 18 millones de m³/año, *intermedio* 157 millones de m³/año y horizonte acuífero *profundo* 546 millones de m³/año.

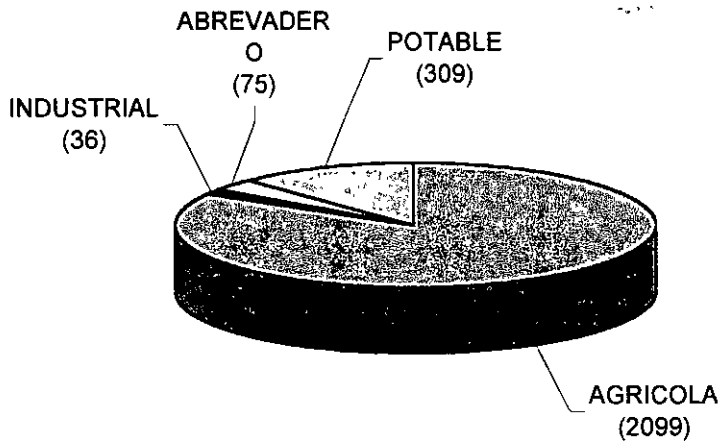
De acuerdo a su uso, la extracción de agua del subsuelo asciende a 721.156 millones de metros cúbicos al año repartida como sigue: 673.017 en agrícola, 42.650 en potable, 2.265 en abrevadero y 3.222 en industrial, todos ellos en millones de metros cúbicos por año (figura 3.2)

APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRANEA EN EL VALLE DE PENJAMO-ABASOLO



DATOS DE 1998

CANTIDAD DE APROVECHAMIENTOS ACTIVOS DE ACUERDO A SU USO (2519)



VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN DE ACUERDO A SU USO

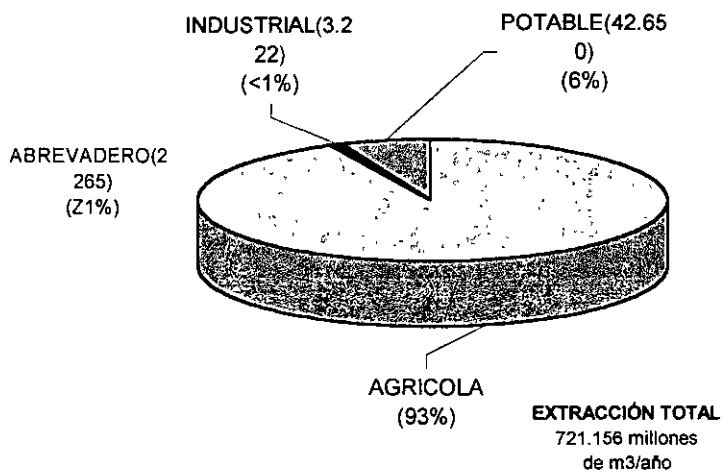


FIGURA 3.2

3.3.- CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS DE LAS FORMACIONES

Las unidades geológicas se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de aguas subterránea en: rocas permeables y rocas impermeables.

Las rocas y materiales cuaternarios correspondientes a los basaltos y los espesores superficiales de gravas, arenas y arcillas que se encuentran sobre los valles, se clasifican como permeables. Se encuentran en la parte superficial generalmente a alrededor de 40 metros de profundidad. Mediante cortes litológicos de pozos, se observó que en muchos sitios se encuentran sobreyaciendo a una capa de materiales arcillosos que ocasionan la formación de un nivel de aguas superficiales. Este efecto se comprobó con la profundidad total de muchos pozos, así como en la posición del nivel estático. Debido a lo anterior se diferenció e identificó dentro de esta capa a un horizonte acuífero denominado *somero* (figura 3.3).

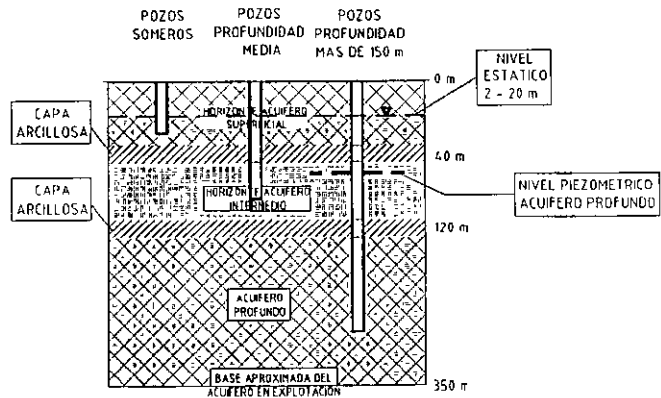
Entre los materiales de Terciario Superior continental predominan los sedimentos lacustres. Se les detectó en muchos sitios sobreyaciendo a basaltos compactos y/o arcillas que se comportan como impermeables. Estos materiales lacustres presentan permeabilidad y constituyen una zona acuífera denominada en el presente trabajo acuífero *intermedio*. Con profundidad hasta el horizonte arcilloso confinante de alrededor de 100 m.

La parte basal del Terciario Superior continental se encuentra constituida por basaltos fracturados y materiales granulares lacustres, ambos permeables. Estos, sobreyacen tanto a riolitas como a otros sedimentos arcillosos de permeabilidad variable y que en su conjunto constituyen un horizonte acuífero, denominado en el presente trabajo como acuífero *profundo*.

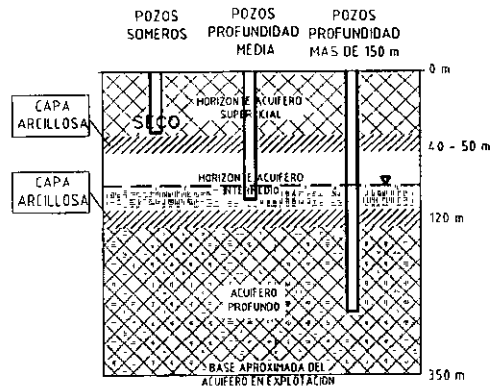
Los 3 horizontes acuíferos mencionados en los párrafos anteriores, correspondientes a acuífero *somero*, acuífero *intermedio* y acuífero *profundo*, presentan niveles piezométricos diferentes que los identifican a cada uno, cuya descripción a detalle se incluye en el capítulo de hidrología subterránea. El acuífero superficial es fácilmente identificable en el Valle de Numarán, donde existe un gran número de pozos de entre 10 y 20 metros de profundidad total con niveles estáticos a entre 4 y 6 metros de profundidad. Se identifica también en las cercanías de las principales corrientes superficiales. El acuífero intermedio fue el principalmente explotado en décadas anteriores (1970-1980) con pozos cuyas profundidades variaban entre 80 y 120 metros. En la década de los 80's cobro auge la veda que impedía la perforación de nuevos alumbramientos para disminuir el grado de sobreexplotación y evitar el abatimiento de los niveles. Es interesante hacer notar que los reglamentos de la veda permitían nuevas perforaciones siempre y cuando se alcanzaran profundidades totales del orden de 300 metros y se ademara y cementara la porción o mitad superficial del pozo, con el objeto de explotar solo el acuífero *profundo*, generalmente termal que ya se había detectado y proteger el principal acuífero en explotación, correspondiente al denominado en este trabajo como *intermedio*.

Actualmente la explotación del acuífero *intermedio* ha ocasionado su abatimiento casi total, lo que ha obligado a la sustitución por pozos más profundos.

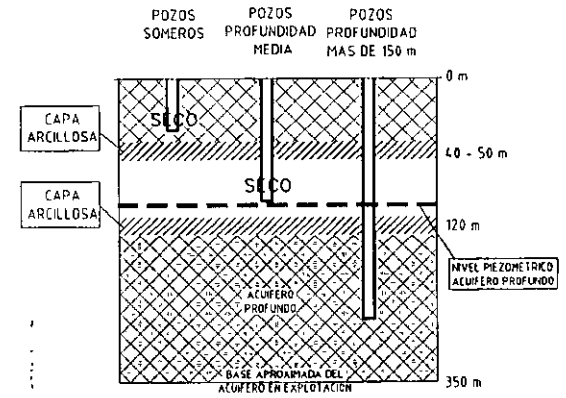
ACUIFERO SOMERO
TIPICO DEL VALLE DE NUMARAN









ACUIFERO INTERMEDIO
TIPICO DE LA ZONA NORTE






ACUIFERO PROFUNDO



-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS SOMEROS REPRESENTAN AL HORIZONTE ACUIFERO SUPERFICIAL
-  REPRESENTA EL HORIZONTE ACUIFERO INTERMEDIO
-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS PROFUNDOS REPRESENTAN AL ACUIFERO PROFUNDO

-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS SOMEROS REPRESENTAN AL HORIZONTE ACUIFERO SUPERFICIAL.
-  REPRESENTA EL HORIZONTE ACUIFERO INTERMEDIO
-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS PROFUNDOS REPRESENTAN AL ACUIFERO PROFUNDO

-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS SOMEROS REPRESENTAN AL HORIZONTE ACUIFERO SUPERFICIAL
-  REPRESENTA EL HORIZONTE ACUIFERO INTERMEDIO
-  ZONA CON NIVELES ESTATICOS PROFUNDOS REPRESENTAN AL ACUIFERO PROFUNDO

3.4.- PRUEBAS DE BOMBEO

La prueba de bombeo consiste en la observación de las fluctuaciones del nivel piezométrico en un pozo durante el abatimiento o recuperación producido por el bombeo.

Al iniciarse el bombeo en un pozo, el nivel del agua sufre un abatimiento el cual es mayor en el propio pozo y decrece conforme aumenta la distancia. La fuerza que induce a que el agua se mueva hacia el pozo, es el gradiente que se genera entre las cargas hidráulicas del propio pozo y las próximas a él. El agua fluye a través del acuífero aumentando su velocidad conforme se acerca al pozo. La Ley de Darcy expresa que en un medio poroso el gradiente hidráulico es directamente proporcional a la velocidad. El abatimiento en la superficie piezométrica forma un cono de depresión, cuyo tamaño y forma dependen del caudal, tiempo de bombeo y características del acuífero. El objetivo principal de las pruebas de bombeo es estimar las características hidrodinámicas de la formación acuífera como son transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento. También se pueden llegar a definir el tipo de acuífero, la existencia de barreras laterales, recarga de ríos o manantiales, radio de influencia del pozo, factor de infiltración y predicción del comportamiento de los niveles piezométricos. Con las observaciones realizadas se construye, la gráfica de variación del nivel dinámico en relación al tiempo.

Los valores de transmisibilidad obtenidos van de 70×10^{-3} a 0.2×10^{-4} m²/seg. Datos obtenidos del trabajo CEAG, 1998.

3.5.- PIEZOMETRÍA

Se utilizaron las mediciones efectuadas en mayo del 2000 las cuales fueron interpretadas y configuradas, lo que permitió complementar la red de pozos de monitoreo. Es importante mencionar el método de trabajo seguido ya que, en base a ello, se puede calificar la precisión de los resultados. En algunas zonas e llega a contar con pocos datos, por lo que la precisión de los resultados será baja. En contraste, ciertos valles han llegado a contar con mediciones suficientes, distribución adecuada y niveles validos a fin de que sean representativos de un mismo horizonte acuífero. Por ello, a continuación se describen los datos seguidos para el trazo e interpretación de las curvas piezométricas.

- (1) Se vaciaron sobre un plano los valores de profundidad al nivel estático medidos en mayo del 2000.
- (2) Se vaciaron sobre el mismo plano, las cotas de brocales y la elevación del nivel estático
- (3) Se analizaron los valores mencionados en los puntos anteriores, lo cual permitió detectar sitios con cota de brocal errónea, así como niveles estáticos extraños.
- (4) Las cotas erróneas fueron corregidas.
- (5) Los niveles estáticos extraños fueron verificados en el campo.
- (6) En algunos casos, se llegaron a detectar 2 horizontes acuíferos, uno superficial y otro profundo, lo cual se tomó en cuenta para la selección de los puntos utilizados para la configuración.
- (7) Existían zonas de datos, donde se llevaron a cabo visitas de campo adicionales, lo cual permitió definir en una forma más completa la red piezométrica.



Las configuraciones construidas se realizaron en forma manual, aplicando lógica elemental y criterio geohidrológico. En ningún caso se utilizaron paquetes de cómputo para el trazo de configuraciones mecánicas.

En el año de 1998 se estableció una red de pozos piloto. A partir de 1999, la CEAG realiza mediciones piezométricas semestrales (J.A. Trujillo).

3.6.- PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO

La profundidad al nivel estático se midió en un gran número de aprovechamientos durante el inventario realizado, así como en visitas posteriores para la realización de la piezometría y pruebas de bombeo.

Se hace notar que la zona presenta un desarrollo agrícola intensivo en el que, durante la temporada de estiaje, la gran mayoría de los pozos se encuentran en operación continua, lo que dificulta la obtención de niveles estáticos.

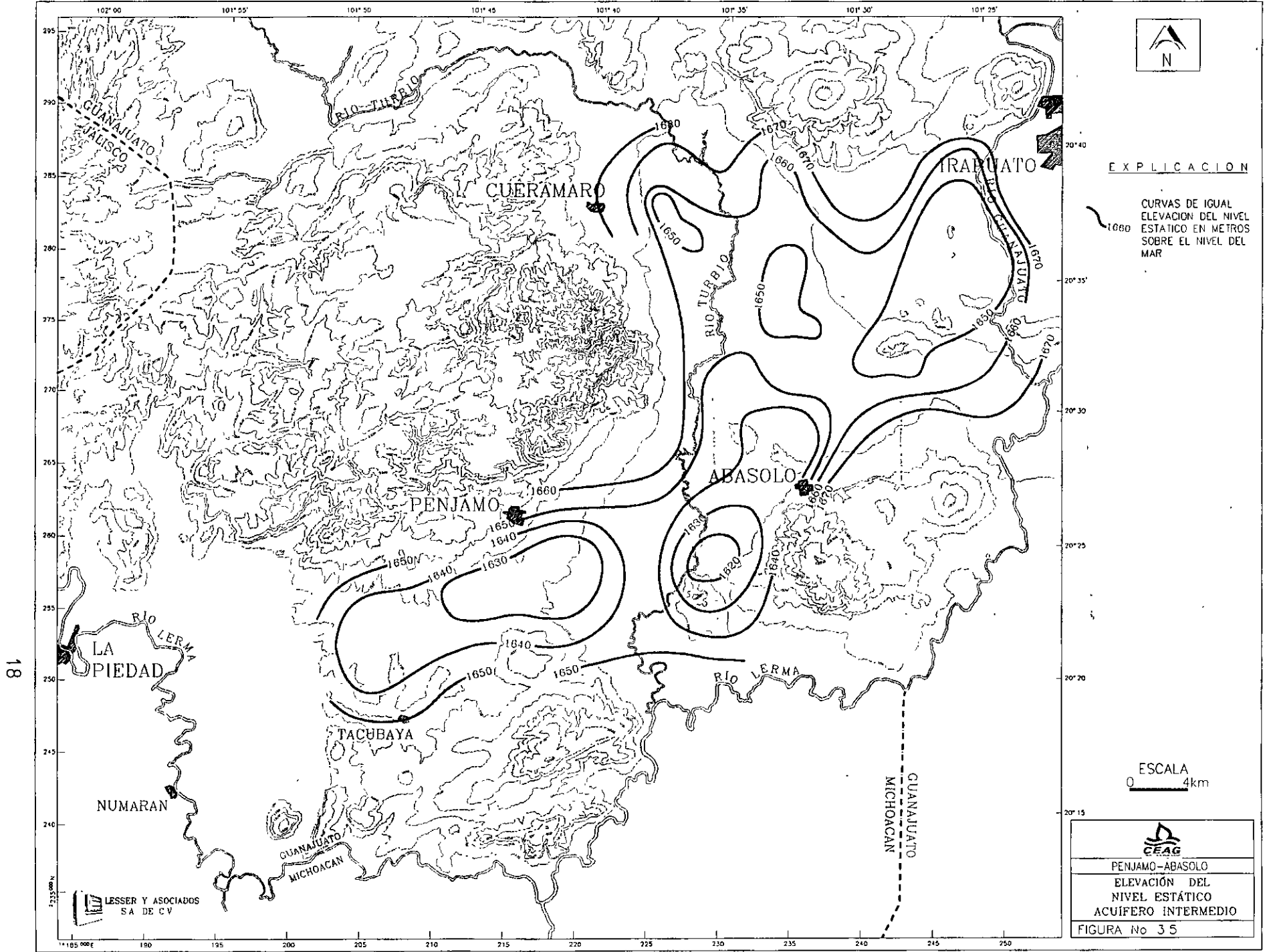
La profundidad al nivel estático se vació sobre un plano de localización en el que fue necesario hacer una diferenciación de acuerdo al horizonte acuífero al que representan, ya sea *somero*, *intermedio* o *profundo* (figura 3.4). A continuación se describen las profundidades de cada horizonte.

Existen sitios donde los pozos tienen profundidades de alrededor de 50 metros los que presentan niveles estáticos del orden de 20 metros. En varios sitios junto a estos pozos se han construido otros a mayor profundidad, en los que se detectan los niveles correspondientes a los horizontes acuíferos *intermedio* y *profundo*. Ejemplos de ello lo constituyen los pozos 166 y 953, ubicados sobre la carretera Cuernavaca-Irapuato, antes de su cruce con la vía del ferrocarril. El pozo 166 tiene una profundidad total de 60 metros y un nivel estático a 17 metros; el pozo 953 ubicado a 600 metros al oeste del anterior, tiene una profundidad total de 250 metros y un nivel estático a 89 metros de profundidad.

Otro ejemplo corresponde al pozo 2261 y su reposición ubicada a 10 metros de distancia. Se localiza en el cruce del ferrocarril con la carretera a San Gregorio cerca del Río Turbio. El pozo antiguo tiene una profundidad total de 100 metros y un nivel estático a 19 metros de profundidad. Su reposición ubicada a 10 metros de distancia tiene una profundidad total de 250 metros y un nivel estático a 58 metros. Este último corresponde al pozo de abastecimiento de la estación Corralejo.

De manera similar se pueden encontrar un gran número de situaciones semejantes, como por ejemplo el pozo 1267 que representa al acuífero *somero* y junto a él el pozo 1128 que representa al acuífero *intermedio*. El pozo 1267 tiene una profundidad del orden de 50 metros y un nivel estático de 16 metros; el pozo 1128 alcanzó 100 metros y su nivel se establece a los 40 metros.

Un ejemplo más, se tiene entre los pozos 2351 del acuífero somero y 2514 del acuífero profundo, ubicados junto al Río Turbio al oeste de Abasolo. El pozo 2351 tiene un nivel a 8 metros de profundidad mientras que el pozo 2514 presenta el nivel estático a 73 metros de profundidad. El pozo 2351 tiene 16 metros de profundidad, mientras que el pozo 2514 tiene 200 metros de profundidad total.



EXPLICACION

CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

ESCALA
0 4km



PENJAMO-ABASOLO
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO ACUÍFERO INTERMEDIO

FIGURA No 35

LESSER Y ASOCIADOS SA DE CV

RESUMEN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO
DE PÉNJAMO-ABASOLO, GTO.

Una vez analizados cada uno de los pozos y separados de acuerdo al acuífero que representan, se trazaron configuraciones que se presentan en el plano 7.5. Por lo que respecta al horizonte *somero*, éste incluye datos que permitieron el trazo de curvas exclusivamente en los alrededores del poblado y estación de ferrocarril Corralejo, donde se marcó la curva 15 metros de profundidad. Por lo que respecta al acuífero *intermedio*, éste se detectó y configuró en la parte central norte del Valle de Pénjamo-Abasolo donde se marcaron las curvas de 35 y 40 metros de profundidad.

En relación al acuífero profundo, este se detecta en prácticamente todo el valle, presentando una profundidad al nivel estático entre 60 y 100 metros. Los valores menores se encuentran en los alrededores de Cuerámara, donde tiende a confundirse el acuífero *profundo* con el *intermedio*. Su presencia es clara en el resto del valle siendo factible el trazo de curvas.

Por lo que respecta al Valle de Numarán, éste presenta condiciones geohidrológicas diferentes al Valle de Pénjamo. Por una parte, esta zona recibe agua para riego del Río Lerma. El nivel estático se encuentra a profundidades de entre 2 y 20 metros, siendo representativas del horizonte el acuífero *somero* (Figura 7.2). Existen un gran número de pozos someros con caudales de extracción reducidos que, junto con las aguas superficiales procedentes del río, cubren las necesidades de agua de la zona, razón por la que no ha existido necesidad de explotar a mayor ritmo las aguas subterráneas, lo que ha permitido conservar un nivel estático somero y aparentemente similar al que hace 40 años prevalecía en el Valle de Pénjamo-Abasolo.

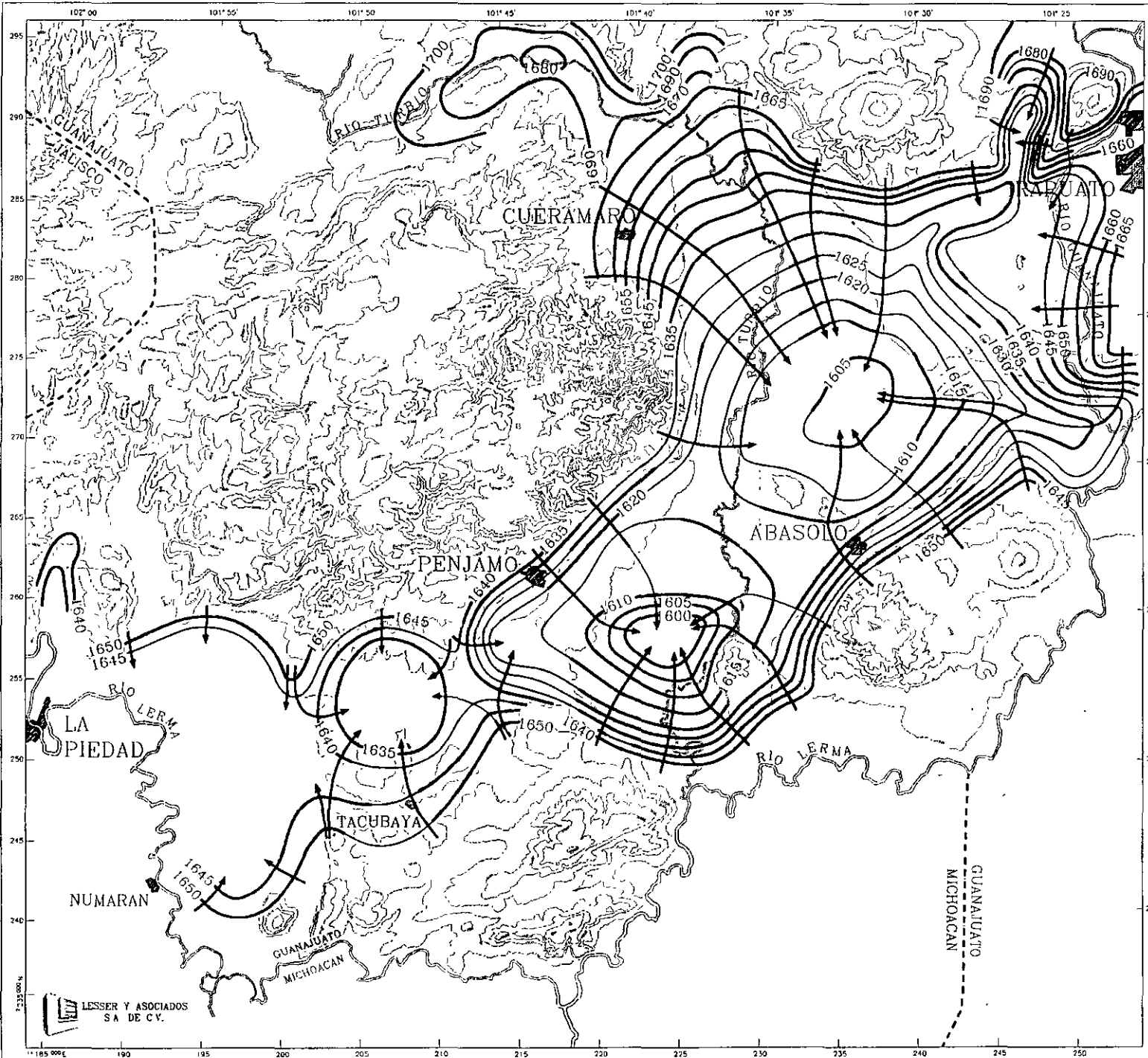
En la zona occidental correspondiente al Valle de Numarán, el nivel estático se encuentra somero, a profundidades de entre 2 y 20 metros. Dentro de la figura 3.3 se marca el rango de profundidad por zonas; para los pozos ubicados en la parte norte del valle de Numarán el nivel se encuentra entre 2 y 8 metros de profundidad; en la parte central entre 4 y 20 metros y en la parte sur entre 4 y 21 metros de profundidad.

Los aprovechamientos ubicados en el área de la presa Las Cuevas de Cortes, corresponden al acuífero *intermedio* por presentar profundidades entre 24 y 60 metros.

Al oriente de Numarán, correspondiente a la zona de Tacubaya y continuando hasta Pénjamo y Abasolo, el acuífero explotado corresponde al *profundo* donde se presentan profundidades al nivel del agua que varían entre 50 y 120 metros. Alrededor del Río Turbio existe una zona donde los aprovechamientos existentes son representativos del acuífero *intermedio* y *somero*, con profundidades de 38-56 y 6-8 metros respectivamente.

Hacia el norte de la zona de trabajo, entre Cuerámara y continuando en una franja hasta Pueblo Nuevo, los aprovechamientos corresponden al acuífero *intermedio* y presentan profundidades del nivel estático entre 25 y 50 metros. Se hace notar que varios pozos sobre esta zona alcanzan el acuífero profundo.

En el noreste de la zona de trabajo se encuentran un gran número de pozos que indica que el acuífero que se explota corresponde al acuífero profundo, con niveles de entre 60 y 90 metros de profundidad.



EXPLICACION

CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO

ESCALA
0 4km



PENJAMO-ABASOLO
ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO
JULIO DE 1998

FIGURA No 36

3.7.- ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO

A partir de las mediciones de profundidad al nivel estático y las cotas del terreno, se calculó la elevación del nivel estático respecto al nivel del mar. Se formó una red de pozos piloto para mediciones piezométricas que sufrió varias modificaciones durante el desarrollo del trabajo debido a dificultades que se presentaban en los pozos para su medición. La elevación del nivel estático respecto al nivel del mar se estudio tanto para el acuífero *intermedio* como para el *profundo*

Por lo que respecta al *intermedio* su configuración se muestra en la figura 3.5, observándose que se presentan curvas de 1680 a 1620 msnm. Se establece un flujo de las elevaciones topográficas hacia el centro de los valles. A alrededor de 7 kilómetros al suroeste de Abasolo, se presenta el centro de un cono de abatimiento. Este acuífero se encuentra en proceso de extinción. La configuración se obtuvo en los datos del censo de aprovechamientos e interpolando las cotas de brocales a partir de los planos del INEGI.

Por lo que respecta al acuífero *profundo*, este se extiende en todo el valle y es la principal fuente de extracción de agua subterránea. En este acuífero se estableció la red piezométrica la cual esta constituida por 86 pozos en los que se procuró que existiera una distribución espacial que cubriera todo el valle y que cada sitio cumpliera con las condiciones mínimas para poder efectuar mediciones periódicas y representativas del acuífero.

Se trazó una configuración de la elevación del nivel estático sobre el nivel del mar para el mes de julio de 1998 (figura 3.6). en la cual se observa que existen curvas que van de 1600 a 1700 metros. Los valores (acuifero profundo) mayores se encuentran en las estribaciones de las elevaciones topográficas del norte, a partir de donde descienden gradualmente hacia el centro del Valle de Pénjamo-Abasolo, donde se llevo a trazar la elevación 1605 msnm. A partir de la Sierra de Abasolo, se trazó la curva 1650 msnm que desciende al centro del valle a 1605, de donde se deduce un flujo de agua subterránea de la sierra hacia el noreste. Al norte de la Ciudad de Abasolo se encuentra un cono piezométrico cuya porción más profunda se ubica a la cota 1605 msnm, donde convergen los flujos de agua subterránea de los alrededores.

Hacia el oriente del poblado de Pénjamo se presenta otro cono piezométrico, cuya porción central se eleva a 1600 msnm, estableciéndose un flujo radial que procede de las elevaciones topográficas y converge hacia el centro del valle.

Al norte de Tacubaya y correspondiente al estrechamiento del valle provocado por la presencia de las Sierras de Pénjamo al norte y Tacubaya al sur, se establece otro cono piezométrico, en cuya parte central se trazó la curva 1635 msnm.

Por lo que respecta al Valle de Numarán ubicado en la porción suroeste del área trabajada, se establece un flujo subterráneo radial procedente de las elevaciones topográficas y que fluye en dirección al centro del valle.

La forma del esquema del flujo subterráneo permite dividir la zona en tres áreas. La primera correspondiente al área de Pénjamo-Abasolo; la segunda correspondiente a la zona de Tacubaya y la

tercera al Valle de Numarán, existiendo independencia entre ellas causada por la modificación del esquema de flujo, originada por el bombeo.

3.8.- EVOLUCION DEL NIVEL ESTÁTICO

Se recopiló la información piezométrica, de volúmenes de extracción y geohidrológica en general, de la zona de estudio, que se presenta en estudios realizados en años anteriores.

La información existente es de tipo general. Se mencionan volúmenes de extracción para años anteriores englobando a los horizontes acuíferos *somero*, *intermedio* y *profundo*. La extracción principal correspondía a los horizontes *intermedio* y *somero*.

Estudio realizado en fechas más recientes correspondientes al programa PROMMA de la CNA, incluye datos piezométricos de gran utilidad para el año de 1996, aunque mezcla datos de los diferentes horizontes acuíferos. Dichos datos se reinterpretaron y a partir de ellos se obtuvo la configuración de elevación del nivel estático para el año de 1996, que se muestran en la figura 7.10. No fue factible trazo de configuraciones de elevación del nivel estático para fechas anteriores.

Tomando en cuenta la información disponible se calculó la evolución sufrida por el nivel estático del acuífero *profundo* entre 1996 y 1998. Se obtuvo una variación de almacenamiento para la zona considerada dentro del balance geohidrológico de -64 millones de m³/año.

CAPÍTULO 4.- MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

4.1.- FUNCIONAMIENTO DEL ACUIFERO

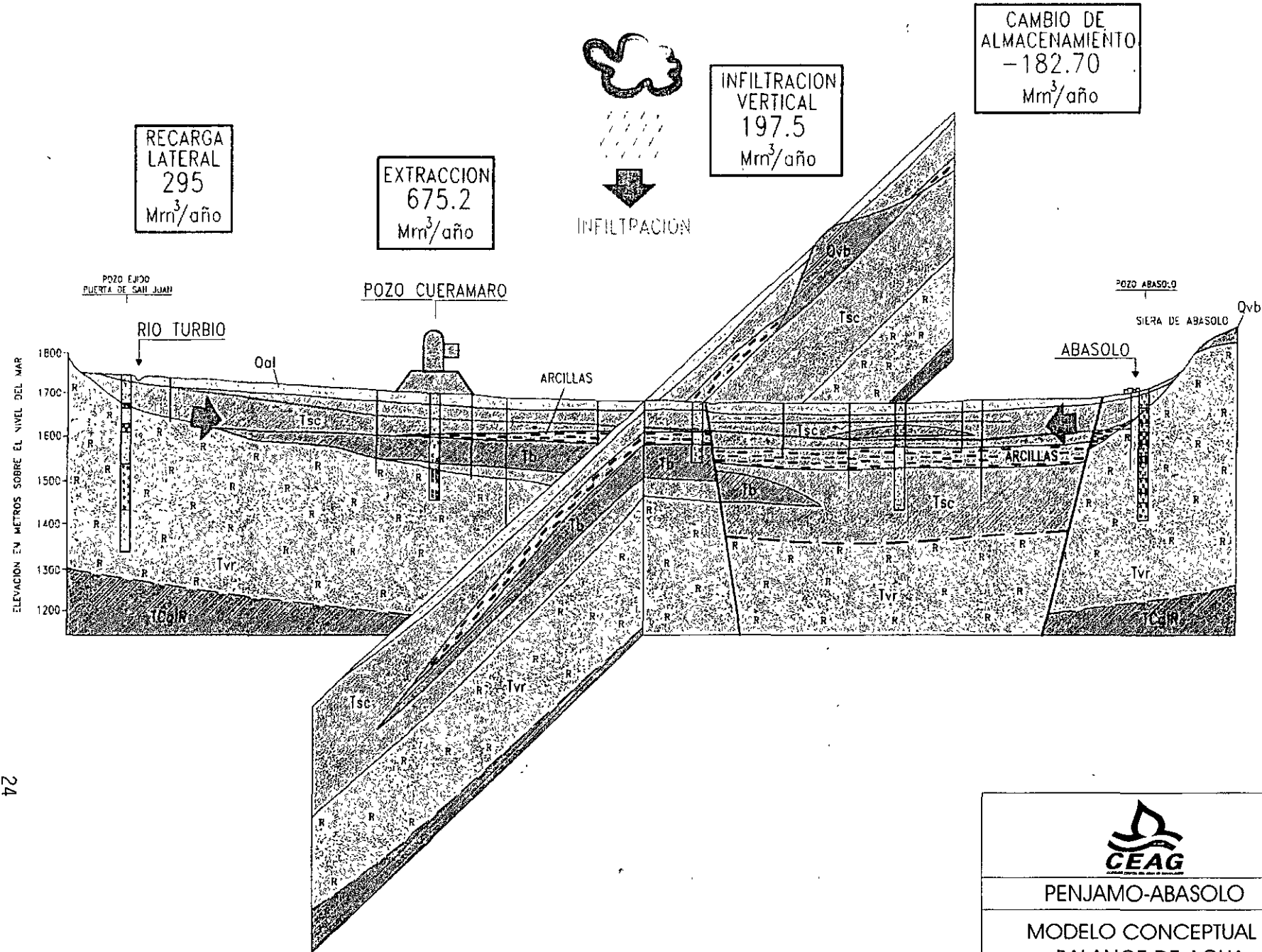
La zona de estudio corresponde al valle de Pénjamo-Abasolo, el cual tiene una forma prácticamente plana. El subsuelo esta constituido por una alternancia de materiales aluviales, sedimentos lacustres y coladas de lava que en su mayoría se comportan como permeables y permiten la infiltración y circulación de agua en el subsuelo. Presentan intercalaciones de horizontes arcillosos que provocan el almacenamiento de agua a diferentes profundidades (figura 4.1).

El valle se encuentra limitado al oeste por la Sierra de Pénjamo, al norte por la Sierra de El Veinte, al sureste por la Sierra de Abasolo y en la parte sur por la Sierra de Tacubaya. Estas sierras se encuentran constituidas por rocas ígneas estrusivas existiendo dos tipos principales, basaltos y riolitas. En general las elevaciones topográficas permiten la infiltración del agua de lluvia y constituyen zonas de recarga al acuífero. Al sur de Pénjamo el valle presenta un estrechamiento, volviéndose a abrir hacia el oeste en el área que corresponde al valle de Numarán.

En la mayor parte de la zona de estudio existe una capa de arcillas impermeables entre los 40 y 50 metros de profundidad, que ocasiona la formación de un horizonte acuífero superficial cuyo nivel se establece a entre 2 y 20 metros de profundidad. Se le denominó horizonte *acuifero somero*.

Entre los 80 y 120 metros de profundidad, se encuentra otro horizonte arcilloso impermeable que en ocasiones pasa lateralmente a un basalto compacto también impermeable. Estos materiales ocasionan la formación de una zona acuífera denominada aquí acuífero *intermedio*, cuyo nivel se encuentra a profundidades variables, predominando el rango de 25-50 metros. Los pozos que se encuentran explotando a este acuífero alcanzan profundidades del orden de 80-120 metros. Durante la década de los 70's, el Valle de Pénjamo-Abasolo se encontraba explotado por un gran número de pozos que extraían agua de este horizonte acuífero, empezando a mostrar signos de sobreexplotación que repercutían en el abatimiento de los niveles. Por ello, la exSecretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos estableció veda a la perforación de nuevos pozos. Ya para dicha década de los 70's, se conocía que a mayor profundidad existían sedimentos lacustres y lavas riolíticas de alto potencial geohidrológico y que frecuentemente presentaban termalismo. La exSARH emitió criterios para el otorgamiento de permisos para perforación, que indicaban que los pozos nuevos deberían explotar la zona acuífera de mayor profundidad, para lo cual deberían cementar la porción superficial del pozo y evitar así aumentar la sobreexplotación de los acuíferos superficiales.

En los estudios que realiza la CEASG se observa que, en la mayor parte de la zona de trabajo, los horizontes acuíferos identificados como *somero* e *intermedio* han quedado agotado en varias zonas y en otras, se encuentran a punto de secarse. Así mismo, que el horizonte de mayor extracción corresponde al denominado acuífero *profundo*



24

4.2.- BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA

4.2.1.- TRANSMISIBILIDAD Y CAMBIO DE ALMACENAMIENTO

Se realizaron 19 etapas de abatimiento y 11 de recuperación, cuyos datos se interpretaron utilizando el programa *Ground Water for Windows*. Los datos y gráficas de las pruebas se incluyen en el anexo del informe original.

Las pruebas de bombeo con pozo de observación presentaron mediciones que impidieron el cálculo de coeficiente de almacenamiento. Se recurrió a pruebas de bombeo con pozo de observación efectuadas en las zonas aledañas y se le asignaron a la zona de trabajo los valores siguientes: en la porción central, donde se encuentra el horizonte acuífero *profundo* semiconfinado, se utilizó el valor de 0.003, mientras que en una franja que bordea a los valles, donde el acuífero *profundo* se confunde con el *intermedio*, se asignó un valor de coeficiente de almacenamiento de acuífero libre que asciende a 0.05.

Los valores de transmisibilidad calculados. Varían entre 1.57×10^{-5} y $0.1 \text{ m}^2/\text{seg}$, encontrándose los valores más altos al norte del Valle de Abasolo, así como en los alrededores de la Sierra de Tacubaya, debido a la presencia de rocas basálticas.

4.2.2. - ANCHO Y GRADIENTE HIDRAULICO DE LAS CELDAS

En base a la configuración de la elevación de la superficie piezométrica respecto al nivel del mar, se trazaron celdas para el cálculo de la entrada por flujo subterráneo las cuales se muestran en la figura No. 3.5. Se marcaron 33 celdas cuyas longitudes (L) varían de 300 a 2300 metros, presentando un gradiente hidráulico que varía de 0.002 a 0.016.

4.2.3.- CALCULO DEL CAUDAL DE ENTRADA

Se obtuvo la cantidad de agua que ingresa al acuífero en forma de flujo subterráneo procedente de las elevaciones topográficas y calculada ésta a partir de las celdas que se ubicaron sobre las estribaciones del valle. Para el cálculo del caudal de entrada se utilizó la fórmula siguiente:

$$Q = Tbi$$

Donde Q es el caudal de agua en litros por segundo, T corresponde a la transmisibilidad del medio en m^2/seg ; b es el ancho de la celda e ; i corresponde al gradiente hidráulico de la celda. Con los cálculos de entrada por flujo subterráneo se obtuvo una recarga o entrada de agua de $225.869 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anuales}$ para toda la zona de balance. Este volumen corresponde a un caudal de $7.17 \text{ m}^3/\text{seg}$.

4.2.4.- ECUACION DE BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA

La ecuación de balance de agua subterránea establece que las entradas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento:

RESUMEN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO
DE PÉNJAMO-ABASOLO, GTO

Entradas (Es) = salidas (Ss) + cambio de almacenamiento (As).

Analizando los conceptos que se incluyen dentro de la ecuación, observándose que las entradas están constituidas por el flujo subterráneo que alimenta al valle en las estribaciones de las sierras (Es), así como a la infiltración vertical que recibe el acuífero y que puede corresponder a infiltración por agua de lluvia, a retornos de riego, a infiltración por pérdida en canales, así como a infiltración por aporte de los horizontes acuíferos superficiales que pueden estar drenando hacia mayores profundidades. Todos estos conceptos se englobaron dentro del renglón denominado infiltración vertical (Iv) y la cual se consideró como incógnita dentro de la ecuación de balance.

Por lo que respecta a las salidas de agua del acuífero, se incluyó a las salidas subterráneas (Ss) que en el presente caso son nulas debido a que no existen flujos subterráneos de salida del acuífero hacia otras áreas. La principal forma como se descarga el acuífero corresponde a la extracción por bombeo (Ext), la que conforme se mencionó en el inciso 3.2 fue calculada y asciende a $440 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anuales}$ para la zona incluida dentro del área de balance y correspondiente al acuífero *profundo*. Se hace notar que la extracción total para la zona en estudio incluyendo a los acuíferos *superficial e intermedio*, así como a pozos ubicados fuera del área de balance y asciende a $721 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anuales}$.

Podrían existir otros tipos de descargas o salidas de agua del acuífero, como por ejemplo descarga de manantiales o evapotranspiración, sin embargo, en el presente caso estos procesos no se llevan cabo:

Tomando en cuenta los conceptos anteriores, la ecuación de balance queda como sigue:

$$Es + Iv = Ext + As$$

$$Iv = Ext - Es + As \text{ (figura No. 8.2)}$$

Los resultados del balance se muestran en la figura 4.1 (*acuífero profundo*), observándose una entrada subterránea de $225 \text{ Mm}^3/\text{anuales}$, una infiltración vertical al acuífero profundo de 151.2 una extracción de $440.2 \text{ Mm}^3/\text{anuales}$. La diferencia entre la entrada de agua al acuífero que asciende a $376.2 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y la salida en forma de explotación por bombeo que es de 440.2 , corresponde al cambio de almacenamiento o sea $-64 \text{ Mm}^3/\text{anuales}$.

De igual manera se efectuó el balance de agua subterránea para el horizonte acuífero intermedio, se obtuvo una entrada subterránea de 70.0 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, la extracción por bombeo de 235 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ un cambio de almacenamiento de -118.7 , por lo que se refiere a la infiltración vertical, le corresponden 46.3 millones de $\text{m}^3/\text{año}$.

Se hace notar que de los 235 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ de extracción, 115 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ corresponden a extracción directa por pozos del acuífero *intermedio* y los 120 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ restantes son la recarga que recibe el horizonte acuífero *profundo* procedente del horizonte acuífero *intermedio*.

CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se identificaron 3 horizontes acuíferos, denominados: horizonte acuífero somero, horizonte acuífero intermedio y horizonte acuífero profundo.
- En el valle de Pénjamo los horizontes acuíferos somero e intermedio se encuentran prácticamente agotados.

Se encontraron y censaron 2926 aprovechamientos, de los cuales 5 corresponden a manantiales, 152 a norias y 2769 restantes a pozos. De los 2769 pozos 2383 operan, 148 se encuentran abandonados; 74 en rehabilitación o cambio de equipo, 241 en proceso de perforación y; 140 no operan.

La extracción de agua subterránea por bombeo asciende a 721,2 Mm³/año para toda la zona estudiada, que equivale a 22.89 m³/seg.

El abatimiento medio anual varía entre 1 y 3 metros por año.

En la actualidad se perforan aproximadamente 100 pozos por año (reposición), con lo cual se incrementa el caudal de extracción en 31.5 millones de m³/año.

RECOMENDACIONES

Intensificar los programas de uso eficiente del agua

En el renglón relativo al agua potable se recomienda

- a) Elaborar un análisis de tarifas tendiente al incremento de las mismas, a fin de fomentar la disminución del consumo.
- b) Atacar las fugas tanto domiciliarias como en conducción.
- c) Continuar con las políticas de uso eficiente que incluyen la sustitución de muebles sanitarios y dispositivos ahorradores de agua.

En el renglón de riego, la extracción del acuífero asciende al 93% del total. Se recomienda:

- Continuar y acelerar los programas de aplicación de técnicas de riego y selección de cultivos para ahorro de agua.
- Cambio por cultivos que requieran menor cantidad de agua
- Reutilizar las aguas residuales en riego e industria.
- Elaboración de un estudio socioeconómico enfocado al cambio de actividad agrícola por agropecuaria e industrial, principalmente en las zonas centrales del valle donde la extracción ha ocasionado la formación de conos de abatimiento.

RESUMEN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS DEL ACUÍFERO
DE PÉNJAMO-ABASOLO, GTO

- Incrementar la recarga del acuífero mediante la construcción de diversas estructuras tales como presas, adaptación de antiguos cauces para provocar infiltración, etc. Aplicar programas de reforestación para fomentar la infiltración el agua de lluvia hacia los acuíferos.

Se considera una población de 400 000 habitantes en los principales centros urbanos del área estudiada, con una dotación de 200 litros por habitante por día lo cual da un volumen de abastecimiento de alrededor de 1 m³/seg. Si consideramos que el 40% de dicho volumen se pierde por evaporación, se tiene un remanente del 60% que corresponde al agua residual y que es del orden de 600 lps. Este caudal se podría intercambiar en los renglones industriales y riego, a fin de disminuir la sobreexplotación a que se encuentra sujeto el acuífero, principalmente hacia las zonas centrales de los valles que es donde se presentan los niveles de bombeo más profundos.

La tecnificación del riego es un aspecto importante. Existen dos zonas de riego con características diferentes. La primera con una tecnología de alto nivel, fuertes inversiones y gran rendimiento. En contraste, se tiene a la agricultura de bajo rendimiento económico. Se recomienda procurar la sustitución de cultivos de bajo rendimiento económico y alto consumo de agua, por otros de mayor rendimiento, que permitan fomentar un mayor ingreso entre los agricultores y una disminución en los volúmenes de extracción de agua del subsuelo.

7. Asignación de propiedades Conductividad Hidraulica. Asignaremos la conductividad hidraulica de acuerdo a las figuras 7b, 7c, 7d y figura 9. Y la distribución se muestra en la figura vmf 15 y vmf 16.

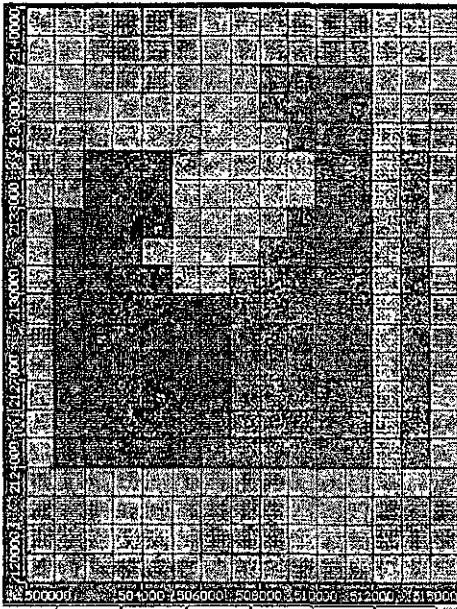


Figura vmf 15. Distribución de la conductividad hidráulica.

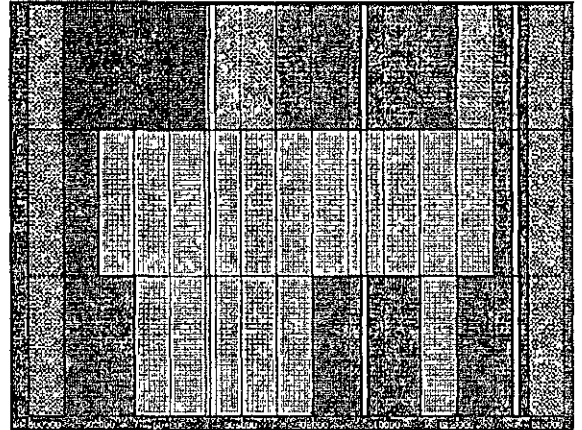


Figura vmf16. Sección transversal mostrando la conductividad hidráulica.

8. Rendimiento específico Asignación del rendimiento específico en base a las figuras 8a, 8b, 8c; y su distribución se observa en la figura vmf17 y vmf18.

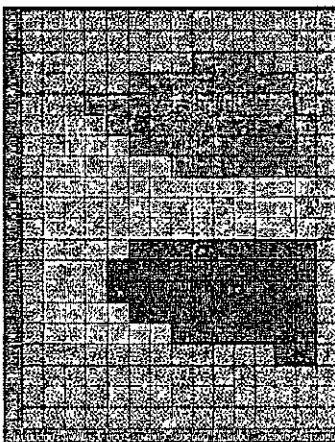


Figura vmf17. Distribución del rendimiento específico S_y en la capa 1.

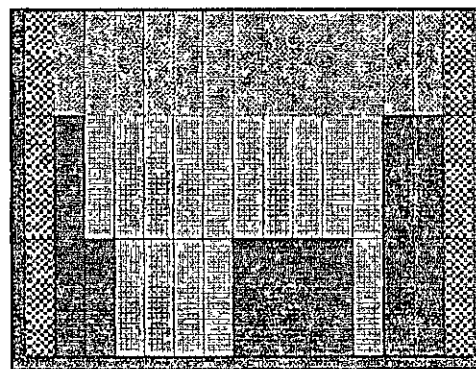
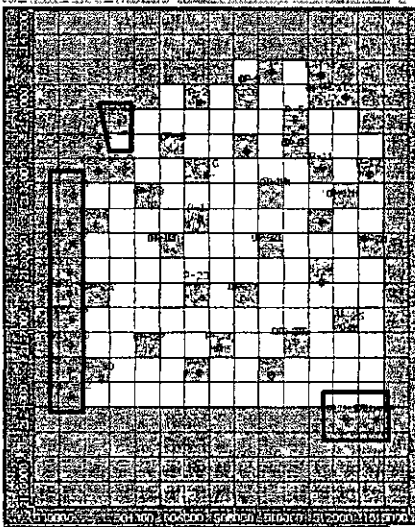


Figura vm18. Sección transversal mostrando la distribución del S_y , en la vertical.

9. Fronteras. Las fronteras a considerar son las siguientes, figura 9: entradas laterales. Estas se simularan mediante pozos de inyección en las celdas que se tenga considerada la recarga figura vmf19. Al igual las salidas a través de la frontera serán simuladas mediante pozos de extracción. La recarga vertical se aplicara en toda la superficie con un valor de 0.0006849 m/dia, figura vmf20. Para simular el rio se utilizara la frontera correspondiente, que proporciona VMF, figura vmf21.



Recharge - [Assign Single]

File Help

Zone # [2] Zone Name [Recharge zone (2)] Layer # [1]

Edit selected row(s) or column:

Start Time [day]	Stop Time [day]	Recharge [m/d]	Active
0.0	730	0.0006849	<input checked="" type="checkbox"/>

OK Cancel

Figura vmf19. Recarga lateral y salidas laterales mediante pozos de acuerdo a la tabla 3

Figura vmf20. Muestra los datos para la recarga vertical.

River - [Assign Single]

File Help

Description: [River(1)]

Assign to appropriate layer

Use default conductance formula

Edit selected row(s) or column:

Start Time [day]	Stop Time [day]	River Stage [m]	Riverbed Bottom [m]	Conductance [m ² /day]	Riverbed Thickness [m]	Riverbed Kz [m/d]	Active
0.0	730	1150	1147.5	(S0X*SDY)*KZ/15	15	5	<input checked="" type="checkbox"/>

OK Cancel

Figura vmf21. Datos para la frontera de río

POZOS DE RECARGA Y EXTRACCIÓN LATERAL

POZO No.	COORDENADAS		GASTO M3/DIA	
	X	Y	2002	2003
REC-1	503434	2135497	1000	1000
REC-2	502561	2134481	1000	1000
REC-3	502561	2133466	1000	1000
REC-4	501589	2132538	1000	1000
REC-5	501457	2131391	1000	1000
REC-6	501545	2130552	1000	1000
REC-7	501457	2129404	1000	1000
REC-8	501413	2128521	1000	1000
REC-9	501545	2127461	1000	1000
REC-10	501457	2126446	1000	1000
REC-11	501456	2125430	1000	1000
REC-12	501545	2124415	1000	1000
REC-13	512495	2123488	1000	1000
REC-14	513687	2123488	1000	1000
EXT-1	511567	2137395	-1000	-1000
EXT-2	512539	2136468	-1000	-1000

Tabla 3. Datos de la recarga lateral.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS

MODULO III MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

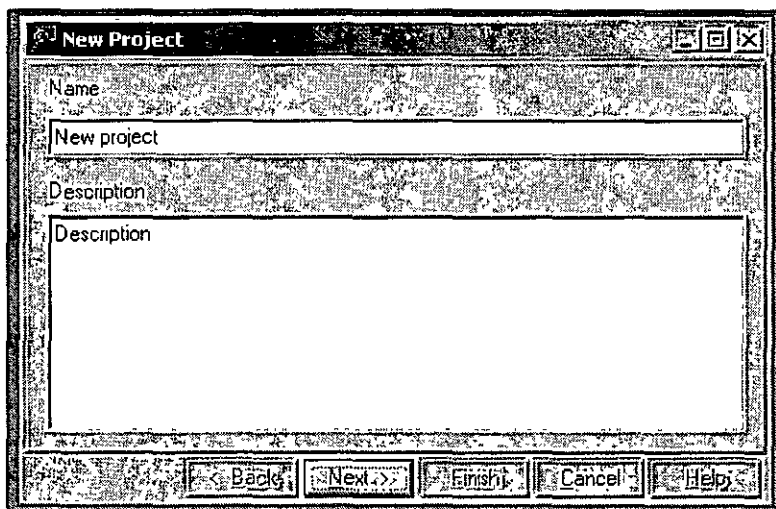
Tema Anexo EJERCICIO: DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ZONA VADOSA UTILIZANDO EL MODELO VLEACH

EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

EJERCICIO: DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ZONA VADOSA UTILIZANDO EL MODELO VLEACH

Por: Ing. Juan Manuel Lesser Illades

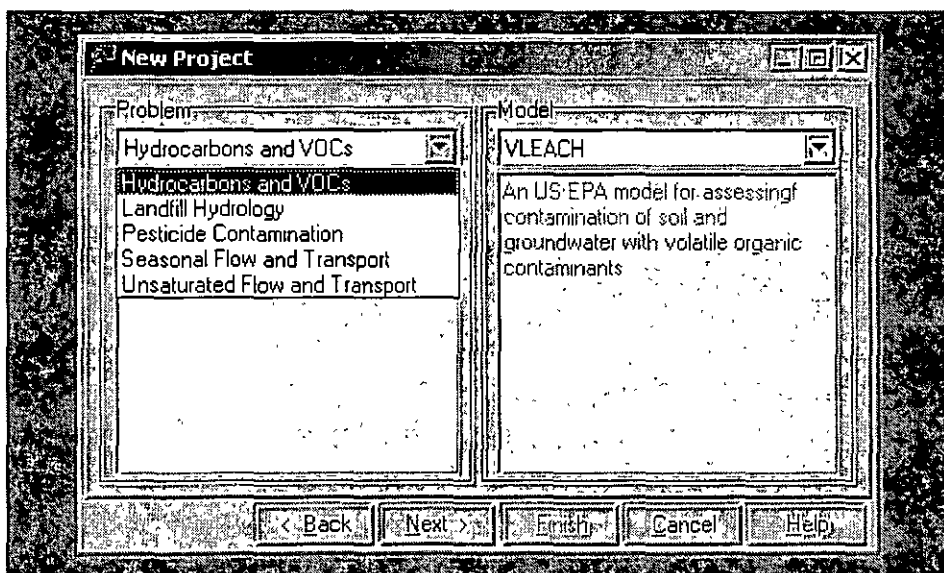
Inicializar el modelo utilizando la opción de crear un proyecto nuevo.
Se llena la pantalla siguiente con el nombre del proyecto y la descripción del mismo.



The image shows a 'New Project' dialog box with the following fields and controls:

- Name:** New project
- Description:** Description
- Buttons:** < Back, Next >, Finish, Cancel, Help

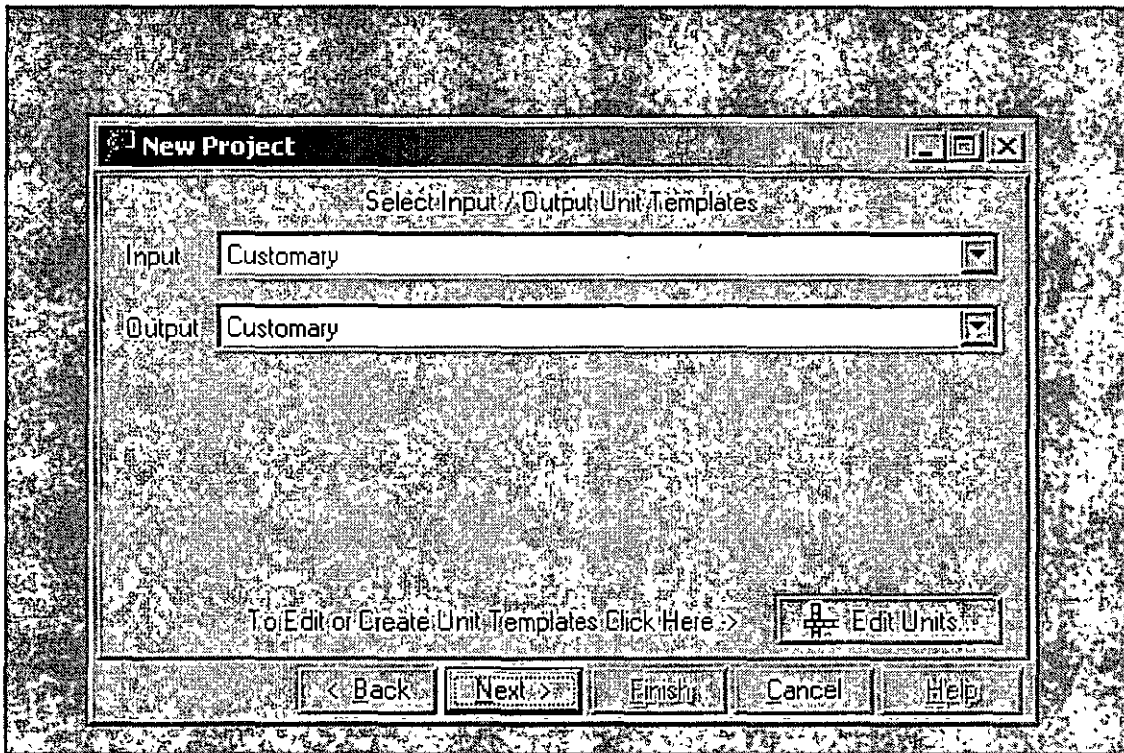
Se selecciona el modelo a ser utilizado. El paquete Unsat Suit incluye los modelos HELP para el diseño de rellenos sanitarios en relación con la contaminación de acuíferos, el modelo PESTAN para la contaminación de suelos y agua subterránea por pesticidas, el modelo SESOIL para el transporte de contaminantes de un flujo estacional en la zona no saturada y el modelo VLEACH para la simulación del movimiento de contaminantes en la zona no saturada.



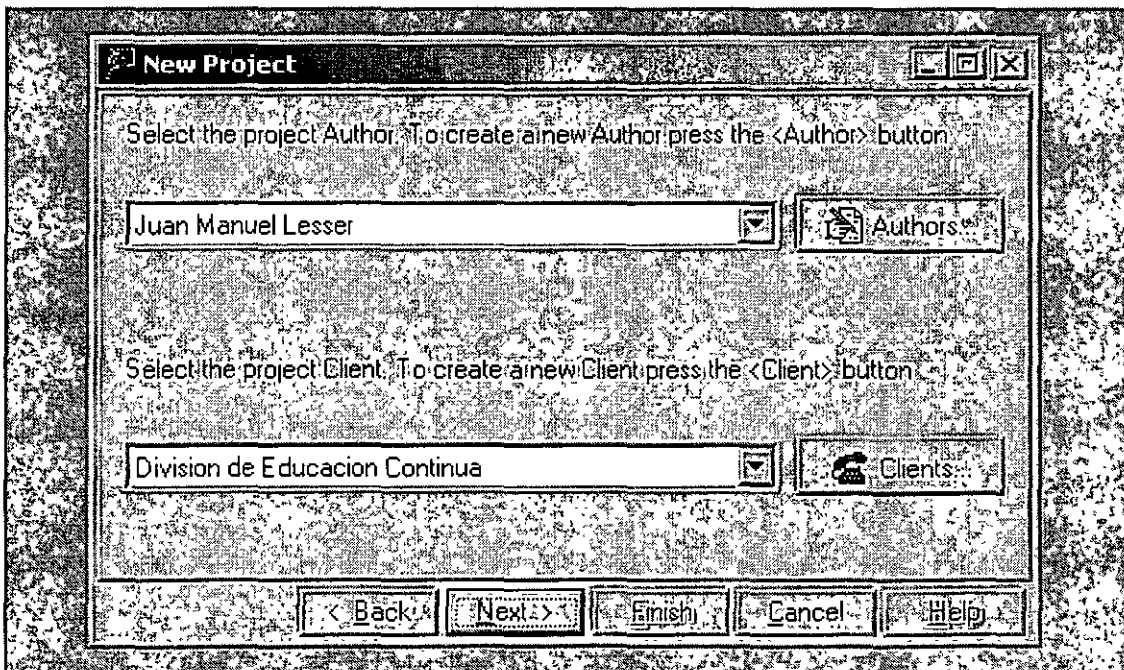
The image shows the 'New Project' dialog box with the following selections and information:

- Problem:** Hydrocarbons and VOCs (selected)
- Model:** VLEACH (selected)
- Description of VLEACH:** An US-EPA model for assessingf contamination of soil and groundwater with volatile organic contaminants
- Buttons:** < Back, Next >, Finish, Cancel, Help

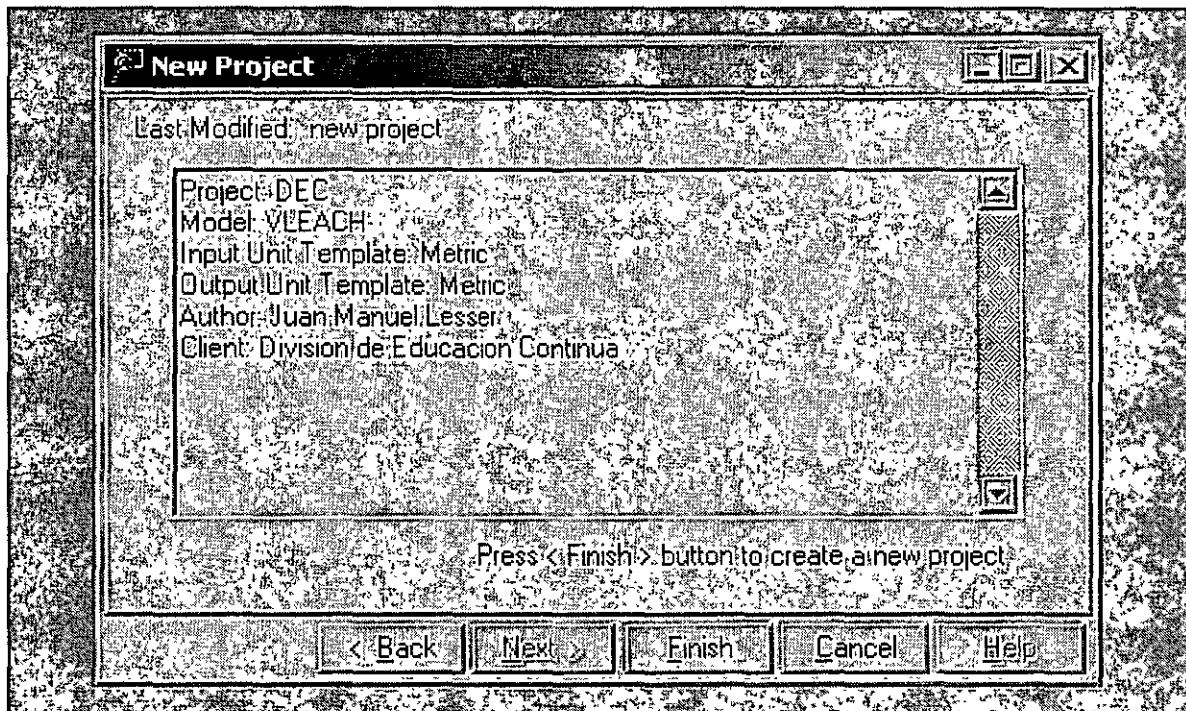
En la pantalla siguiente se selecciona el tipo de unidades por utilizar.



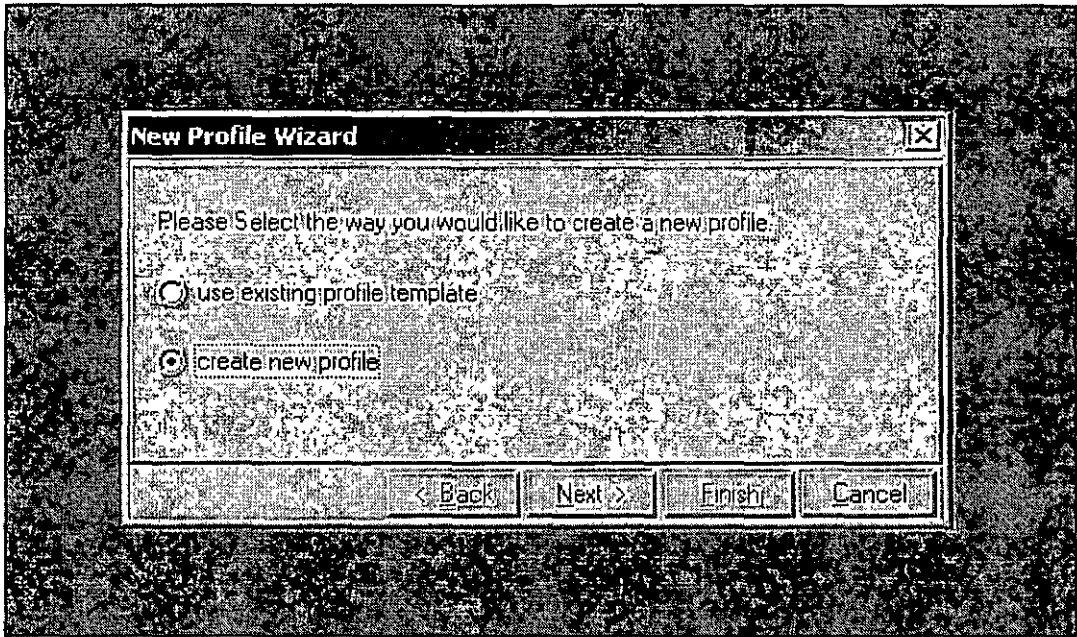
Proporcionar los datos del autor y del cliente.



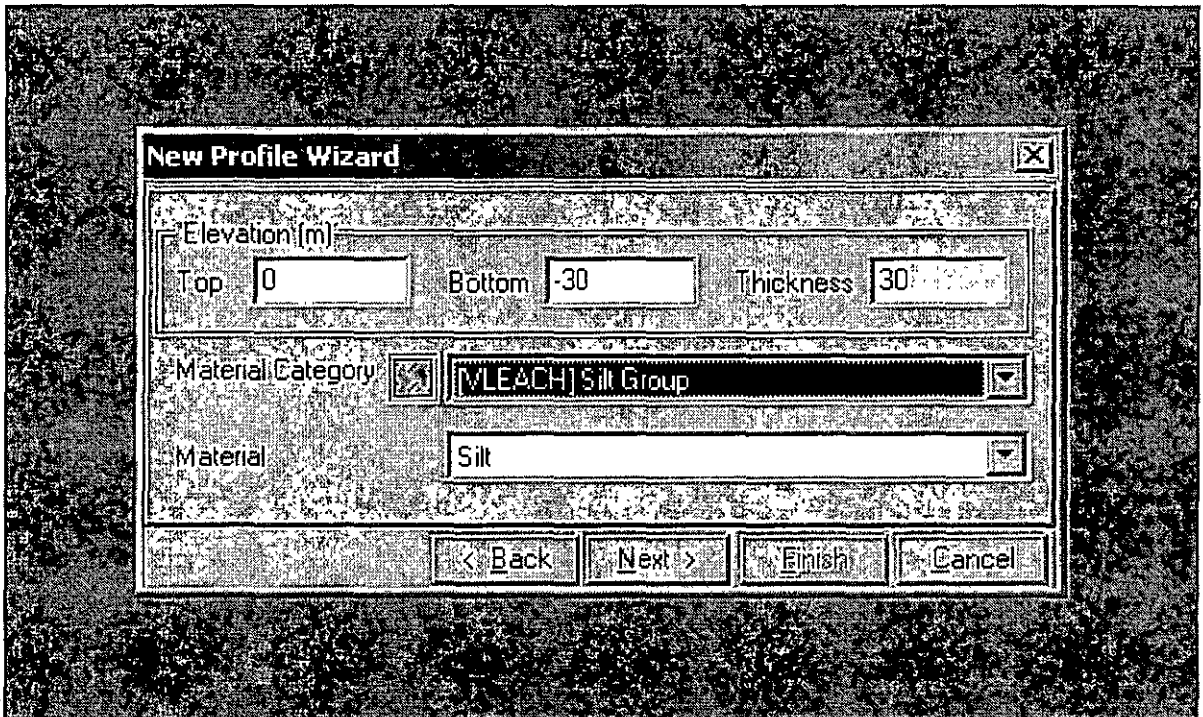
En esta pantalla se resumen los datos de identificación del modelo.



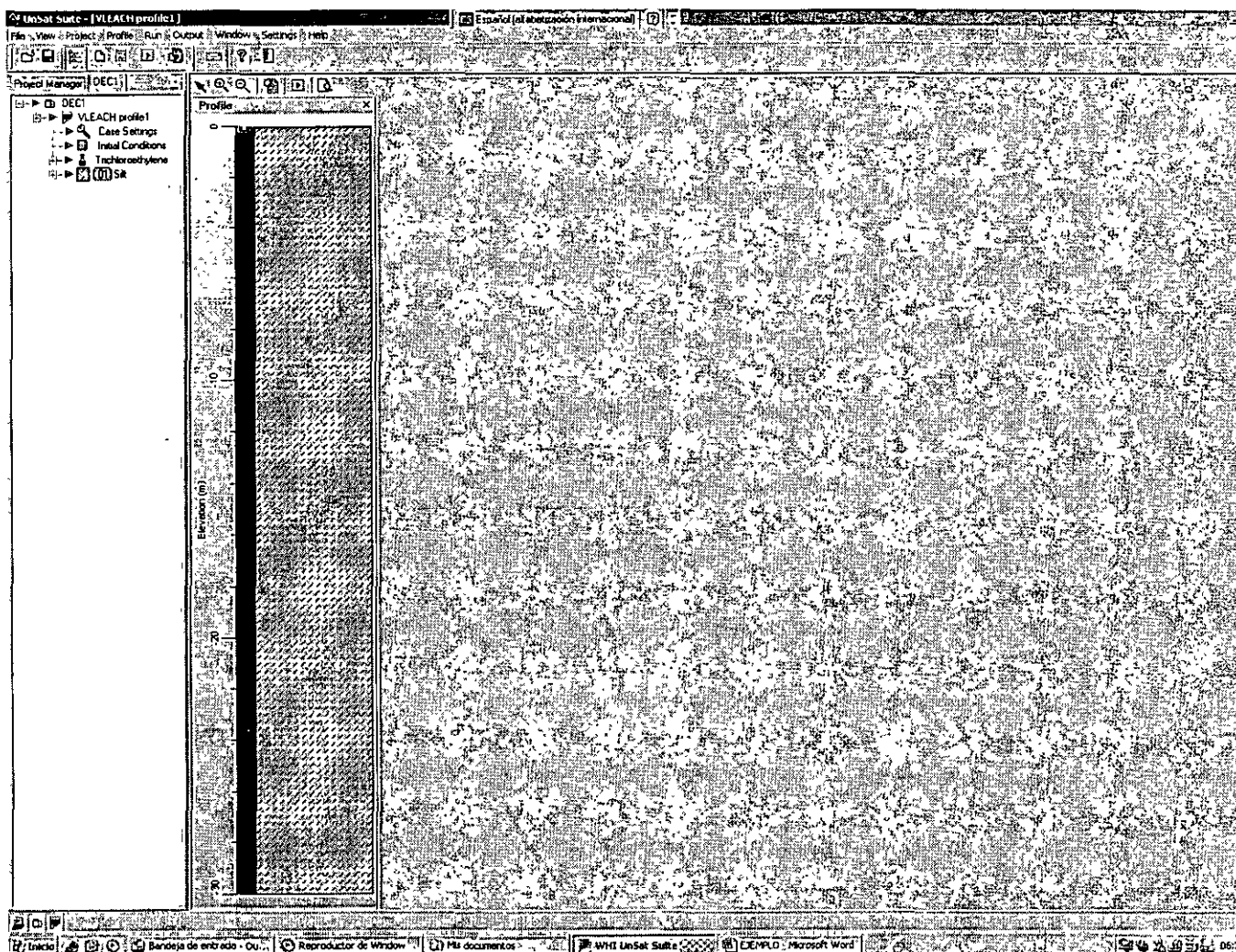
Seleccionar si se desea crear un proyecto nuevo o utilizar los datos de otro ya creado.



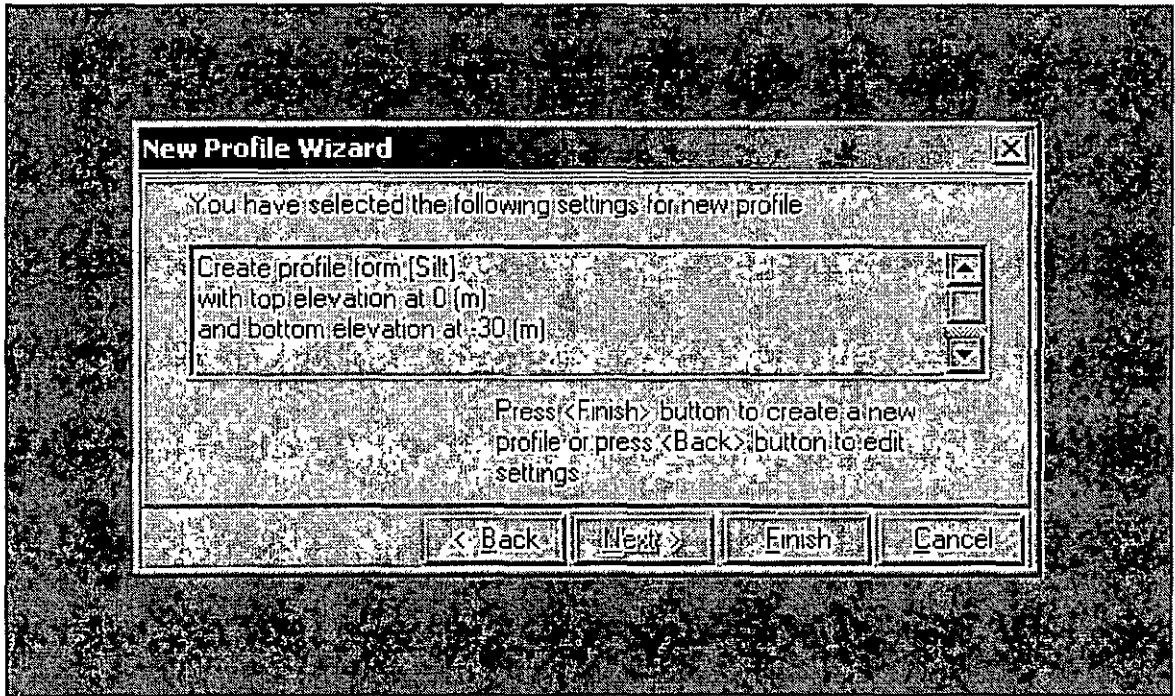
Características del sitio. Elevación del terreno 0 metros, elevación de la base del subsuelo estudiado, 30 metros. Seleccionar un suelo limoso (silt).



Pantalla mostrando el perfil con las características del sitio, 30 metros de limos. A la izquierda se muestra el menú de opciones para alimentar los datos de la contaminación.



Resumen de las características del sitio.



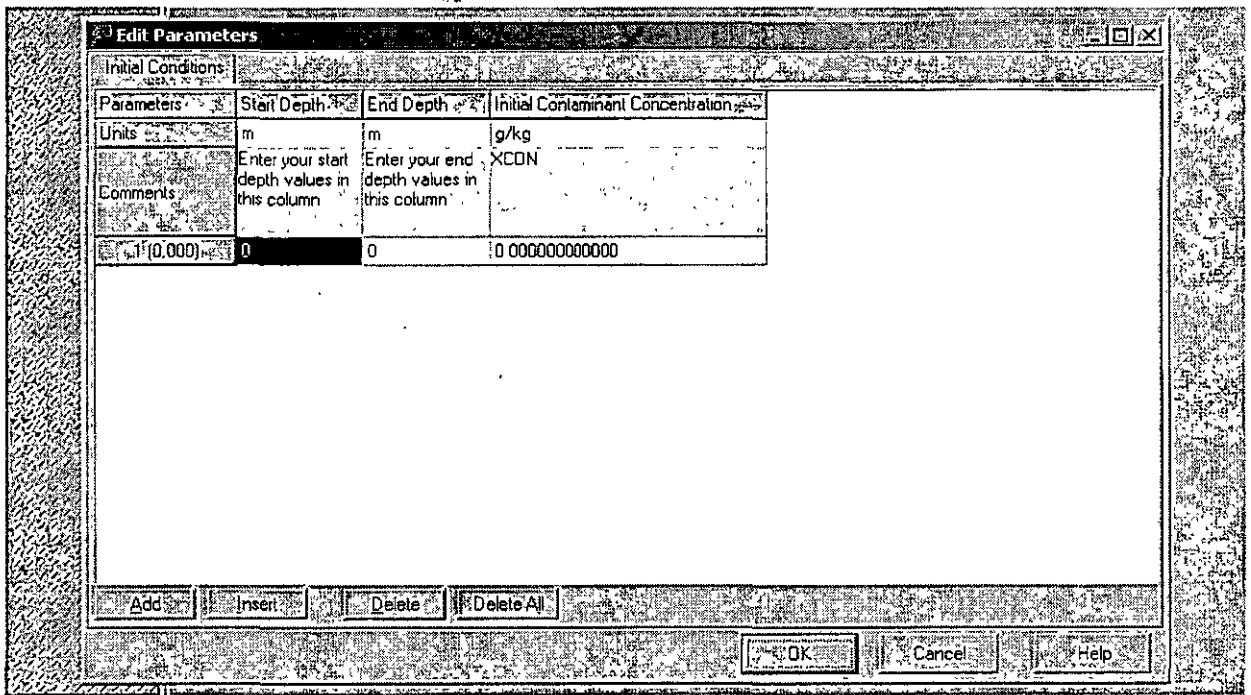
Seleccionar la opción para editar parámetros (Case settings)

Edit Parameters			
Case Settings			
Parameter	Value	Units	Comment
Simulation Timestep	365.25637	days	The simulation timestep in years
Simulation Length	3652.56366	days	The total time length of simulation in years
Cell Number	10	-	The number of cells within the profile.
Recharge Rate	0.00834482	cm/day	The rate at which water enters and flows through the vadose zone.
Concentration in Recharge Water	0.000000000000	mg/l	The contaminant concentration in the recharge water.
Upper Boundary for Vapor	0.000000000000	mg/l	Concentration in the atmosphere above the soil surface
Lower Boundary for Vapor	0.000000000000	mg/l	Set negative if the lower boundary considered impermeable
Output Timestep	365.256	days	The timestep at which simulation results are to be presented

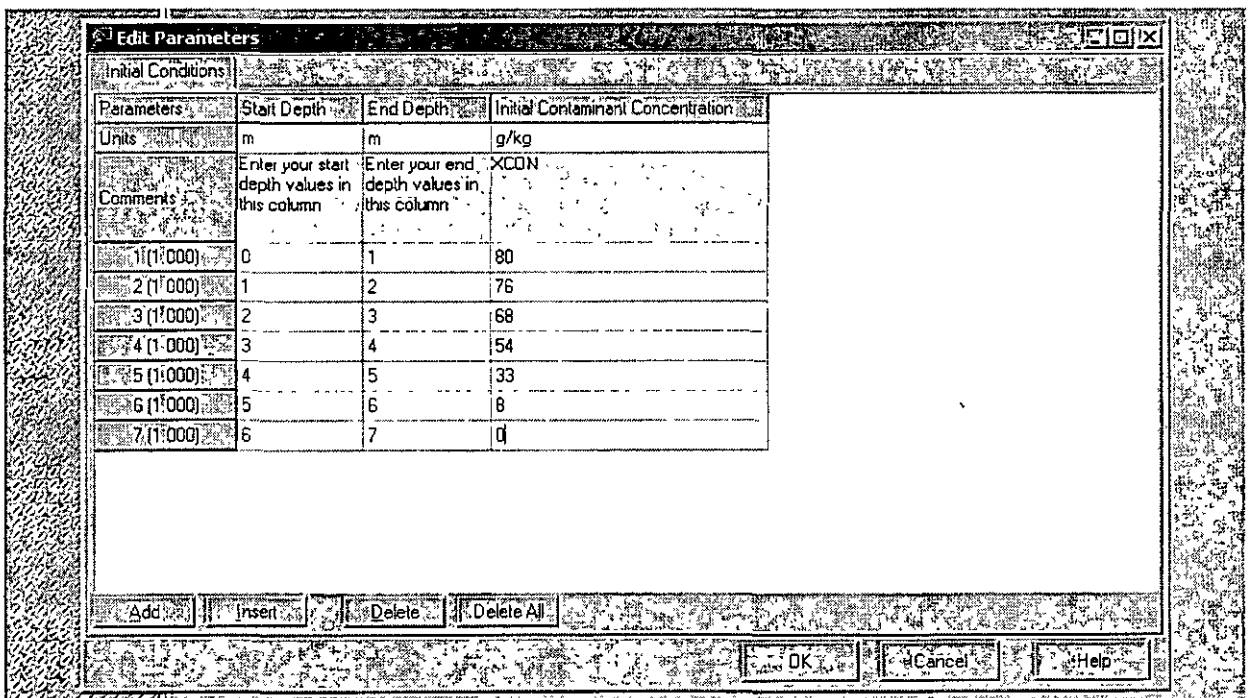
Deseamos que el modelo calcule la posición de los contaminantes cada mes (30 días), durante aproximadamente 4 años (1200 días). Dividir el subsuelo en 30 celdas de a 1 metro cada una. La permeabilidad del medio se midió en el laboratorio y arrojó un valor de 2.12 cm/día. La concentración del contaminante en el agua de recarga es de 80 mg/l. Las salidas del modelo programarlas cada 30 días (aproximadamente cada mes).

Edit Parameters			
Case Settings			
Parameter	Value	Units	Comment
Simulation Timestep	30	days	The simulation timestep in years
Simulation Length	1200	days	The total time length of simulation in years.
Cell Number	30	-	The number of cells within the profile.
Recharge Rate	2.12	cm/day	The rate at which water enters and flows through the vadose zone.
Concentration in Recharge Water	80	mg/l	The contaminant concentration in the recharge water.
Upper Boundary for Vapor	0.000000000000	mg/l	Concentration in the atmosphere above the soil surface.
Lower Boundary for Vapor	0.000000000000	mg/l	Set negative if the lower boundary considered impermeable
Output Timestep	30	days	The timestep at which simulation results are to be presented

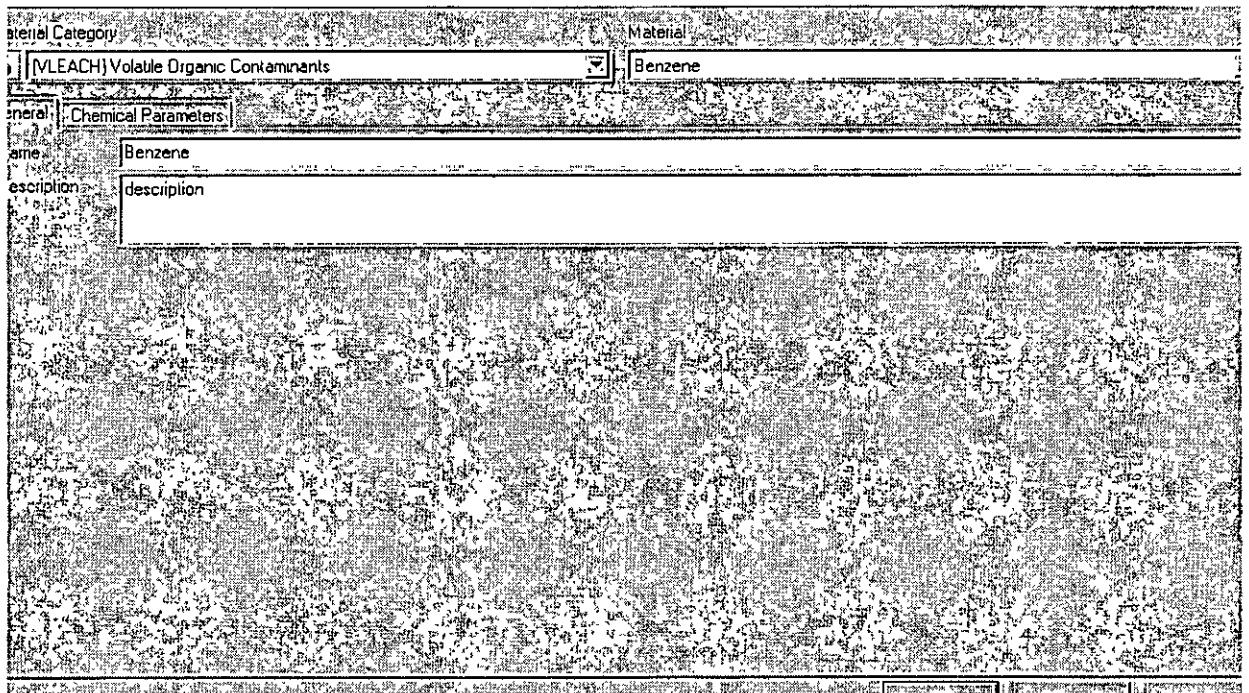
Utilizando el menú de la parte superior izquierda, marcar la concentración inicial de contaminante en las diferentes profundidades, a partir de las cuales el modelo calculará la difusión respecto al tiempo.



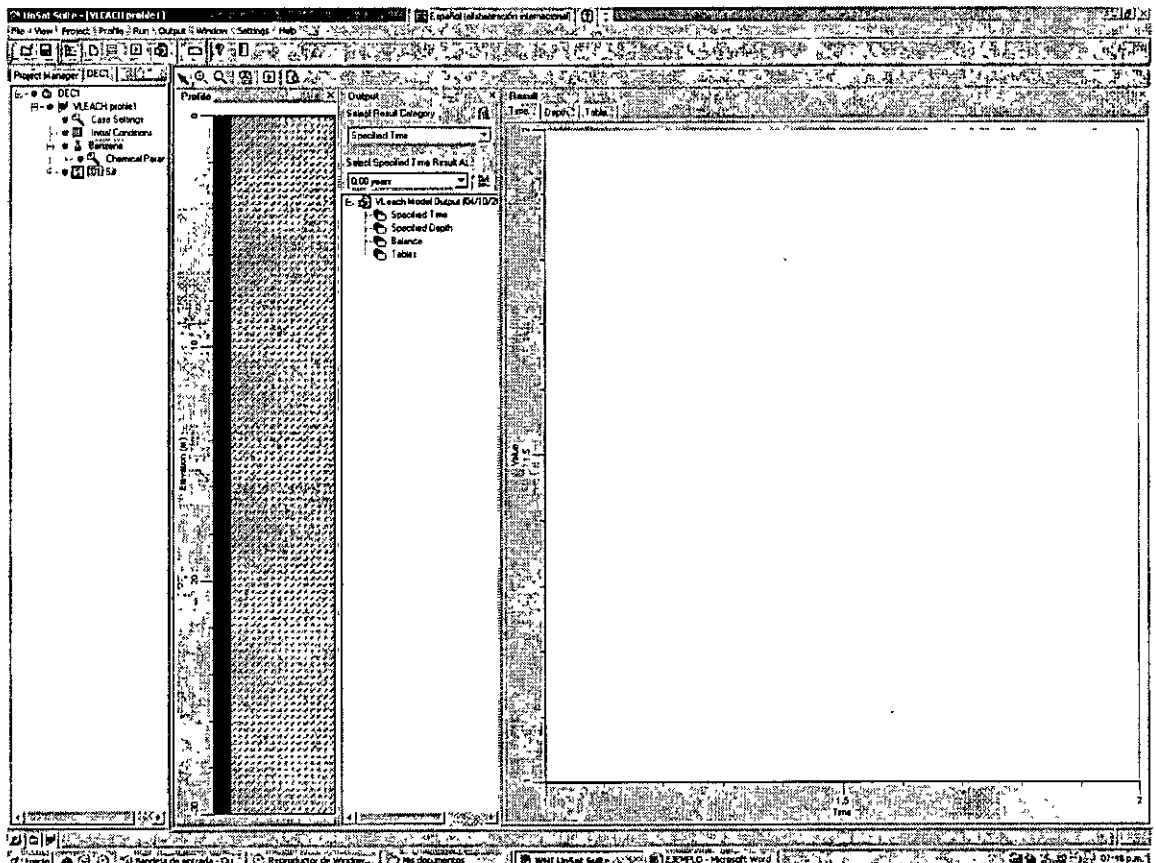
Con los botones de la parte inferior de la pantalla, se aumentan, eliminan o insertan renglones de datos.



En el menú de la porción superior izquierda se selecciona el tipo de producto contaminante. El modelo incluye 9 compuestos, entre ellos al benceno, tolueno, etilbenceno y m-xileno. Seleccionar para el ejemplo al benceno.



El siguiente paso es correr el modelo, lo cual se lleva a cabo utilizando el botón enmarcado con color azul. Se obtiene la pantalla siguiente.

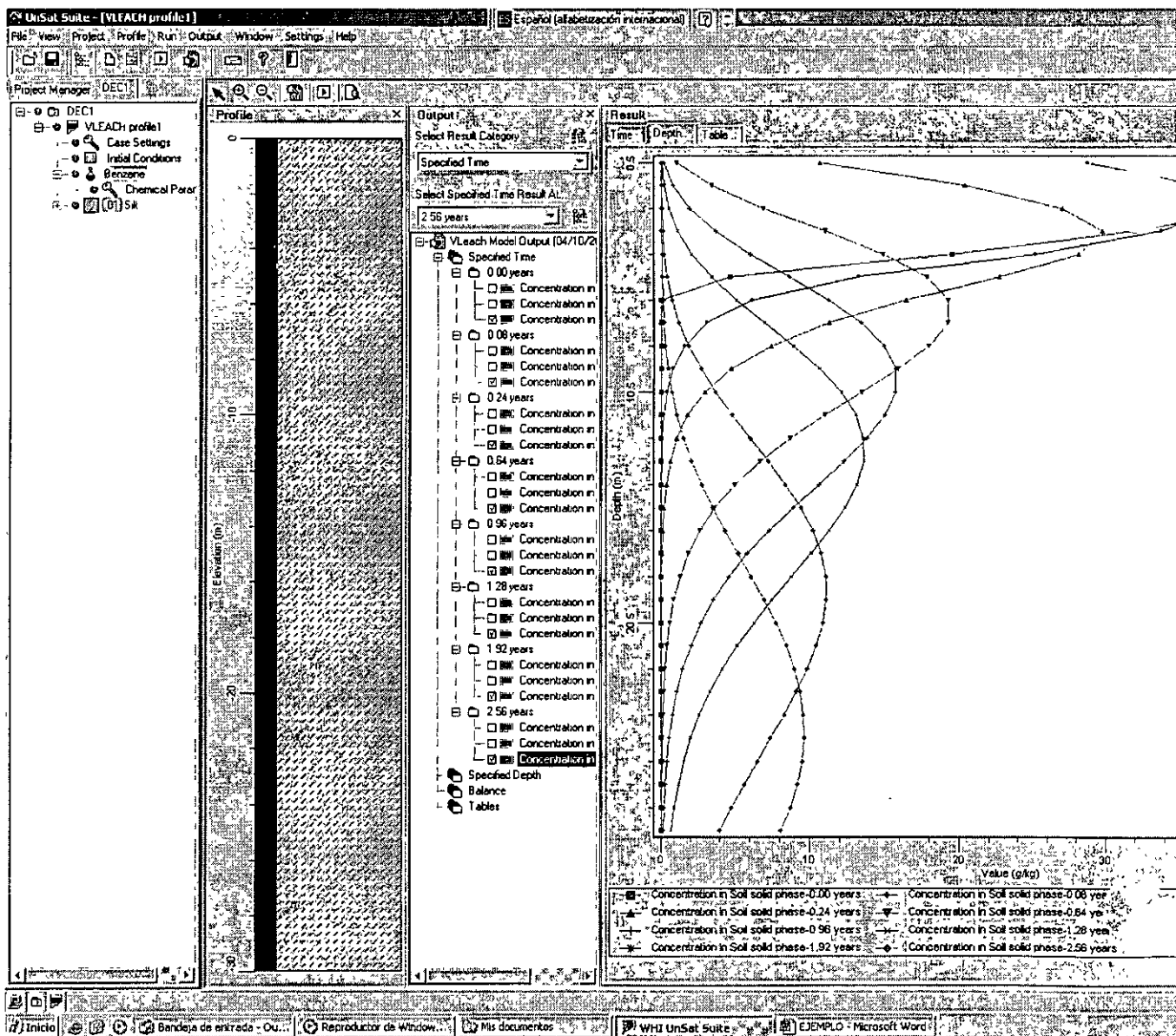


ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPCION TIEMPO

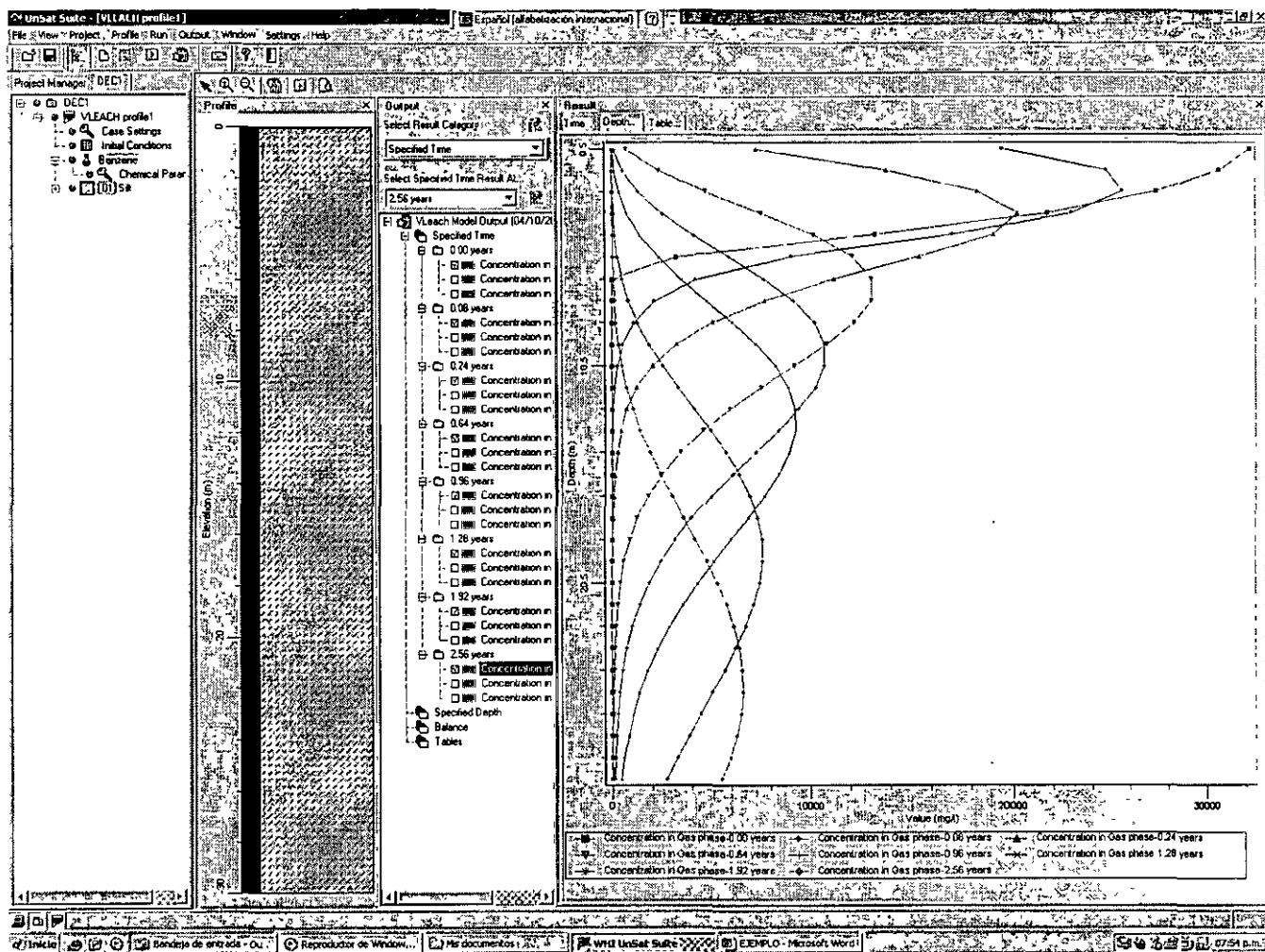
A partir de este momento se pueden obtener resultados del comportamiento del contaminante respecto al tiempo y a la profundidad. En el menú central, a la derecha del corte litológico, se encuentran las opciones de tiempo, profundidad, balance y tablas. Buscarlas y practicarlas.

Ejercitar seleccionando **primeramente la opción de tiempo**, de uno a uno, los periodos de tiempo que calculó el modelo de acuerdo a los datos con que fue alimentado. Analizar los resultados, observar como se va moviendo la contaminación respecto al tiempo y a la profundidad.

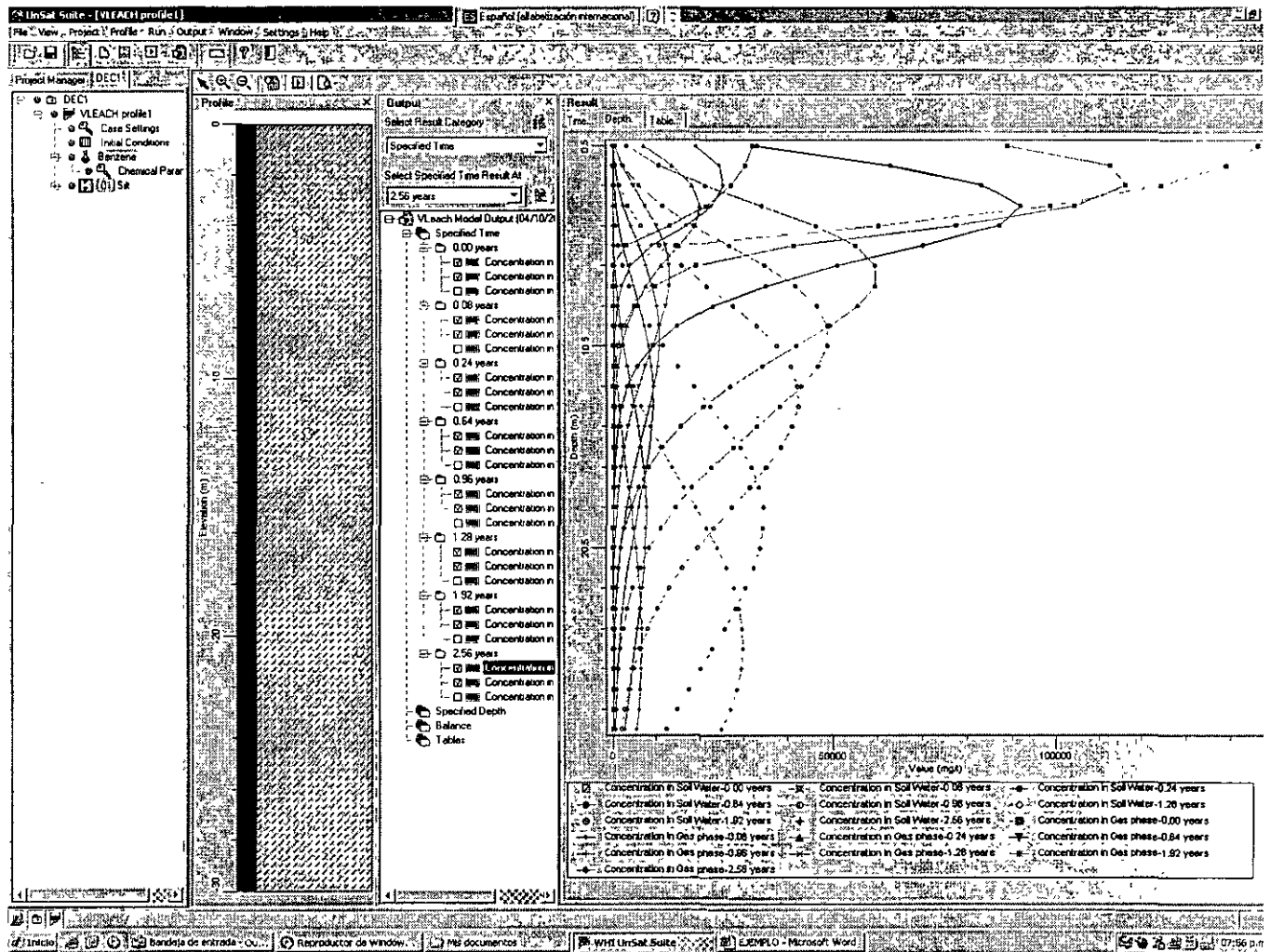
Para las gráficas se deberá seleccionar la opción deseada, ya sea contaminante adsorbido por el suelo, en agua o en fase volátil. Desplegar los resultados hasta obtener una pantalla semejante a la mostrada adelante (concentración en suelo) y analizar los resultados.



Volver a correr el modelo con el botón enmarcado en color azul y repetir el procedimiento para analizar el comportamiento del contaminante respecto al tiempo para la fase gaseosa. Reintentar hasta obtener los resultados de la pantalla siguiente. Analizar el significado de los resultados.

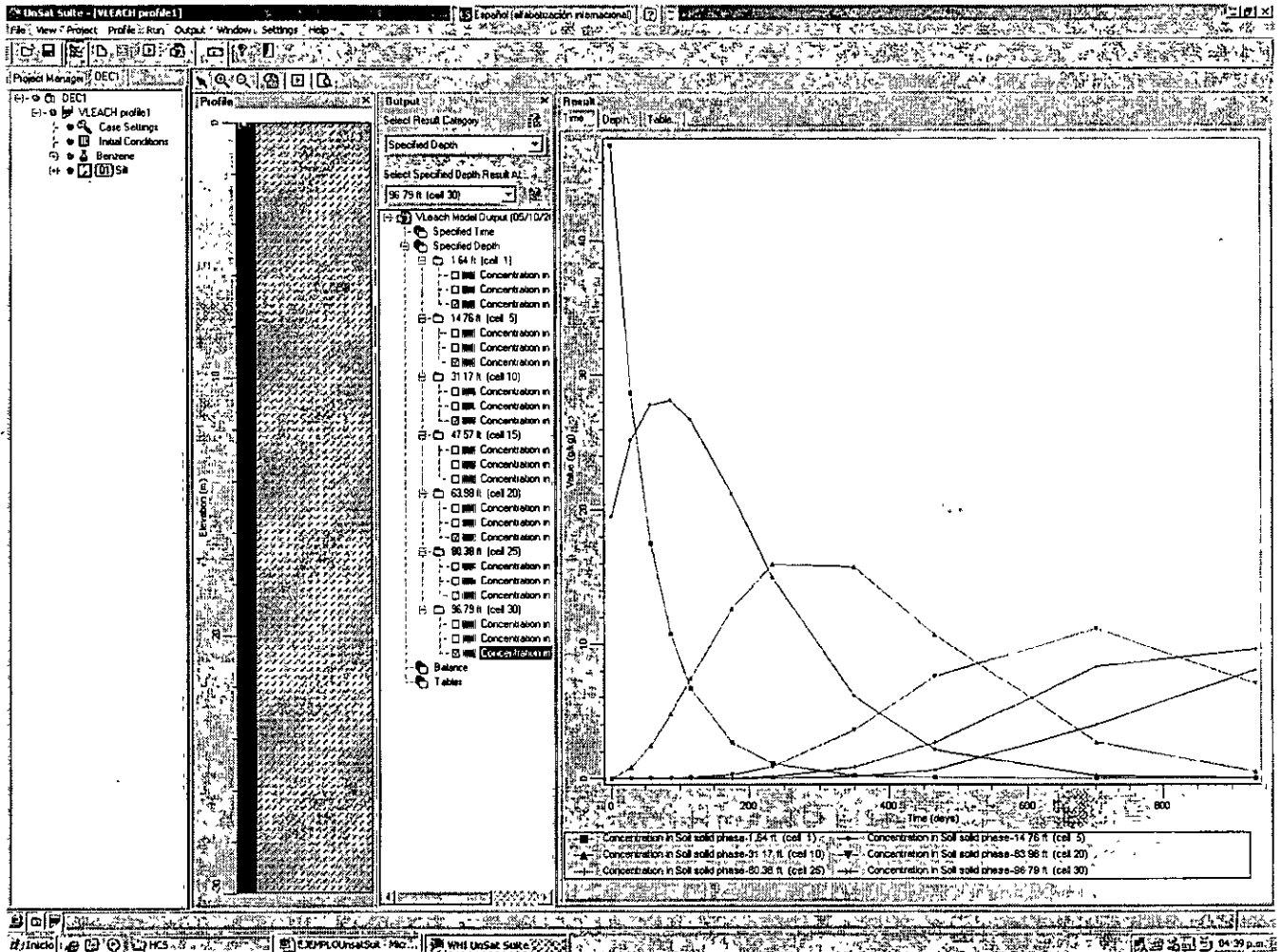


Correr nuevamente el modelo con el botón enmarcado en azul, obtener y analizar la pantalla siguiente:

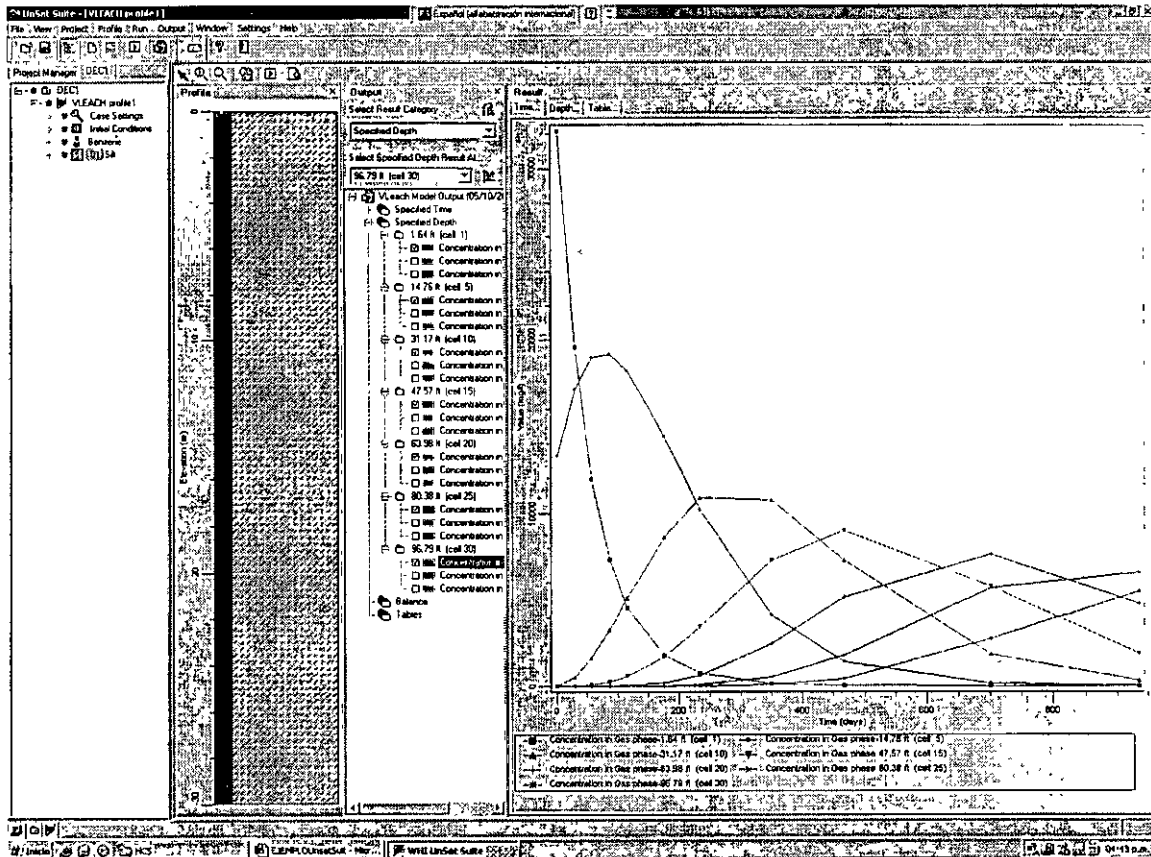


ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPCION PROFUNDIDAD

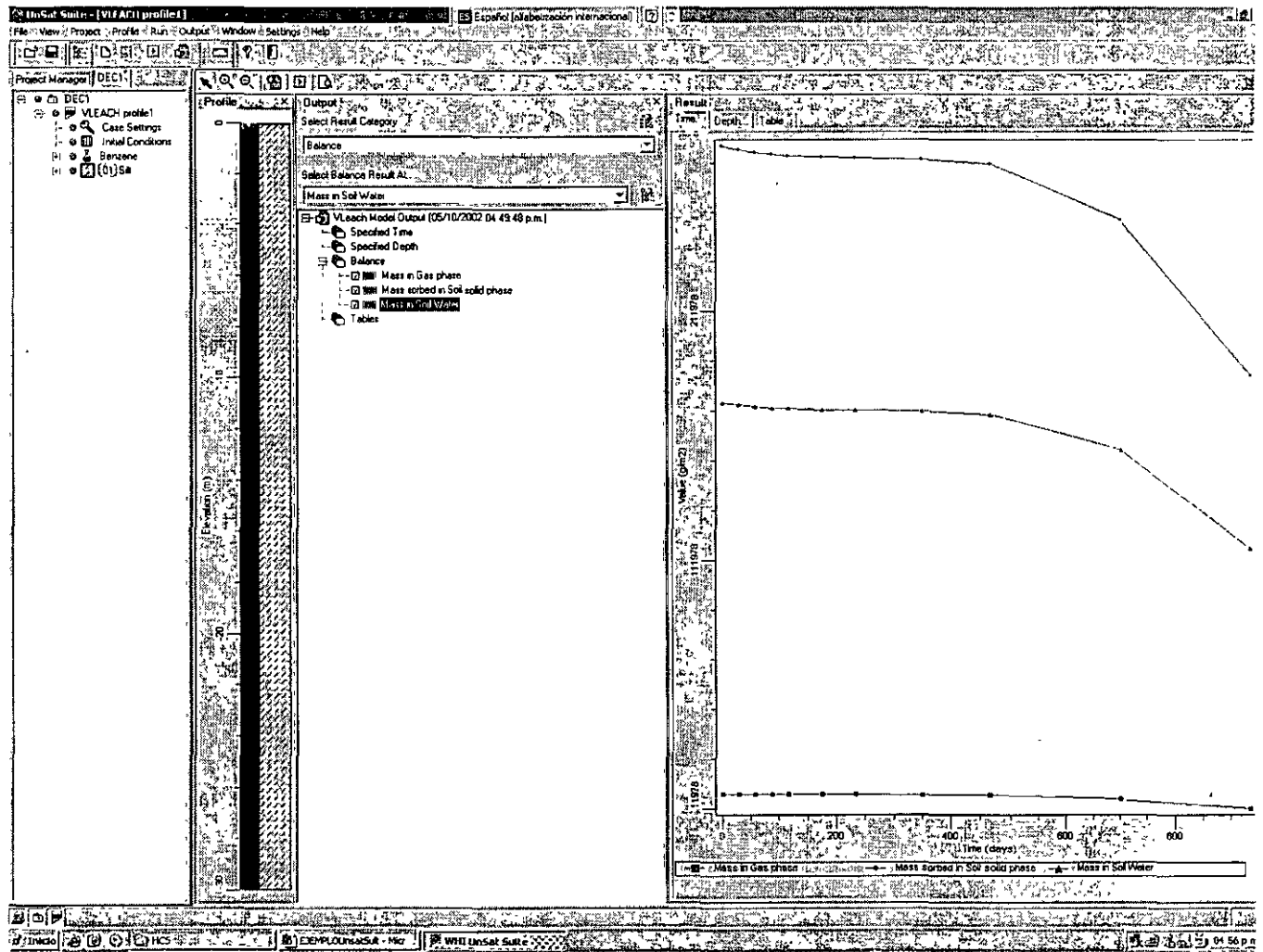
Se repiten pasos semejantes al inciso anterior seleccionando la opción profundidad (depth). Obtener y analizar la concentración a 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 metros de profundidad.



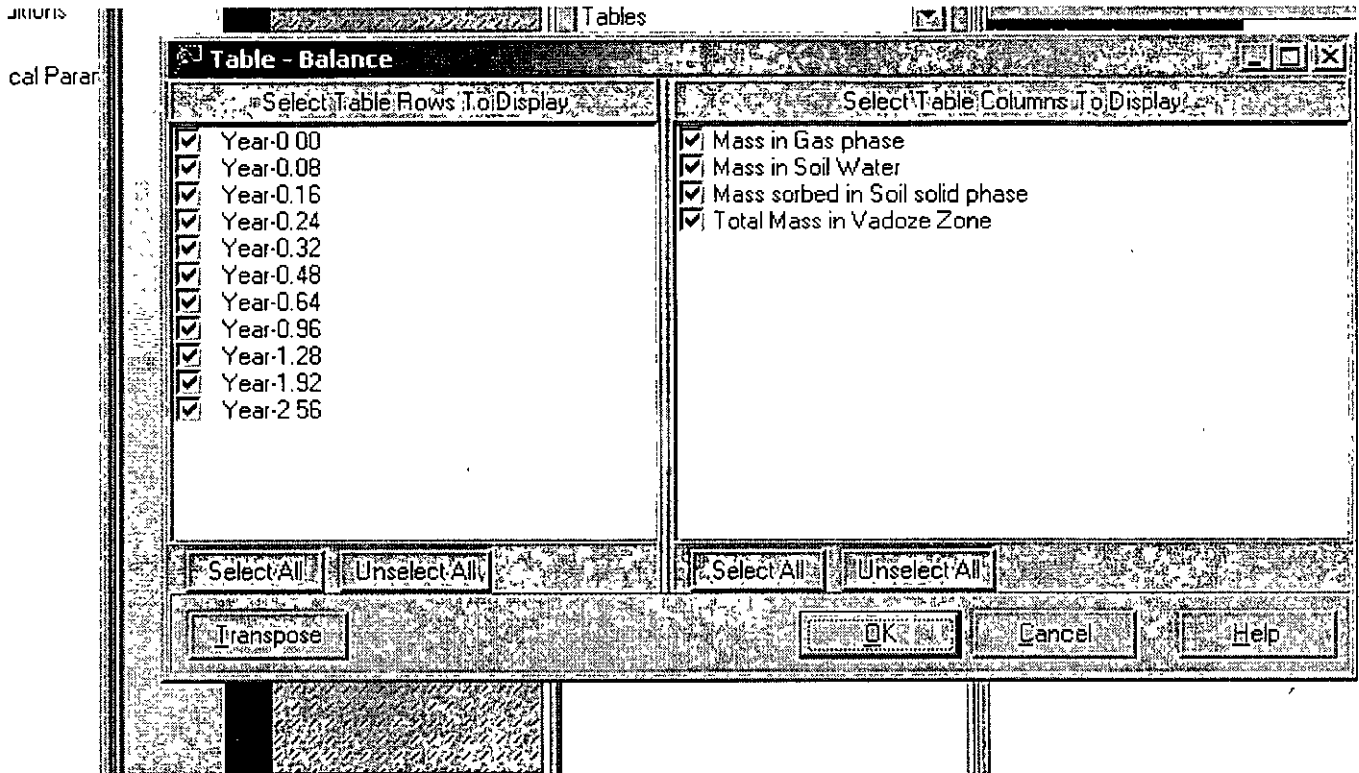
En la misma pantalla, desactivar la opción suelo en todas las profundidades y activar la opción volátiles para tener una pantalla como la siguiente:



Correr el modelo y desplegar el balance de masas. Como se comporta la contaminación respecto al tiempo?
Comparar la concentración adsorbida por el suelo, con la presente en el agua del suelo y la volátil, cual es mayor y cual es menor?



Seleccionar Tablas para obtener valores del balance.



Seleccionar todos los tiempos. Analizar los resultados.

Time	Depth	Balance (g/m ²)			
		Mass in Gas phase (g/m ²)	Mass in Soil Water (g/m ²)	Mass sorbed in Soil solid phase (g/m ²)	Total Mass in Vadoze Zone (g/m ²)
Year-0.00 (g/m ²)		1.7985E+04	1.7518E+05	2.7897E+05	4.7213E+05
Year-0.08 (g/m ²)		1.7884E+04	1.7419E+05	2.7741E+05	4.6949E+05
Year-0.16 (g/m ²)		1.7814E+04	1.7351E+05	2.7632E+05	4.6765E+05
Year-0.24 (g/m ²)		1.7766E+04	1.7304E+05	2.7557E+05	4.6638E+05
Year-0.32 (g/m ²)		1.7732E+04	1.7272E+05	2.7505E+05	4.6550E+05
Year-0.48 (g/m ²)		1.7693E+04	1.7233E+05	2.7443E+05	4.6445E+05
Year-0.64 (g/m ²)		1.7673E+04	1.7214E+05	2.7412E+05	4.6394E+05
Year-0.96 (g/m ²)		1.7640E+04	1.7181E+05	2.7361E+05	4.6306E+05
Year-1.28 (g/m ²)		1.7506E+04	1.7052E+05	2.7155E+05	4.5958E+05
Year-1.92 (g/m ²)		1.6044E+04	1.5627E+05	2.4885E+05	4.2116E+05
Year-2.56 (g/m ²)		1.1978E+04	1.1667E+05	1.8580E+05	3.1445E+05

Regresar al menú principal y modificar los parámetros de entrada (case settings).

Aumentar la permeabilidad a 5.0 cm/día; que pasa al aumentar la permeabilidad?

Posteriormente ir al menú principal y modificar las condiciones iniciales, aumentando la concentración inicial a 160 g/kg.

Nuevamente regresar al menú principal y modificar los parámetros del suelo, primero a una arena y después a una arcilla. Como se comporta el contaminante en arenas? Como se comporta el contaminante en arcillas?

Este análisis permitirá calibrar el modelo para reproducir las condiciones reales del sitio estudiado.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO DE AGUA
A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS
APLICACIÓN DEL SOFTWARE VISUAL
MODFLOW

EXPOSITOR: MC RAYMUNDO ESTRELLA CHAVERO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

MODELACIÓN DE FLUJO A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS

1. Acuíferos

El subsuelo está compuesto de materiales porosos. Un dominio ocupado por rocas fracturadas también es un medio poroso. Pueden tener muchas configuraciones geométricas. Básicamente son dominios tridimensionales, y pueden ser tratados como tal.

Un acuífero es una formación geológica que:

- contienen agua, saturación total (la totalidad de los espacios vacíos interconectados están llenos de agua), y
- permite que el agua se mueva a través de él bajo condiciones normales de campo.

Así, cuando una formación geológica puede ser referida como un acuífero, o no, depende de su capacidad para almacenar y transportar agua respecto de otras formaciones en la vecindad.

Un acuicludo. Es una formación que puede contener agua (en ocasiones en cantidades apreciables, como una formación de arcilla), pero es incapaz de transmitirla en cantidades apreciables. Para propósitos prácticos, un acuicludo puede ser considerado como una capa impermeable.

Un acuíardo es una formación geológica horizontal que:

- es mucho menos permeable que, y
- es mucho más delgada que el acuífero que está debajo y del acuífero encima de ella.

Un acuíardo actúa como una membrana horizontal semi-impermeable entre dos acuíferos. El goteo puede ocurrir a través de esta capa entre los acuíferos separados por ella.

1.1 Clasificación de acuíferos

Acuífero confinado. Es un acuífero que está limitado por arriba y por abajo por una formación impermeable. El nivel del agua en un pozo (o un piezómetro) en tal acuífero tiene mayor altura que la superficie confinante superior, figura 1.1 [1].

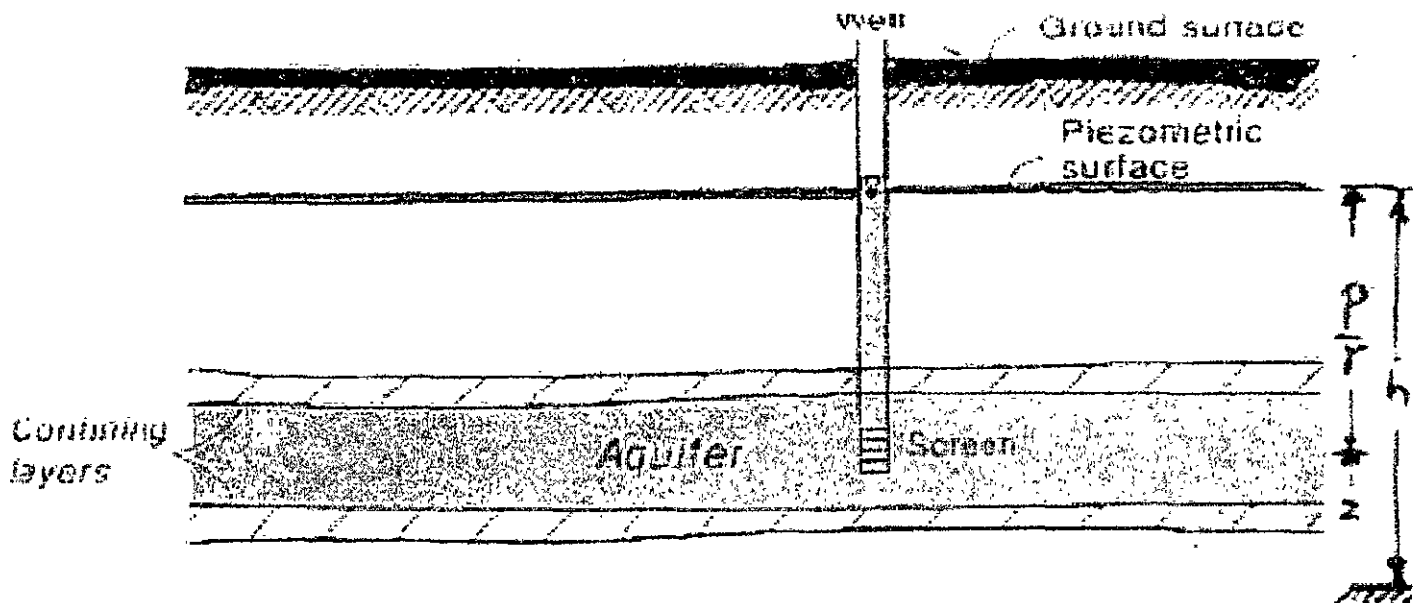


Figura 1.1 Acuífero confinado.

Acuífero artesiano. Una porción de un acuífero confinado en el que la superficie piezométrica no está únicamente por encima del techo del acuífero, sino también por encima de la superficie del suelo, figura 1.2 [1].

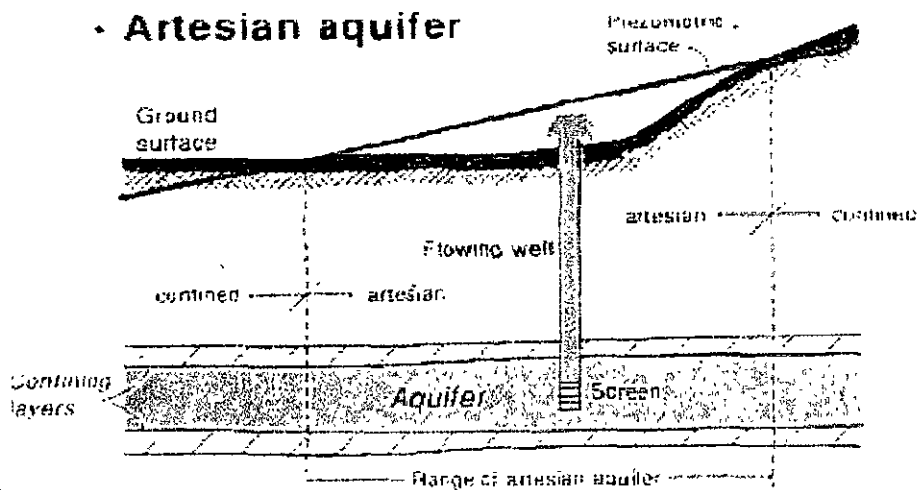


Figura 1.2. Acuífero Artesiano

Acuífero freático. Un acuífero que tienen como frontera superior una superficie freática es llamado un acuífero freático o acuífero libre, figura 1.3 [1].

Acuífero en posición elevada. Un caso especial de un acuífero freático es el acuífero elevado. Es un acuífero freático de área limitada, formado en una capa semi-impermeable o impermeable que se encuentra entre la superficie del agua de un acuífero freático persistente y la superficie del suelo, figura 1.3 [1].

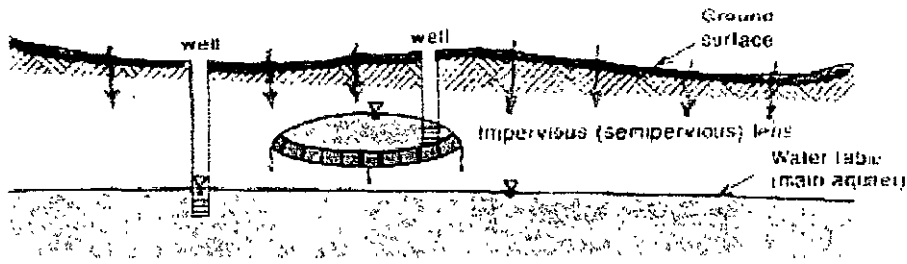


Figura 1.3. Acuífero Freático.

Acuífero filtrante. Un acuífero freático filtrante es un acuífero freático que está limitado en la parte inferior por una capa semi-permeable, usualmente se le conoce como acuítardo. Es una capa que es mucho menos permeable que el acuífero superior y a menudo es mucho más delgada. Además se comporta como una membrana semi-permeable a través de la cual la filtración sale o entra al acuífero freático de una región saturada, figura 1.4 [1].

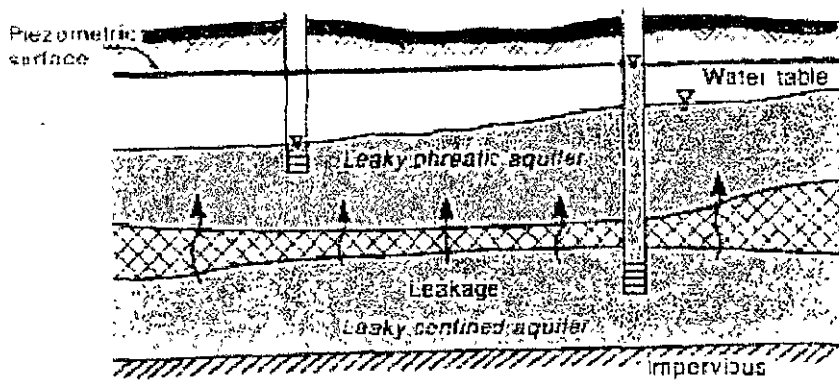


Figura 1.4. Acuífero Filtrante.

1.2 Superficie Freática.

La superficie freática es una superficie imaginaria que sirve como una frontera superior de la zona saturada. Se define como la presión del agua que en cada punto de la superficie es la atmosférica.

La elevación de la superficie freática en un punto (x, y) , en el plano horizontal puede ser determinada por la elevación del agua en un pozo localizado en ese punto.

Dentro de la zona saturada, la saturación de agua es 1.0 (o 100%), significa que el 100% de los espacios vacíos están llenos con agua. Dentro de la zona insaturada, la saturación de agua decrece gradualmente con la altura sobre la superficie freática

Considere un punto en un fluido continuo. La elevación del punto es z arriba del mismo datum seleccionado. Permitamos que p denota la presión en el fluido en el punto considerado. La carga piezométrica, h , en el punto considerado se define como:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad de la masa del fluido (masa por unidad de volumen) y g es la aceleración de la gravedad.

La carga piezométrica, h , expresa la energía por unidad de peso del fluido, debido a:

- la elevación, z , del punto arriba del nivel del datum, y
- la carga de presión del fluido, $p/\rho g$.

Cada uno de estos dos términos expresa una cantidad de energía por unidad de peso del fluido.

1.2.1 Cómo medir la carga piezométrica en un punto.

El dispositivo es un piezómetro. En un acuífero, con frecuencia nos referimos a él como un pozo de observación o un pozo de monitoreo. Lo podemos describir brevemente como un tubo vertical insertado en la perforación y en el punto donde se requiere medir la carga hidráulica. La parte inferior del tubo es ranurada o perforada, para permitir una buena conexión hidráulica entre el agua en el pozo y el agua en la formación. En ocasiones, un ranurado especialmente fabricado se usa para este propósito. La porción ranurada del tubo es rodeada por grava, que es diseñada para prevenir que las partículas finas del suelo obstruyan las aberturas del ranurado. La elevación de la superficie del agua dentro del pozo da la carga piezométrica en la localización del (centroide del) ranurado. Este centroide es la elevación z del punto en el cual la carga piezométrica es medida. La presión en el agua en el punto causa que el agua en el tubo suba una distancia $p/\rho g$. Esta distancia indica la carga de presión en el punto, figura 1.5 [1].

1.2.2 Carga piezométrica.

En un medio poroso con dominio tridimensional, la carga piezométrica, h , varía de punto a punto en el espacio y en el tiempo, $h=h(x, y, z, t)$.

Cuando consideramos flujo en un medio poroso con dominio bidimensional, la carga piezométrica, h , puede variar en el plano $x-y$ y el tiempo. Simbólicamente escribimos $h=h(x, y, t)$. O para un tiempo especificado, $h=h(x, y)$. La superficie en cada punto (x, y) , en un dominio bidimensional, indica la carga piezométrica, $h=h(x, y)$, es llamada la superficie piezométrica. Es una superficie imaginaria que pasa por la superficie del agua en todos los piezómetros que están ranurados en el mismo acuífero.

Recordemos que la carga piezométrica es siempre medida con respecto a un nivel de datum especificado.

Técnicamente, dado un acuífero, en el que asumimos que el flujo es esencialmente horizontal, medimos y registramos la carga piezométrica en un número de pozos de observación que están

ranurados (únicamente) en ese mismo acuífero. Entonces usamos interpolación lineal entre las cargas piezométricas observadas para dibujar un mapa de contornos de la superficie piezométrica de ese acuífero

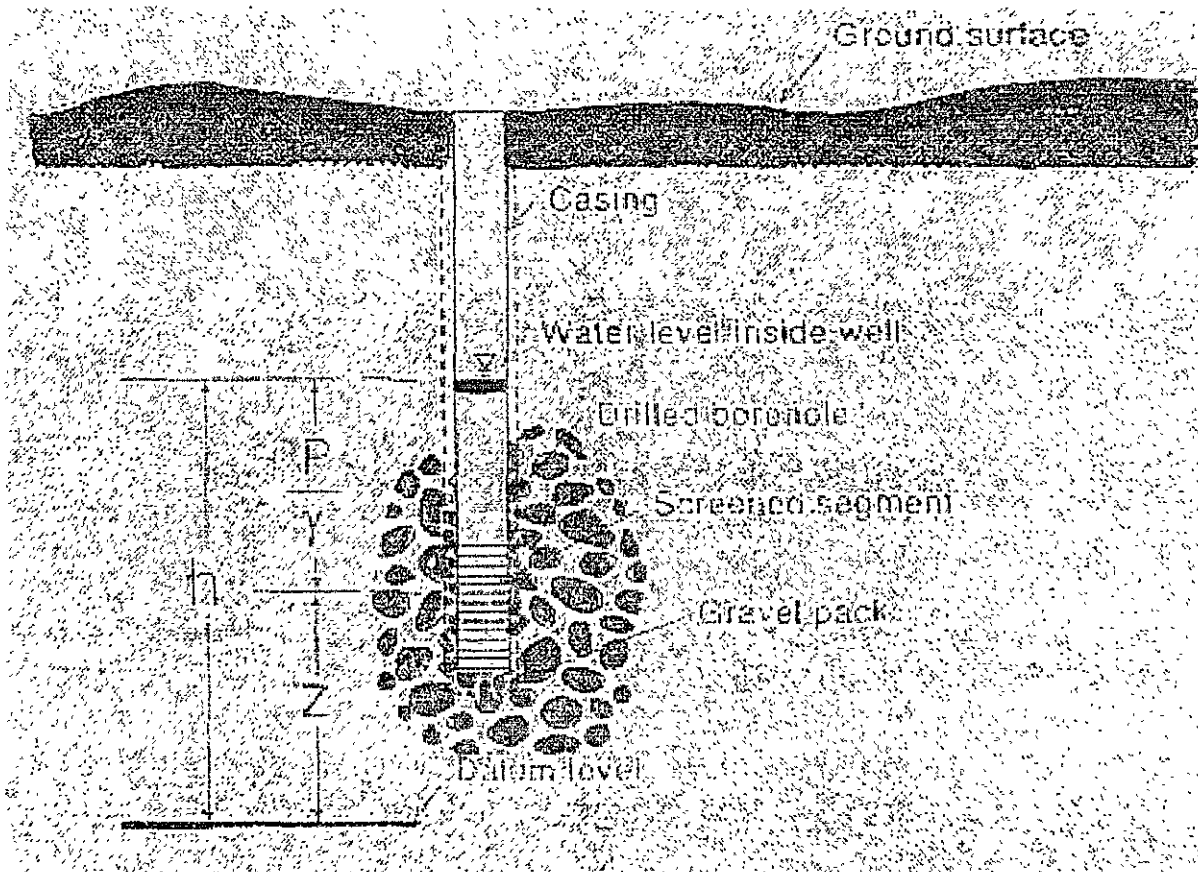


Figura 2.1 Piezómetro.

1.2.3 Ley de Darcy.

Se le puede referir como una ecuación de flujo para un fluido que ocupa completamente el espacio vacío de un medio poroso.

Darcy investigó el flujo de agua en un filtro de arena (columna): vertical, homogéneo, saturado. De éste experimento varía la longitud y el diámetro de la columna, el material poroso, los niveles de agua en la entrada y en la salida del depósito, él concluyó que, figura 2.2 [1]

El caudal (volumen de agua que pasa por unidad de tiempo), Q , a través de una columna de longitud L y área de sección transversal constante, A , es:

- proporcional al área de la sección transversal, A , de la columna,
- proporcional a la diferencia de las elevaciones del agua, h_1 y h_2 , en la entrada y en la salida del depósito de la columna, respectivamente, e
- inversamente proporcional a la longitud de la columna, L .

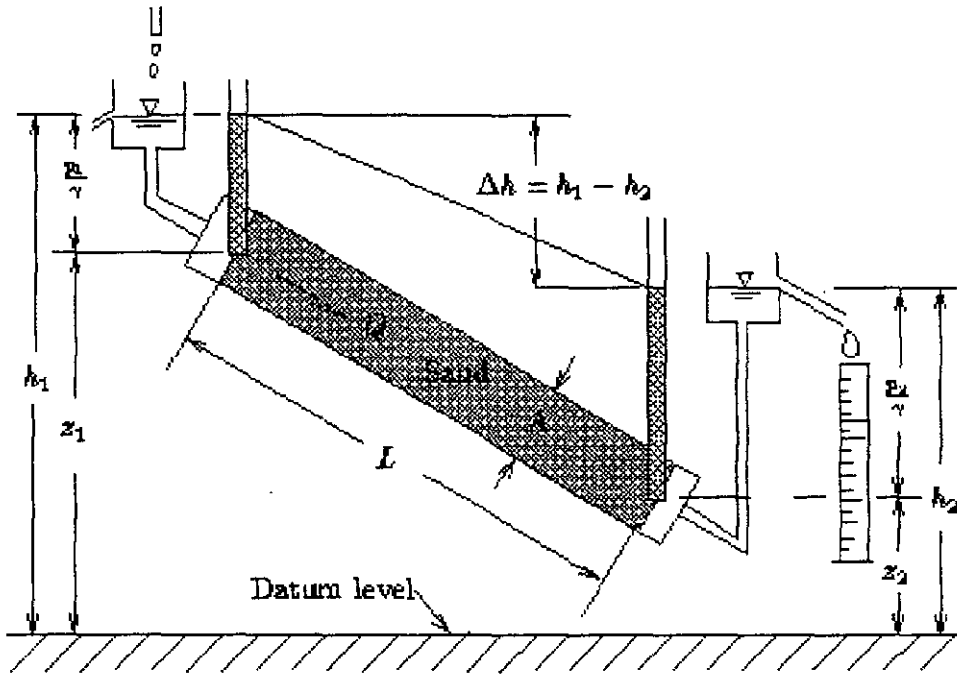


Figura 2.2 Experimento de Darcy.

Cuando combinamos estas conclusiones obtenemos la formula de Darcy o ley de Darcy:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (2)$$

donde K es un coeficiente de proporcionalidad llamado conductividad hidráulica. Las elevaciones h_1 y h_2 son medidas con respecto a un mismo datum.

1.3 Coeficientes en un acuífero.

1.3.1 Conductividad hidráulica y permeabilidad.

El símbolo K que aparece en la ley de Darcy es llamado *conductividad hidráulica* del medio poroso. Es un escalar que expresa la facilidad con que un fluido es transportado a través de la tortuosidad del espacio vacío. Es, sin embargo, un coeficiente que depende de las propiedades de

la matriz sólida y de las propiedades del fluido. Las propiedades relevantes del fluido son la densidad, ρ , y la viscosidad dinámica, μ . Las propiedades relevantes de la matriz sólida son por ejemplo: distribución del grano que forma la matriz sólida o el tamaño del espacio de poro, la forma de los granos o de los poros, tortuosidad de los conductos, superficie específica y porosidad. Los efectos de las propiedades de la matriz sólida (geometría del espacio vacío) son combinados en la forma de un coeficiente llamado *permeabilidad*.

La conductividad hidráulica, K , puede ser expresada como

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, y k (dim. L^2) es la *permeabilidad* o *permeabilidad intrínseca* del medio poroso. Es un coeficiente que depende únicamente de las propiedades de la configuración del espacio vacío[1].

1.3.2 Almacenamiento en un acuífero freático (rendimiento específico, S_y).

El volumen de agua que ha sido adicionado al almacenamiento en un acuífero freático por unidad horizontal de área, para que el nivel del agua se incremente en una unidad (un metro). En forma similar, es el volumen de agua que ha sido bombeado de un área unitaria de acuífero para producir un descenso o abatimiento unitario en el nivel de agua.

El almacenamiento, S , de un acuífero freático es definido como: el volumen de agua, ΔU_w , sacado del almacenamiento (o adicionado a él) por unidad de área horizontal, A , de un acuífero y por unidad de declinación (o incremento) de la superficie del agua, Δh , [1].

$$S_y = \frac{\Delta U_w}{A \Delta h} \quad (4)$$

1.3.3 Almacenamiento en un acuífero confinado (almacenamiento, S)

Definimos el almacenamiento de un acuífero confinado, S , como: el volumen de agua, ΔU_w , sacado del almacenamiento, (o adicionado al él) por unidad de área horizontal, A , de un acuífero por unidad de declinación (o incremento) en la carga piezométrica, h .

$$S = \frac{\Delta U_w}{Ah} \quad (5)$$

El almacenamiento se origina debido a que el agua es ligeramente compresible así como el material del acuífero también lo es. Por lo tanto, el agua puede ser adicionada en un acuífero que ya esta totalmente saturado, causando un incremento en la presión (que significa también un incremento en la carga piezométrica[1].

1.3.4 Porosidad.

Porosidad es la fracción (o porcentaje) del volumen de la roca ocupado por el espacio de poro. La porosidad puede ser dividida en marco porosidad y microporosidad. La porosidad total puede ser dividida en porosidad efectiva y porosidad inefectiva[3].

2. Modelos de flujo de agua subterránea en acuíferos.

Un modelo puede ser definido como una versión simplificada del sistema real (aquí flujo de agua subterránea) que simula de una manera aproximada la relación acción-respuesta de éste.

La simplificación es introducida en la forma de un grupo de suposiciones que expresan lo que entendemos de la naturaleza del sistema y su comportamiento relevante para las decisiones que hemos de considerar. Estas suposiciones relacionan, entre otros factores, la geometría del área investigada, la naturaleza del medio poroso (homogeneidad, isotropía, deformabilidad), de la naturaleza de los fluidos involucrados, para el régimen de flujo que se presenta. Por lo que el modelo es una versión simplificada del sistema real, existe más de un modelo para un sistema de agua subterránea dado.

La selección del modelo apropiado (recuerde que no es único, y el mismo dominio puede ser modelado en diferentes modos) su uso en un caso particular depende en:

- el objetivo o objetivos de la investigación y
- la disponibilidad de recursos. Esto incluye tales como el tiempo, presupuesto, mano de obra especializada, computadoras y códigos.

Los objetivos dictan que características del problema investigado y dominio del problema deben ser representados en el modelo, a que detalle y a que grado de rigurosidad. En algunos casos, bastara con un promedio de los niveles del agua tomados sobre grandes áreas, mientras que en otros necesitamos los niveles del agua en puntos específicos. En algunos casos, podemos pasar por alto la subsidencia del suelo debida al bombeo, mientras en otros el conocimiento de la subsidencia es una parte esencial del problema de estudio. El bombeo se puede asumir uniformemente distribuido sobre áreas grandes, o puede ser representado como puntos fuente.

La mayoría de los modelos expresan nada más que un balance de una cantidad extensiva considerada: masa de agua, masa de un soluto y calor[1].

2.1 Tipos de aplicaciones en modelación

- *Predictivos*: Usados para predecir el futuro; requiere calibración.
- *Interpretativos*: Usados como un marco de trabajo para estudiar sistemas dinámicos y/o organizar datos de campo; no necesariamente requieren de calibración
- *Genéricos*: Usados para el análisis de flujo en sistemas hidrogeológicos hipotéticos; puede ser útil para apoyar como guía el reglamento de una región específica[2].

2.2 Modelos.

2.2.1 Modelo conceptual.

El primer paso en el procedimiento de modelar es la construcción de un modelo conceptual del problema y el dominio relevante del acuífero. El modelo conceptual consiste de un grupo de suposiciones que reduce el problema real y el dominio real a una versión simplificada que es aceptable en vista de los objetivos del modelo y del problema de manejo asociado. Se desea que las suposiciones relacionen los siguientes elementos:

- la geometría de las fronteras del dominio del acuífero investigado,
- el tipo de material que comprende el acuífero (con referencia a su homogeneidad, isotropía, etc.),
- el modo de flujo en el acuífero (tridimensional o bidimensional)
- el régimen de flujo (laminar o turbulento)
- las propiedades del agua (con referencia a su homogeneidad, compresibilidad),
- efectos de sólidos disueltos y/o temperatura en densidad y viscosidad,
- la presencia de supuestas fronteras abruptas fluido-fluido, tal como una superficie freática o una interfase agua dulce-agua salda,
- fuentes y sumideros de agua y de contaminantes relevantes dentro del dominio estudiado y en sus fronteras (con referencia a sus aproximaciones como puntos fuente o sumidero o distribuidos), y
- las condiciones en la frontera del dominio considerado que expresan el modo que este interactúa con su medio circundante.

2.2.2 Modelo matemático.

En el segundo paso, expresamos el modelo conceptual en forma de un modelo matemático. Éste consiste de:

- una definición de la geometría del dominio considerado y sus fronteras,
- una ecuación (o ecuaciones) que expresen el balance de la cantidad extensiva considerada (o cantidades),
- ecuaciones de flujo, que relacionan los flujos o las cantidades extensivas consideradas para las variables de estado del problema,
- ecuaciones constitutivas que definan el comportamiento de los materiales en particular – fluidos y sólidos- involucrados,
- condiciones iniciales que describan el estado conocido del sistema considerado en algún tiempo inicial, y
- las condiciones de frontera que describen la interacción del dominio considerado con su medio.

2.2.3 Balance de momentum.

El modelo matemático completo que describe el comportamiento mecánico de un sistema (fluido o sólido), requiere tres ecuaciones de balance:

- una ecuación de balance de masa (para la variable de densidad)
- una ecuación de balance de momentum para la variable velocidad (momentum por unidad de masa),
- una ecuación de balance de energía (para la variable temperatura).

Para una solución simultánea de estas tres ecuaciones, obtenemos una descripción completa del comportamiento del sistema, en términos de las tres variables: densidad de masa, velocidad y temperatura

2.2.4 Coeficientes.

En el paso del sistema real para el modelo conceptual y luego entonces para el modelo matemático, varios coeficientes de transporte y almacenamiento de las cantidades extensivas consideradas serán introducidos. La permeabilidad de un medio poroso, transmisibilidad del acuífero, almacenamiento del acuífero, dispersividad de un medio poroso pueden servir como ejemplos de tales coeficientes. Todos estos coeficientes son coeficientes de los modelos, y sin embargo, a pesar de la similitud en sus nombres en diferentes modelos su interpretación y valor actual puede diferir de un modelo a otro.

2.2.5 Métodos de solución.

Una vez que el modelo matemático ha sido construido en términos de variables de estado relevantes, ha de ser resuelto para casos de interés práctico, por ejemplo, para planear el bombeo o recarga artificial, o para anticipar la propagación de un contaminante de una fuente potencial de contaminación en el dominio del acuífero considerado. El método preferible de solución es el analítico, porque una vez que la solución se ha obtenido, puede ser empleada para una variedad de proyectos. Sin embargo en muchos casos de interés práctico este método no es factible por la forma irregular de las fronteras del dominio, la heterogeneidad del dominio, expresado en una distribución espacial de sus coeficientes de transporte y almacenamiento, y la distribución espacio-temporal irregular de las funciones fuente-sumidero. Los métodos numéricos son empleados para resolver el modelo matemático.

2.2.6 Solución numérica.

La principal característica de los diferentes métodos numéricos es:

- la solución es buscar para valores numéricos de las variables de estado únicamente en puntos específicos en el dominio espacio-temporal definido para el problema,
- las ecuaciones diferenciales parciales que representan el balance de las cantidades extensivas consideradas son remplazadas por un grupo de ecuaciones algebraicas escritas en términos de los valores discretos buscados de las variables de estado en los puntos discretos en el espacio y el tiempo,
- la solución es obtenida para un grupo específico de valores numéricos para los diferentes coeficientes del modelo,
- porque el número de ecuaciones a resolver simultáneamente es muy grande, un código de computadora o un programa de computadora ha de ser preparado para obtener una solución, usando una computadora digital[1].

Referencias

[1] Advanced Ground Water Hydrology. Computer-Mediated Distance Learning; Jacob Bear, Haifa, Israel, 2000.

<http://w3.technion.ac.il/~cvtbear/>

<http://www.heath-hydrology.com/cmdl>

[2] Applied Ground Water Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport, Mary P Anderson and William W. Woessner, Academic Press, Inc.

[3] Flow and Transport Through Porous Media I, Chem. Eng. 571; Geology, Chemistry and Physics of Fluid Transport. G. J. Hirasaki, 2000.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
VISUAL MODFLOW

EXPOSITOR: MC LUIS ERNETO LESSER CARRILLO
MC RAYMUNDO ESTRELLA CHAVERO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

Visual Modflow

MC Luis Ernesto Lesser Carrillo
Y MC Raymundo Estrella Chavero

Diplomado Internacional sobre Contaminación y Restauración de Suelos y Acuíferos
Modelos Matemáticos en Geohidrología y Contaminación de Suelos y Acuíferos



FACULTAD DE INGENIERIA UNAM
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

Visual Modflow

MC Luis Ernesto Lesser Carrillo

**Diplomado Internacional sobre Contaminación y Restauración de Suelos y Acuíferos
Modelos Matemáticos en Geohidrología y Contaminación de Suelos y Acuíferos**

Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Definir Objetivos

- ¿Cual es el propósito del Modelo?
- La formación del modelo depende de la finalidad del proyecto

Abastecimiento de agua
(Flujo de agua regional)

vs.

Sistema de remediación
(Flujo de agua local)

- Se debe de tener cuidado al utilizar modelos anteriores
- Determinar cual fue el propósito del modelo y estudiar su posible aplicación.

Seleccionar Modelo

- ¿Cual es el propósito del Modelo?
- ¿Cual es la información disponible?

Es importante recordar que:

Entrada Basura ↓ Salida Basura

Modelos Matemáticos

- Modelos Analíticos - tienen solución exacta

Ejem: Ley de Darcy

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A$$

- Modelos Numéricos - no tienen solución exacta

Ejem: Ecuación de Laplace

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Modelos Analíticos

Ventajas:

- Sencillos y fáciles de utilizar
- Se obtienen soluciones con rapidez
- Las soluciones son estables
- Se obtiene un resultado exacto sin necesidad de interpolar en cualquier espacio/tiempo.

Modelos Analíticos

Desventajas:

- El medio debe de ser homogéneo
- La dispersión es espacialmente uniforme (aunque puede ser anisotrópica)

Modelos Numéricos

Ventajas:

- Puede manejar geología heterogénea y anisotropía.
- Puede manejar grandes cantidades de información
- Puede interpolar resultados con facilidad.

Desventajas:

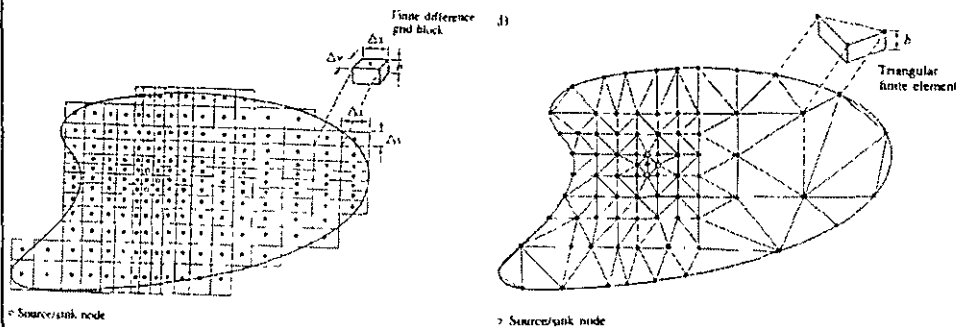
- Mas complicado y tardado

Modelos Numéricos

Tipos:

- Diferencias Finitas
Mas sencillo y utilizado

- Elementos Finitos
Mayor complejidad



(De Wang y Anderson, 1982)

Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Recolección de Datos

- Lo mas importante es recordar que :

Entrada Salida
Basura ↓ Basura

- El resultado de un modelo nunca será mejor que los datos de entrada

Recolección de Datos - Información Necesaria

- topografía
- caudales y niveles de rios y lagos
- precipitación / evaporación
- localización de pozos
- historial de los caudales de los pozos
- localización de fuentes contaminantes
- geología/geohidrologia
- conductividad hidráulica
- coeficientes de almacenamiento
- dispersión, etc.

Recolección de Datos

- Crear un modelo conceptual
- Desarrollar una intuición de los resultados
(Ejem: mapa de comportamiento del acuífero)
- Si el modelo matemático no reproduce resultados esperados, hay que revisar el modelo conceptual

Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Discretización del Modelo

La discretización del modelo debe diseñarse con la idea de:

- Incrementar la estabilidad del modelo (def. mas adelante)
- Incrementar la resolución del modelo
- Minimizar la dispersión numérica
- Minimizar el esfuerzo computacional

Debe existir un equilibrio razonable entre estos objetivos.

Con las nuevas computadoras, se reduce cada vez mas este problema.

Discretización del Modelo

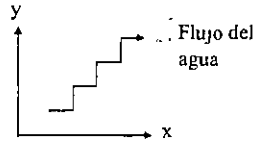
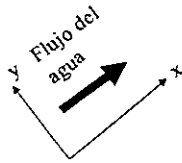
Estabilidad del modelo:

- Un espaciamiento uniforme produce los resultados más estables
- El incremento del tamaño de 2 celdas continuas no debe de exceder un factor de 1.5
- Alrededor de los pozos la malla debe de ser refinada para correctamente simular el cono de abatimiento
- La malla debe de ser refinada en areas de interes.

Discretización del Modelo

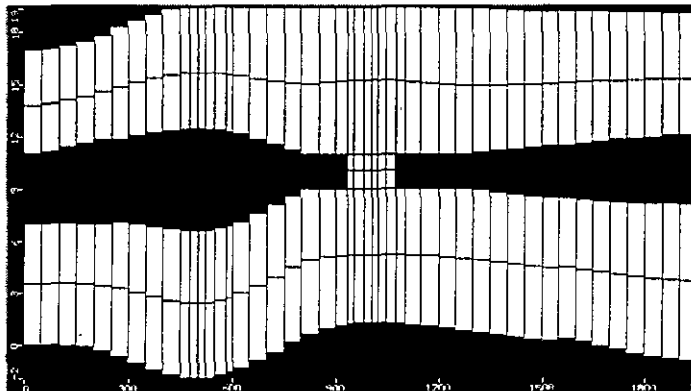
Estabilidad del modelo:

- Son preferibles las celdas cuadradas, deben evitarse las celdas demasiado rectangulares
- Es preferible alinear los ejes en dirección del flujo del agua subterránea para evitar la dispersión numérica



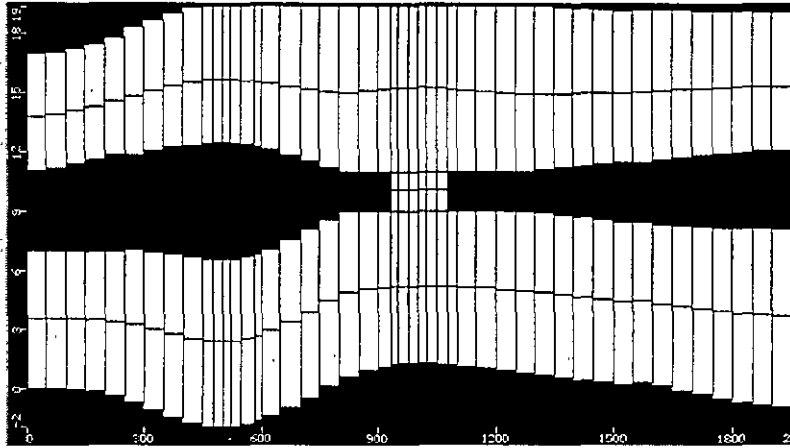
Discretización del Modelo

- No deben de existir capas discontinuas (utilizar un espesor mínimo)
- Al simular las capas geologicas es preferible utilizar mas capas para simular un estrato (Una capa del modelo es una división matemática y no significa un estrato distinto)



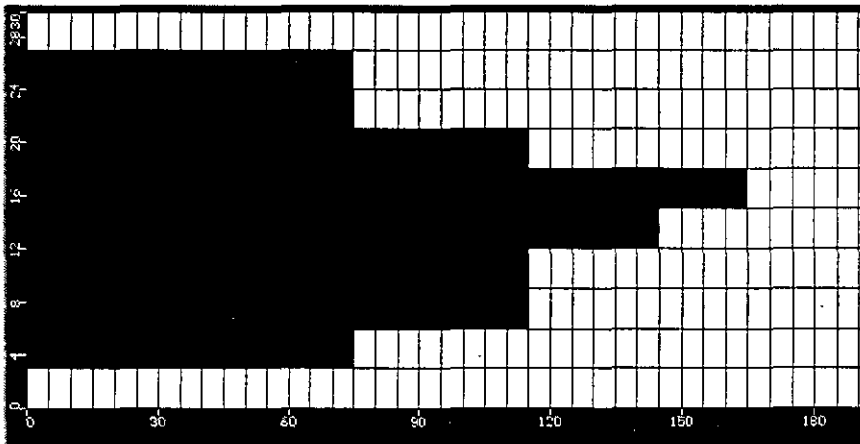
Discretización del Modelo

- Celdas adyacentes deben de empalmarse al menos un 75%



Discretización del Modelo

- Es preferible utilizar capas del mismo tamaño y utilizar varias capas para representar un estrato para evitar un empalme menor de 75% en celdas adyacentes.



Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Parámetros hidráulicos del acuífero

- Transmisibilidad ($K=T/b$)
- Almacenamiento
(S_s - para acuífero confinado, S_y - para acuífero libre)

Tomados de pruebas de bombeo, y generalmente se afinan en la calibración.

(Aquitest y GWW paquetes para interpretar pruebas de bombeo)

Fronteras

Las fronteras mas importantes en Vmodflow son:

- *constant head* (carga constante)
- *river / lake* (rio/lago)
- *General Head* (carga general)
- *Specified no-flux* (no flujo)

***Constant head* (Carga constante)**

- Frontera del 1^{er} tipo o Dirichlet (especifica la carga en la frontera)
- No calcula el nivel del agua en las celdas asignadas
- En estado estacionario especifica el nivel piezométrico de la celda
- En estado transitorio implica un abastecimiento de agua infinito!!! (hay que removerla calculando la recarga producida)
- Debe ser utilizada únicamente al modelar grandes lagos y ríos o el oceano

River/Lake (Rio/Lago)

- Frontera del 3^{er} tipo, mixta o Cauchy (mezcla de frontera de 1^{er} y 2^{do} tipo)
- La diferencia con la carga constante es que esta frontera calcula el nivel de agua en la celda
- Se utiliza en casos en que el nivel de agua en los ríos o lagos no depende del agua subterránea

River/Lake (Rio/Lago)

- Hay que especificar la “conductancia” (*conductance*) que es un valor difícil de obtener en el campo y por lo tanto es un valor obtenido al calibrar (fórmula incluida en la versión 3.1 de VM)
- Otro truco para simular ríos u otros cuerpos de agua superficiales es definir un material geológico con una conductividad hidráulica muy alta y con coeficiente de almacenamiento $S=1$

General Head Boundary (GHB) (Carga General)

- Frontera del 3^{er} tipo, mixta o Cauchy (mezcla de frontera de 1^{er} y 2^{do} tipo)
- Simula el efecto de fronteras lejanas
- Gracias a esta frontera no es necesario simular grandes acuíferos para problemas pequeños
- Se debe de tener cuidado en simulaciones largas ya que tenderá a la solución con carga constante
- Se define un nivel del agua subterránea en la celda, pero este nivel representa el nivel del agua en la frontera lejana

General Head Boundary (GHB) (Carga General)

- El modelo calcula un nivel de agua en la celda
- Requiere un valor de conductancia definida por los autores de Modflow como:

$$C = \frac{KA}{L}$$

(formula incluida en la versión 3.1 de VM)

- Esto viene de la Ley de Darcy para calcular el flujo en una celda del modelo:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A$$

Specified no-flux (no flujo)

- Caso especial de una frontera del 2^{do} tipo o Neumann (especifica el flujo en la frontera)
- Es la frontera mas común en Modflow
- Cuando en una frontera no se especifica nada, Modflow asume una frontera de no-flujo
- Se utiliza a lo largo de partuaguas subterráneos, líneas de flujo o límites geológicos de acuíferos

Specified flux boundary (frontera de flujo)

- Frontera del 2^{do} tipo o Neumann (especifica el flujo en la frontera)
- No se puede especificar directamente en Modflow
- Se puede simular utilizando pozos de recarga
- Muy difícil y tardado, en especial cuando la malla de discretización no es homogénea.

Problemas al agregar pozos

- Hay que tener cuidado al indicar caudales altos en los pozos debido a la posibilidad de secar las celdas.
- Celdas secas es el “cancer” de Modflow
- Cuando una el nivel del agua subteranea es mas bajo que el límite inferior de una celda, esta se seca, una vez seca, esta celda no volverá a ser utilizada en la simulación

Problemas al agregar pozos

- Cuando una celda se seca, las adyacentes se secarán con mas facilidad, extendiendose este problema a todo el modelo como el cancer

• Puede utilizarse la opción de *rewetting*, pero la solución puede volverse muy inestable

• Otra opción es revisar la discretización de las capas

Rewetting Options

Activate cell wetting

Cell wetting interval

Cell wetting factor

Cell Wetting

Only wet cells from cells below

Wet cells from sides and below

Wet/dry threshold m

Rewet Option

Rewet using Re-wetting Factor

Rewet using Re-wetting Threshold

Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Calibración

- El proposito de la calibración es simular el comportamiento del acuífero comparando los resultados del modelo con observaciones de campo
 - Se necesitan criterios cuantitativos y cualitativos para calibrar
 - La calibración no da resultados únicos. Es decir, distintas personas pueden calibrar el mismo modelo válidamente de manera distinta
- ¿Que diferencia hay en las predicciones de esas distintas calibraciones?

Calibración

Parámetros de calibración:

- Conductividad hidráulica
- Recarga
- Condiciones de frontera
- almacenamiento

Al incorporar transporte aumentan los parámetros de calibración

Calibración Cualitativa

- Se hace comparando configuraciones de la elevación del nivel del agua o abatimientos
- Es importante tomar en cuenta que el modelo nos da un resultado de interpolación de resultados. Es decir, no toma en cuenta el criterio de la persona que desarrollo las configuraciones “a mano”
- Por lo general, con el tiempo se tienen mas puntos de calibración en un mismo sitio. Esto crea problemas al querer simular un acuífero partiendo de muy pocos valores

Calibración Cuantitativa

- Vmodflow presenta resultados de calibración de pozos de observación (calculado vs. observado). También calcula el *Normalized RMS (normalized root mean squared error)*
- Cuando hay suficientes puntos de calibración para el sitio de estudio, se considera que el modelo está calibrado si el *Normalized RMS < 10%*

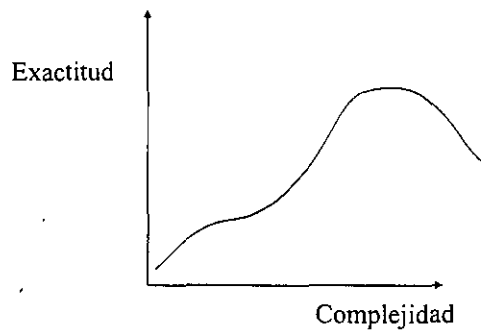
Calibración Cuantitativa

- Es importante entender la diferencia entre la exactitud real del modelo y la exactitud aparente del modelo
 - La exactitud aparente es inversamente proporcional a la cantidad de datos (a menor número de datos, la exactitud aparente es mayor)
 - La exactitud real es directamente proporcional a la cantidad de datos (a mayor número de datos la exactitud real es mayor)
- Nota: Datos se refiere a datos de calibración y NO al número de variables para calibrar

Exactitud de la Calibración

“El Mejor Modelo es el Modelo más Simple”

- Un modelo más complejo no implica mayor precisión o exactitud
- Existe un límite en el grado de complejidad del modelo y los beneficios que se obtienen



Exactitud de la Calibración

Estudio de calibración y predicción por David Freyberg (1988)

(Ground Water Vol. 26, No. 3: 350-360)

- 9 grupos de estudiantes calibraron un modelo con los mismos datos y discretización, y realizaron predicciones
- Freyberg comparó las predicciones de cada grupo con la información del sitio

Exactitud de la Calibración

- Los resultados muestran que la mejor predicción fue hecha por el grupo que utilizó relativamente pocas zonas de conductividad hidráulica, su error en la calibración fué moderado (de los mas altos de la clase)
- La peor predicción fue hecha por el grupo que utilizó el mayor número de zonas de conductividad hidráulica, su error en calibración muy bajo (la “mejor” calibración de la clase)
- Freyberg concluye que en este caso una “buena” calibración no significó una buena predicción

Exactitud de la Calibración

Saiers et al., (2004)

(Ground Water Vol. 42, No. 1: 32-44)

- Estudian los efectos de diferentes calibraciones en predicciones.
- Concluyen que modelos relativamente simples producen predicciones con una exactitud muy razonable, incluso en acuíferos complejos.

“Validación de un Modelo” - ?

- La “validación” de un modelo no significa que el modelo sea “verdadero” ó “correcto”, sino que puede reproducir una hipótesis acerca del modelo
- No hay un procedimiento para “validar” un modelo
- La “validación” Es un proceso de aprendizaje al calibrar el modelo
- Lo importante no es si el modelo es “válido”, si no si el modelo es útil

Calibración Automática

- Pest (*Parameter estimation methods*) es el programa utilizado para la calibración automática.
- Vmodflow tiene la interface WinPest
- Los métodos utilizados en la calibración automática son aún muy inestables, por lo que es muy difícil obtener un resultado positivo en muchos casos. (En especial existen problemas de inestabilidad cuando se presentan celdas secas)
- Su aportación más importante a la fecha es el cambio de mentalidad en lo que significa calibración y estudios de sensibilidad

Calibración Automática

- Es bueno que el Pest “sugiera” valores de calibración
- Esto puede ayudar a definir mejor el modelo conceptual del acuífero
- Para utilizar la calibración automática, primero se debe de calibrar “a mano”, después utilizar Pest y finalmente afinar los resultados “a mano”
- La computadora no reemplaza el el criterio del modelador

Pasos Para Crear un Modelo

- 1) Definir objetivos / seleccionar modelo
- 2) Recolectar Datos
- 3) Discretizar el modelo
- 4) Definir datos hidráulicos del acuífero / fronteras /
agregar pozos
- 5) Calibración
- 6) Predicción / incertidumbre

Predicción / Incertidumbre

- Una calibración es una manera de interpretar los resultados, por lo tanto puede haber distintas combinaciones de parámetros que calibren el modelo, todas ellas válidas
- Un estudio de sensibilidad se hace después de haber hecho la calibración de un modelo para definir la sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros
- Es posible obtener una calibración distinta, con la cual sería necesario hacer otro estudio de sensibilidad
- Los estudios de sensibilidad son largos y no responden directamente a las preguntas que se desean hacer (predicciones)

Predicción / Incertidumbre

- Es más importante saber que tan diferentes pueden ser las predicciones utilizando las diferentes calibraciones posibles
- Comienza la tendencia a reportar las predicciones en rangos y no valores absolutos
- La visión de la calibración y predicción de un modelo se está renovando



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
MODELACIÓN DE ACUÍFEROS UTILIZANDO
VISAUL MODFLOW

EXPOSITOR: MC LUIS ERNETO LESSER CARRILLO
MC RAYMUNDO ESTRELLA CHAVERO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

El siguiente ejercicio tiene como objetivo familiarizar al estudiante con el paquete Visual Modflow, la versión que se utilizará será la 3.1. Una vez que se haya familiarizado con este software, se estudiarán los pasos para crear un modelo matemático, a partir del modelo conceptual de un acuífero. Finalmente se estudiarán cuestiones prácticas y se revisarán diferentes problemas que surgen al crear un modelo.

El ejercicio para familiarizarse con el paquete consta de los siguientes pasos:

1. Descripción del problema
2. Creación de un nuevo modelo
3. Discretización del modelo
4. Refinamiento de la malla
5. Importación de una superficie
6. Asignación de las características hidráulicas del acuífero
7. Delimitación de las fronteras de flujo
8. Asignación de partículas
9. Agregar pozos
10. Correr Modflow
11. Visualización de resultados

1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Este ejemplo está basado en el flujo del agua subterránea en un sistema formado por un acuífero libre en la porción superior, un acuitardo en la porción media, y un acuífero confinado en la porción inferior, como se muestra en la figura 1.

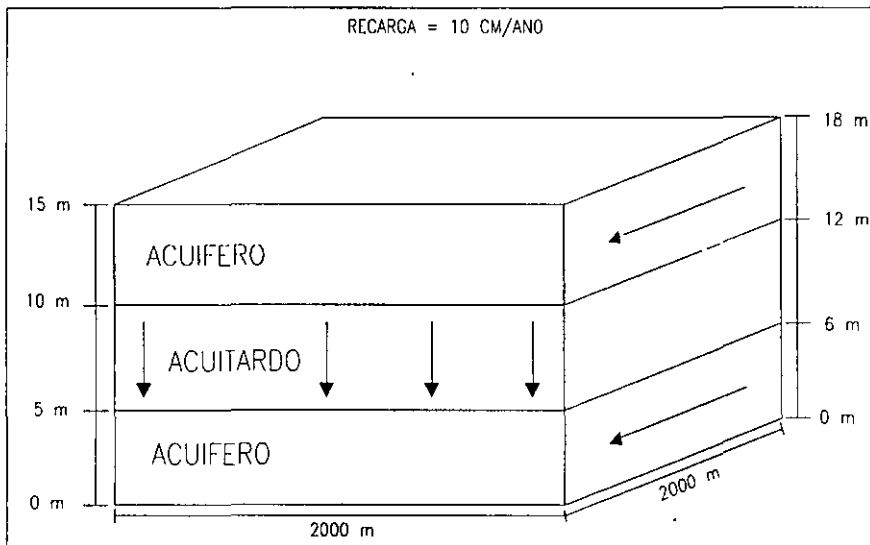


Figura 1. Dimensiones del acuífero

Notas:

- Este ejemplo está tomado del manual de Visual Modflow por Waterloo Hydrogeologic Inc.
- El símbolo \rightarrow significa enter. Aunque también se puede utilizar el tabulador para pasar al siguiente recuadro, o simplemente utilizar el mouse.
- El símbolo $\left\langle \right\rangle$ significa presionar el botón izquierdo del mouse (1 click).
- El símbolo $\left\langle \right\rangle \left\langle \right\rangle$ significa dar doble click en el botón izquierdo del mouse.
- El símbolo $\left\langle \right\rangle$ significa presionar el botón *derecho* del mouse.

2. CREACION DE UN NUEVO MODELO

☞☞ en el ícono de *Visual Modflow*

Esto nos lleva a la pantalla de Visual Modflow

Esta pantalla se puede maximizar mediante un ☞ en el recuadro derecho superior.

☞ File

☞ New

Aparecerá una ventana preguntando por el nombre del nuevo modelo.

Teclear el nombre del nuevo modelo:

Ejemplo VM ☞

(Visual Modflow asigna automáticamente la terminación .vmf)

Aparecerá una ventana para escoger las unidades deseadas, ☞ next.

Aparecerá otra ventana para escoger los valores hidráulicos que por default tendrá el modelo, cambie los siguientes valores (Figura 2):

Conductividad hidráulica en X (K_x) en m/s: **2e-4** ☞

Conductividad hidráulica en Y (K_y) en m/s: **2e-4** ☞

Conductividad hidráulica en Z (K_z) en m/s: **2e-4** ☞

Coefficiente de almacenamiento (S_s) en 1/m: **1e-4** ☞

Rendimiento específico (S_y): **0.2** ☞

Porosidad efectiva: **0.35** ☞

Porosidad total: **0.35** ☞

☞ next

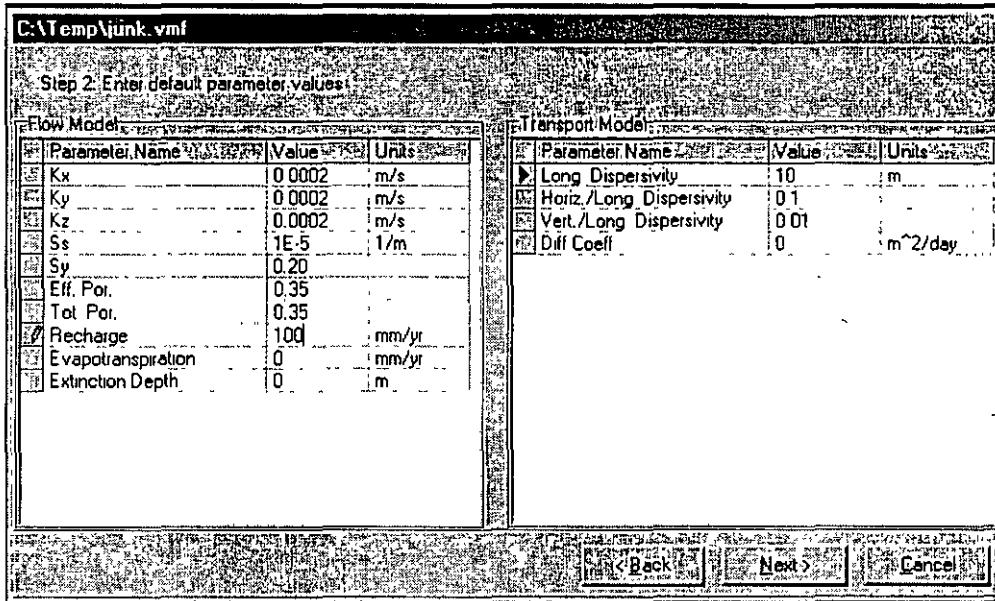


Figura 2. Valores hidráulicos básicos del modelo

Aparecerá una ventana para importar un plano base y hacer una primera discretización del modelo (figura 3).

☞ en el recuadro *Import site map*

☞ en el ícono de *Browse*

Seleccionar el archivo *Sitemap.dxf*, dentro del directorio *Tutorial*, (estará dentro del directorio donde se haya grabado el visual modflow).

Teclée los valores que aparecen en la figura 3.

☞ en *Finish*

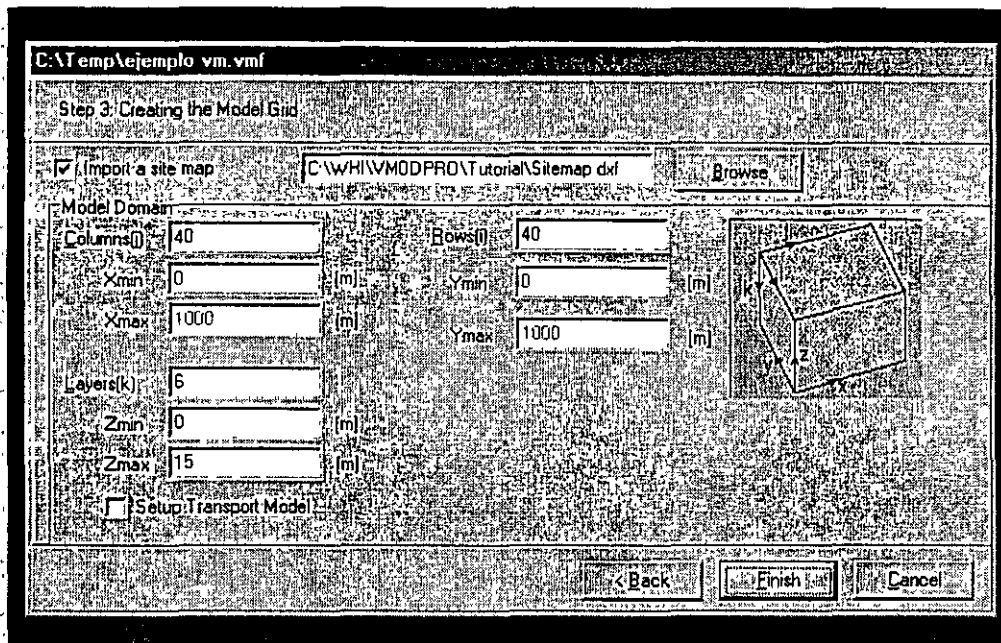


Figura 3. Ventana para escoger el plano base

3. DISCRETIZACION DEL MODELO

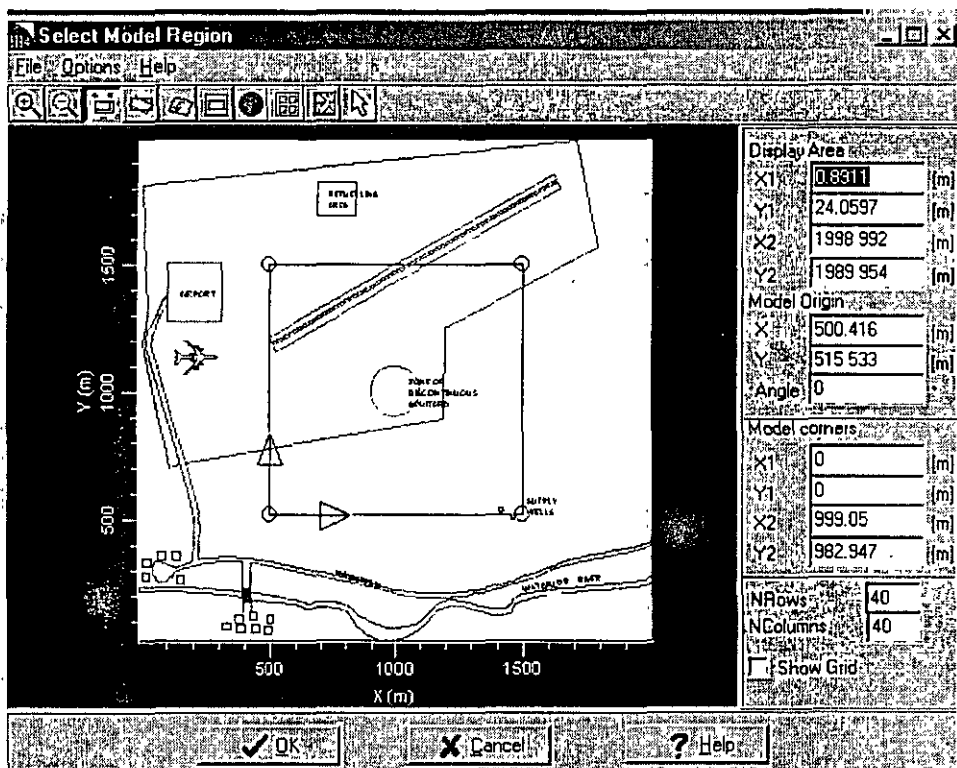



Figura 4. Ventana de discretización del modelo

Aparecerá la ventana que permitirá modificar la discretización del modelo (Figura 4).


Esta ventana muestra el plano base importado con formato *dxf*. En la figura se aprecia en la porción superior izquierda un aeropuerto, al sur un río y al norte una zona de tanques de combustible. Al centro existe una zona donde el acuitardo no es continuo, de manera que los acuíferos superior e inferior se comunican (*zone of discontinuous aquitard*). Finalmente existen pozos de abastecimiento (*supply wells*) que están además únicamente en el acuífero inferior. Vmodflow lee automáticamente las coordenadas máximas y mínimas del mapa *dxf*, de esta manera se puede apreciar que el área de interés mide aproximadamente 2000 x 2000 metros. El propósito de este modelo es el de determinar si existe el peligro de contaminar los pozos de abastecimiento a partir de un derrame en los tanques de combustibles.



El recuadro con 4 círculos en las esquinas representa el área que se va a modelar. Para ampliar el área que se va a modelar se  en cualquiera de los círculos de las esquinas y *sin depresionar el mouse*, se mueve el recuadro hasta abarcar el área deseada y se suelta el botón del mouse.

Vmodflow permite la rotación de la malla de discretización. Esto puede ser utilizado cuando existe un flujo preferencial del agua subterránea en dirección distinta a los ejes principales utilizados en el plano base. Para hacer esto:

 Options

 Rotate

 en cualquiera de los triángulos que aparecen en las esquinas del recuadro y *sin depresionar el mouse*, se rota el recuadro hasta abarcarlo en la dirección deseada y se suelta el botón del mouse.

Cambie el tamaño y la dirección de la malla de discretización como se muestra en la figura 5 (en la porción inferior derecha se puede seleccionar *Show grid* para ver la malla de discretización, y para volver a cambiar el tamaño:  Options y  Rotate).

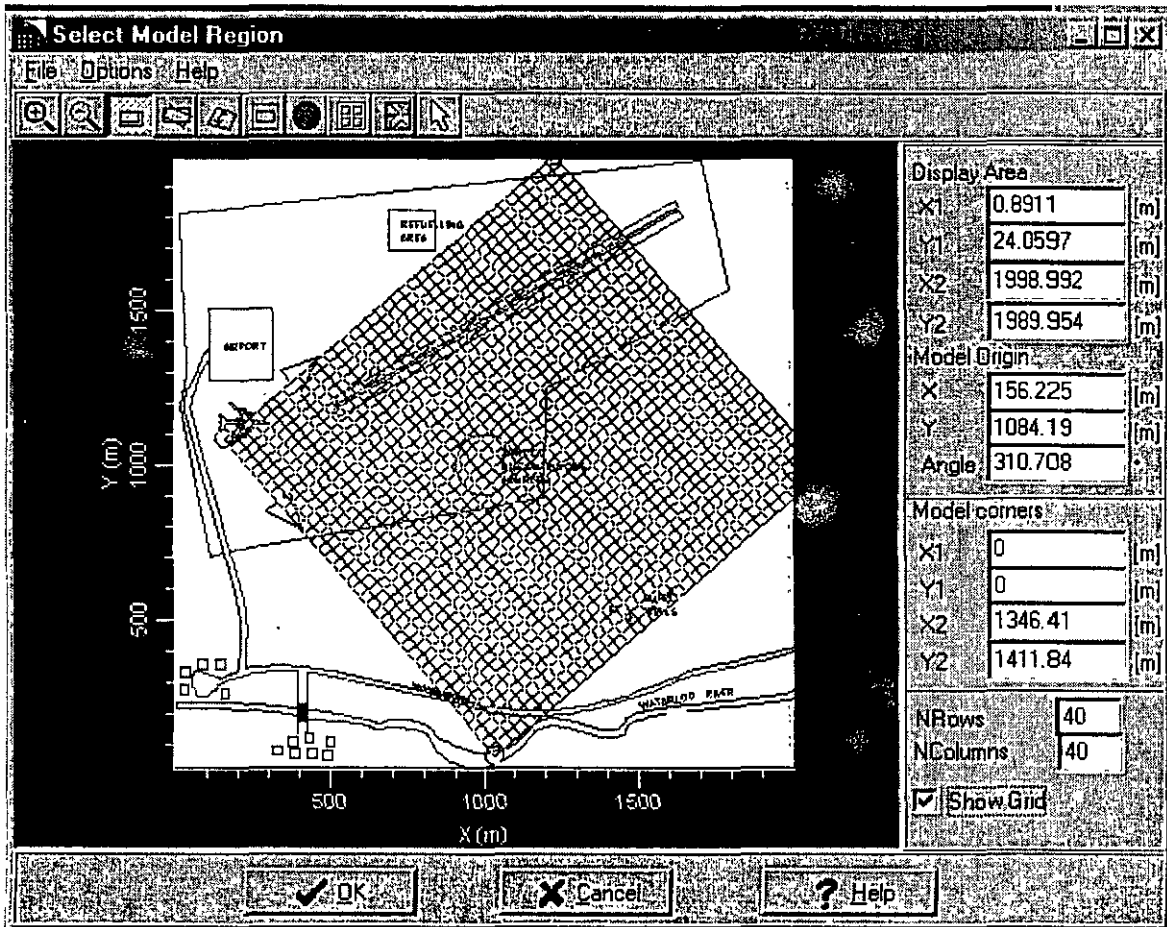



Figura 5. Manipulación de la malla de discretización

Esto muestra que la discretización de la malla es independiente del dibujo base que se utilice para crear el modelo. En este ejercicio deseamos que la discretización sea conforme al dibujo base, así que en las coordenadas de la porción derecha con la información de la siguiente Figura 6 y  en OK.

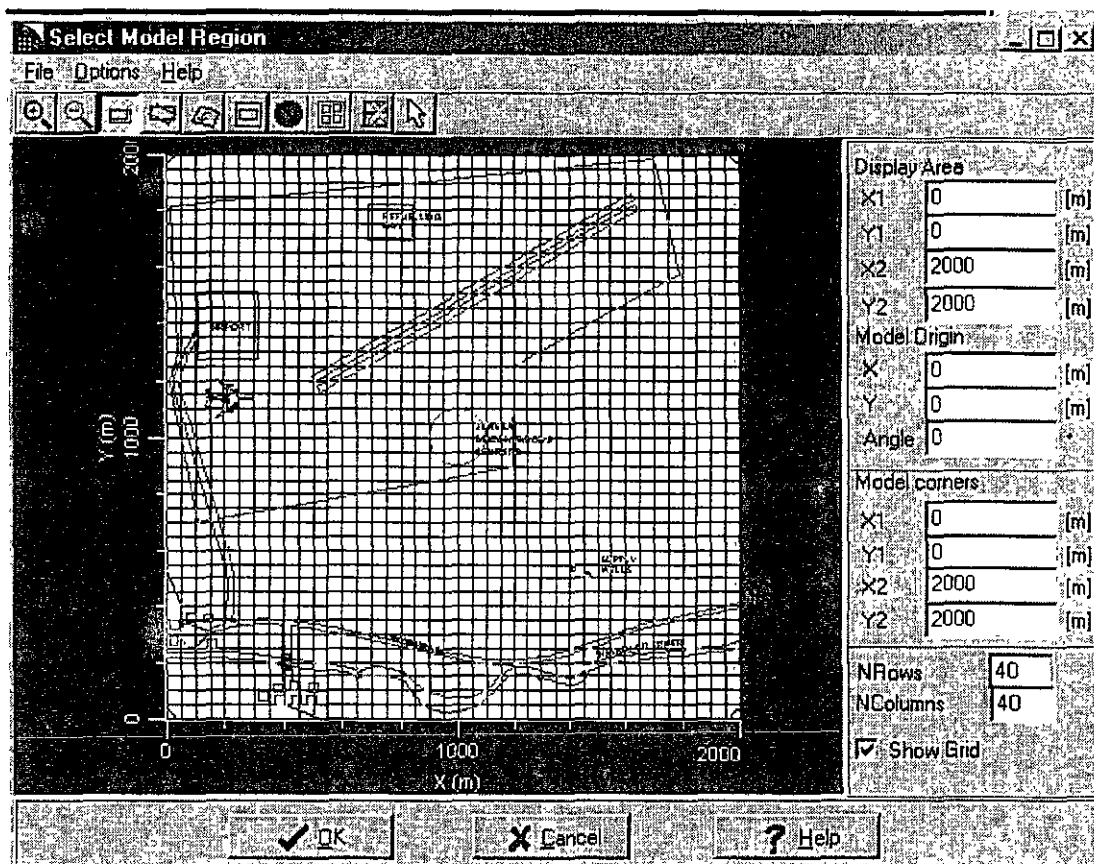


Figura 6. Malla de discretización

☑ en OK en la siguiente ventana que corrobora lo que queremos hacer.

Es importante darse cuenta de que cualquier error hasta antes de este punto, nos fuerza a comenzar de nuevo la formación del modelo. A partir de este momento, los datos que le hemos dado han sido salvados.

4. REFINAMIENTO DE LA MALLA

Aquí entra al menú de entrada de datos. Dentro de esta pantalla refinaremos la malla, agregaremos las propiedades y geometría del acuífero, estableceremos las fronteras y agregaremos pozos.

Es necesario refinar la malla alrededor de los pozos de abastecimiento de agua (*supply wells*) y de la zona discontinua del acuitardo (*zone of discontinuous aquitard*). El tamaño de la celda representa el tamaño “matemático” del pozo en el modelo, por lo tanto una malla más discretizada simulará el pozo de una manera mas realista. Además del tamaño del pozo, si existe abatimiento alrededor del pozo, una discretización mayor producirá cambios de pendientes (gradientes) menos abruptos, del nivel estático en zonas de abatimiento.

Del menú izquierdo:

- ☞ Edit grid
- ☞ Edit columns
- ☞ Add

Haciendo esto se puede definir los lugares exactos para definir la discretización de la malla. Al mover el mouse al plano aparecerá una línea vertical, agregue la discretización como se ve en la figura 7. Despues en ☞ close.

Para ayudar en esto puede usarse el zoom, del menú inferior:

- ☞ F-5 Zoom in (o presionar la tecla F5)
- ☞ en una esquina de la zona en que se deseé ver en detalle, y ☞ en la otra, para cerrar el rectangulo.

Para ver nuevamente todo el modelo ☞ F-6 Zoom out del menú inferior (o presionar la tecla F6)

Para refinar los renglones, del menú izquierdo:

- ☞ Edit grid
- ☞ Edit rows
- ☞ Add

De esta manera refine la malla como se ve en la figura 7.

en ☞ close

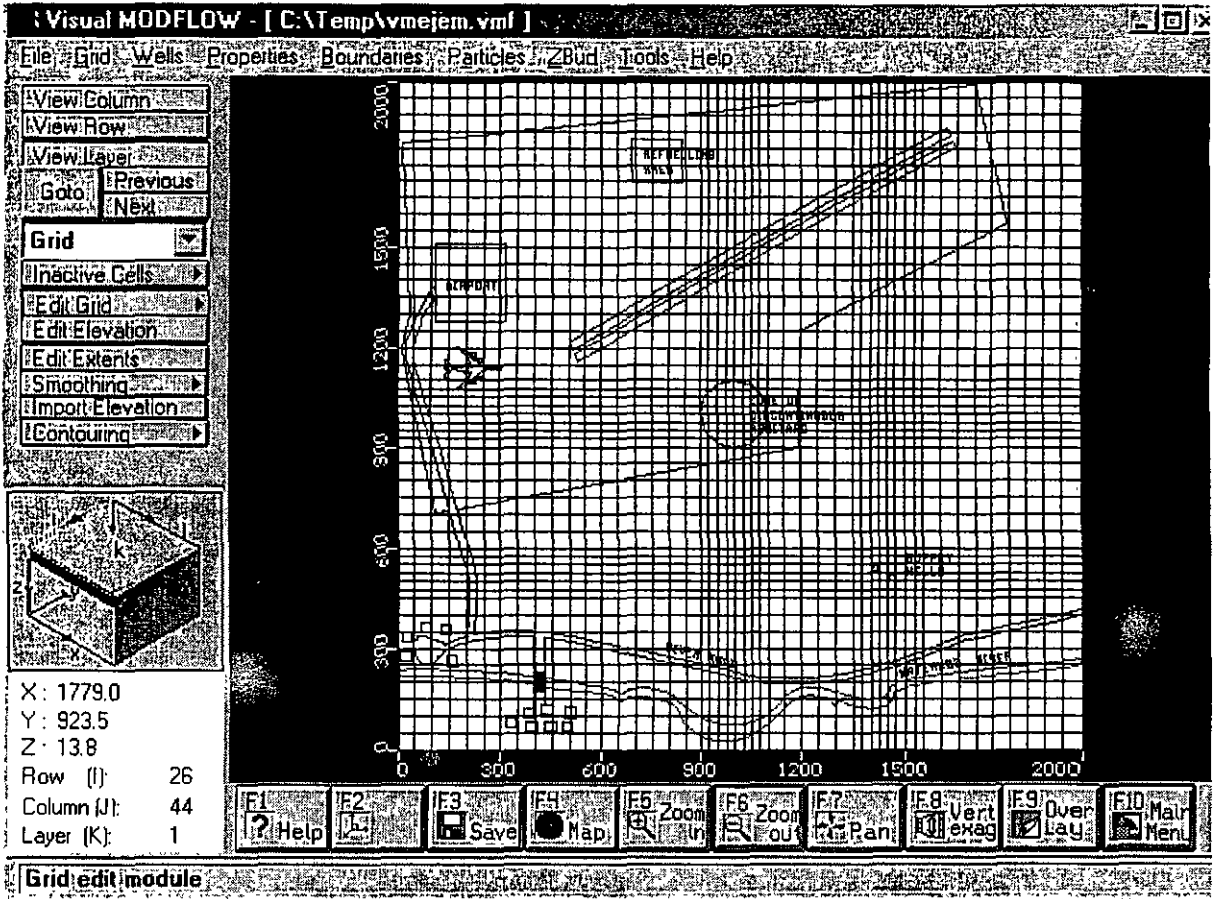


Figura 7. Refinamiento de la malla de discretización

5. IMPORTACION DE UNA SUPERFICIE

Del menú izquierdo, View column

Mover el mouse a la malla y en cualquier columna.

Para poder ver el modelo en esta escala hay que utilizar una exageración vertical, para esto:

F8- Vert Exag (o presionar la tecla F8)

Teclé 50 y en OK

Del menú izquierdo, Import elevation

Aparecerá una ventana como la de la figura 8.

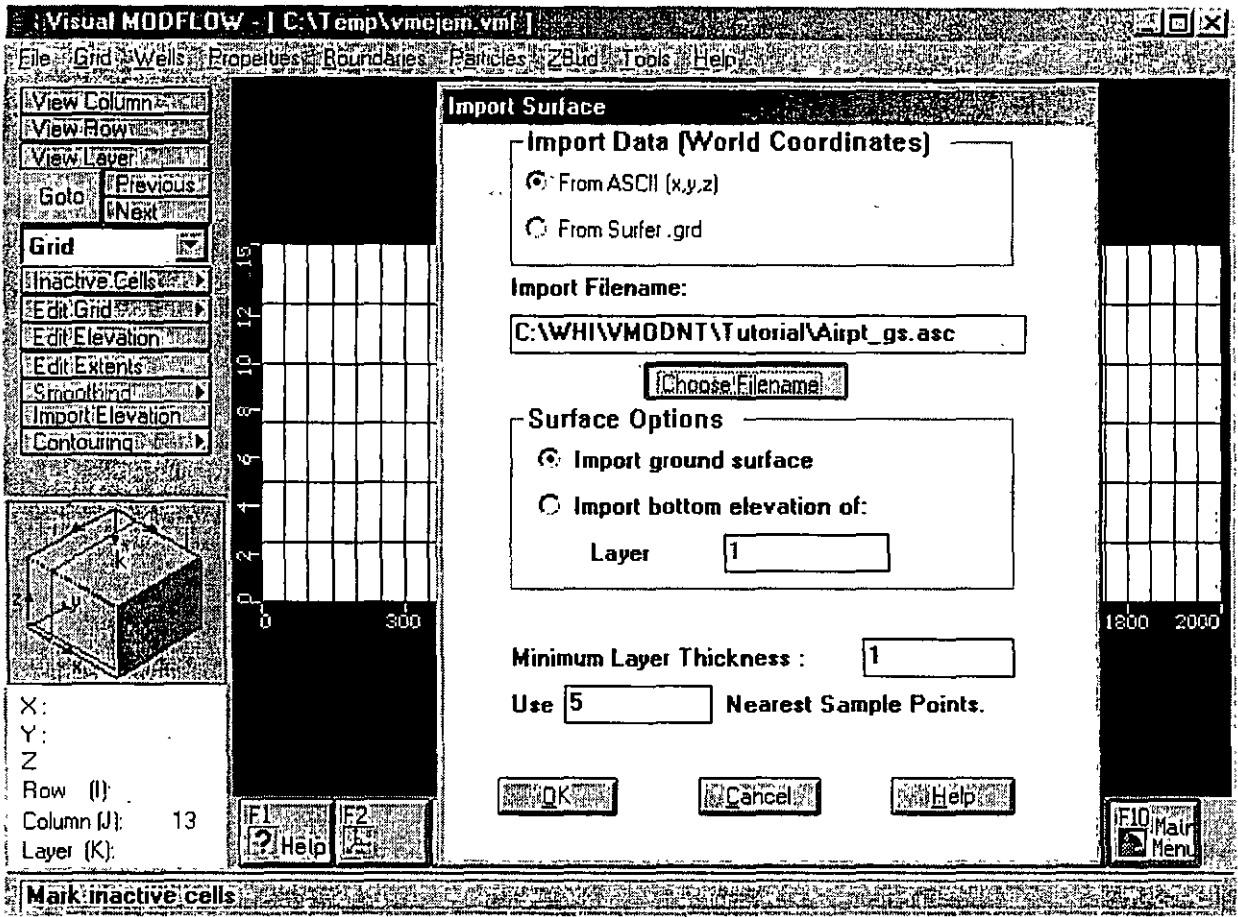


Figura 8. Menú para importar elevaciones

☞ en Choose filename

En el directorio de *tutorial* dentro del directorio de Vmodflow, existen algunos archivos con terminación *.asc*.

☞ *airpt_gs.asc*

☞ OK

asegúrese de que la opción *import ground surface* está seleccionada

☞ OK

Esto importará una superficie con una pendiente que va aproximadamente de 18 metros al norte hasta 16 metros al sur (figura 9).

Ahora para importar la base de las 3 capas geohidrológicas:

☞ Import elevation

☞ en Choose filename

☞ *airpt_b1.asc*

☞ OK

☞ import bottom elevation of layer

tecleé 2

☞ OK

Repita el mismo procedimiento con los archivos *airpt_b2.asc* y *airpt_b3.asc*, importandolas como base de las capas 4 y 6 respectivamente.

Ahora es necesario corregir las divisiones “matemáticas” que hicimos a estas capas.

Del menú izquierdo, ☞ Edit grid

☞ Edit layers

☞ Delete

borre las 3 divisiones de las capas que no fueron modificadas anteriormente dando un ☞ en ellas.

☞ Add

agregue nuevamente las divisiones que borró. Es decir, divida a la mitad las 3 capas que se ven. De esta manera Vmodflow hace una interpolación de las elevaciones de la base y superficie de cada capa. Al final debe de observarse una distribución parecida a la de la figura 9.

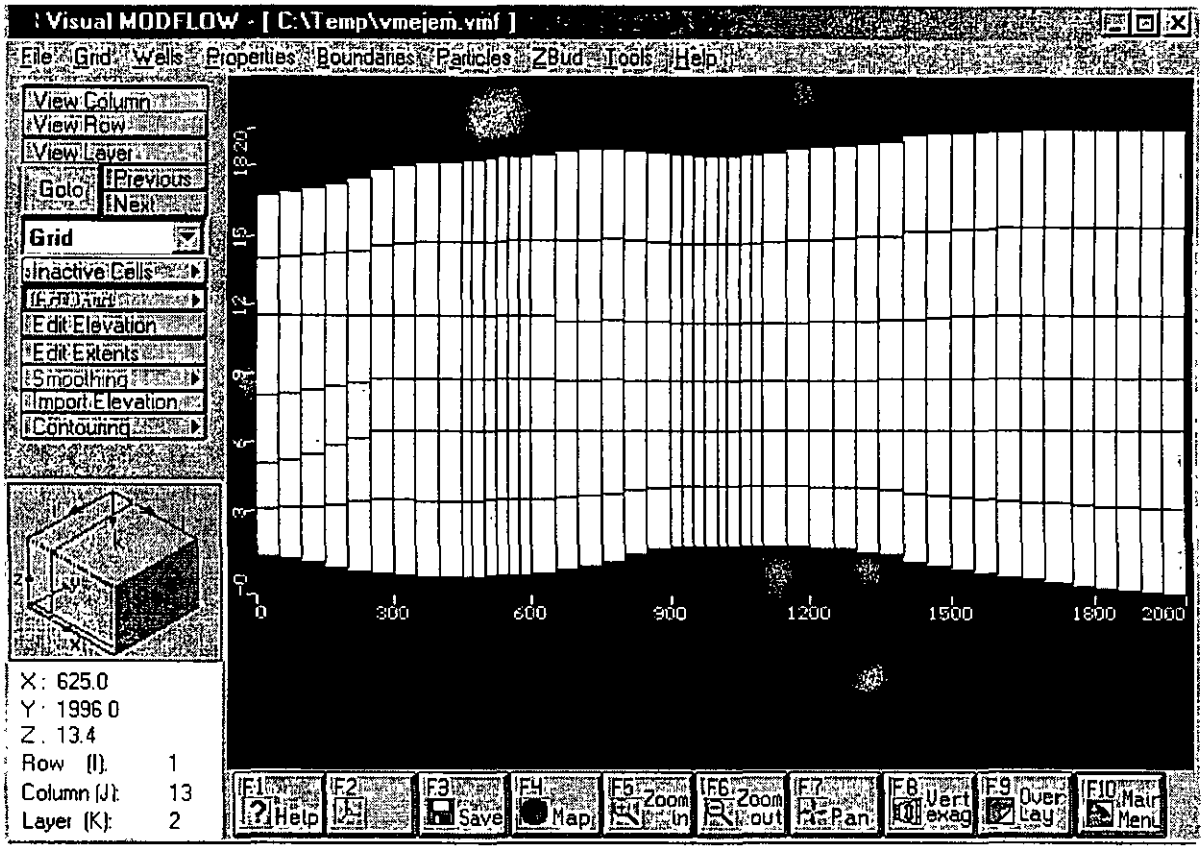


Figura 9. Superficie topográfica importada

6. ASIGNACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ACUIFERO

☞ View layer

Seleccionar cualquier la capa dando un ☞. Esto deberá de crear una vista aérea del lugar.

☞ Properties (en el menú superior)

☞ Conductivity

En este momento el modelo preguntará si se desea salvar la información de la malla.

☞ en Yes

Al iniciar el desarrollo del modelo, ya se alimentaron ciertos valores de conductividad hidráulica al modelo. En este momento, todas las celdas del modelo tienen esos valores. A continuación comenzaremos a modificar esos valores para representar los 2 acuíferos y el acuitardo. Ya que los valores con que alimentamos al modelo representan los valores de los acuíferos (capas 1, 2, 5 y 6), ahora asignaremos el valor de conductividad hidráulica del acuitardo (capas 3 y 4).

☞ Go to (en el menú de la izquierda)

Aparecerá una ventana, escribir:

3 ↵

☞ OK

Del menú izquierdo, ☞ Assign y ☞ Window

Mover el mouse a la celda de la esquina superior izquierda y ☞ en el centro de la celda. Después mover el mouse a la esquina inferior derecha y ☞ en el centro de la celda. Esto creará una ventana que cubrirá toda la capa. Aparecerá una ventana para asignar la conductividad.

☞ New

Toda la malla cambiará a color azul. Asignar los valores de conductividad hidráulica del acuitardo:

K_x (m/s) = **1e-10** ↵

K_y (m/s) = **1e-10** ↵

K_z (m/s) = **1e-11** ↵

☞ OK

Esto asigna la baja conductividad hidráulica tan solo a la capa 3, sin embargo, el acuitardo es representado por las capas 3 y 4. Por lo tanto es necesario copiar esta propiedad a la capa 4.

Del menú izquierdo ☞ Copy, ☞ Layer

Aparecerá una ventana (Figura 10), en la porción superior escoger:

☞ Zone #2

En la porción inferior:

☞ Layer 4

☞ OK

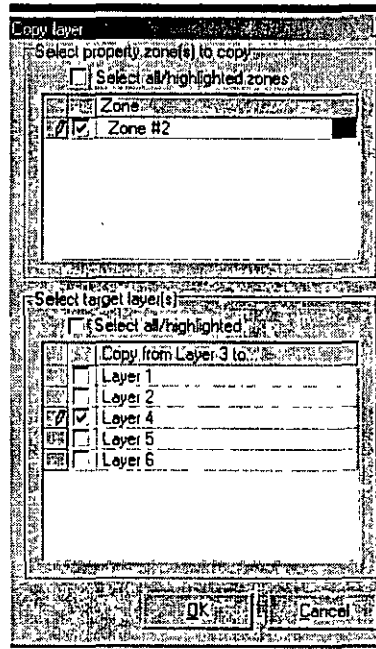


Figura 10. Copiando propiedades de una capa a otra

Para comprobar que la conductividad hidráulica fue copiada correctamente, de un ☞ *Next* del menú izquierdo, con eso pasaremos a las capa 4, la cual también debe de tener un color azul. Al seguir presionando ☞ *next*, cambiaremos de nuevo al color blanco en las siguientes capas.

Ahora se asignarán los valores de almacenamiento al acuitardo. Regrese a la capa 3.

Del menú superior ☞ Properties

☞ Storage

Del menú izquierdo ☞ Assign ☞ window

Mover el mouse a la celda de la esquina superior izquierda y $\left\langle \right\rangle$ en el centro de la celda. Después mover el mouse a la esquina inferior derecha y $\left\langle \right\rangle$ en el centro de la celda. Esto creará una ventana que cubrirá toda la capa. Aparecerá una ventana para asignar el almacenamiento.

$\left\langle \right\rangle$ New (toda la malla cambiará a color azul)

Asignar los valores de almacenamiento y porosidad:

Ss (1/m): **1e-2** $\left\langle \right\rangle$

Sy: **0.003** $\left\langle \right\rangle$

Eff. Por.: **0.65** $\left\langle \right\rangle$

Eff. Por.: **0.65** $\left\langle \right\rangle$

$\left\langle \right\rangle$ OK

del menú izquierdo $\left\langle \right\rangle$ Copy

$\left\langle \right\rangle$ Layer

Aparecerá una ventana, escoger:

Del menú izquierdo $\left\langle \right\rangle$ Copy, $\left\langle \right\rangle$ Layer

Aparecerá una ventana (Figura 10), en la porción superior escoger:

$\left\langle \right\rangle$ Zone #2

En la porción inferior:

$\left\langle \right\rangle$ Layer 4

$\left\langle \right\rangle$ OK

Nuevamente compruebe que los valores de almacenamiento han sido copiados correctamente. Para esto será necesario cambiar las características de la capa que muestra el almacenamiento.

$\left\langle \right\rangle$ Overlay (del menú inferior) o presionar F9

En la ventana que aparece, seleccionar *Prop(F) Storage*, mediante un $\left\langle \right\rangle$.

$\left\langle \right\rangle$ en el ícono de puntos suspensivos a las correspondiente al *Prop(F) Storage*

$\left\langle \right\rangle$ *Solid colors*

OK

OK

Ahora puede comprobar que los valores de almacenamiento han sido copiados mediante *Previous* o *Next*.

Ahora se simulará la comunicación entre los 2 acuíferos para ver el efecto en transporte.

Properties

Conductivities

Go to (Dar un valor de 3 para ir a la capa 3)

OK

Zoom in (Del menú inferior)

Hacer una ventana cerca de la discontinuidad del acuitardo (*zone of discontinuous aquitard*)

Assign (del menú izquierdo) y single (Esto es para asignar propiedades a una sola celda)

Aparecerá una ventana de asignación (figura 11).

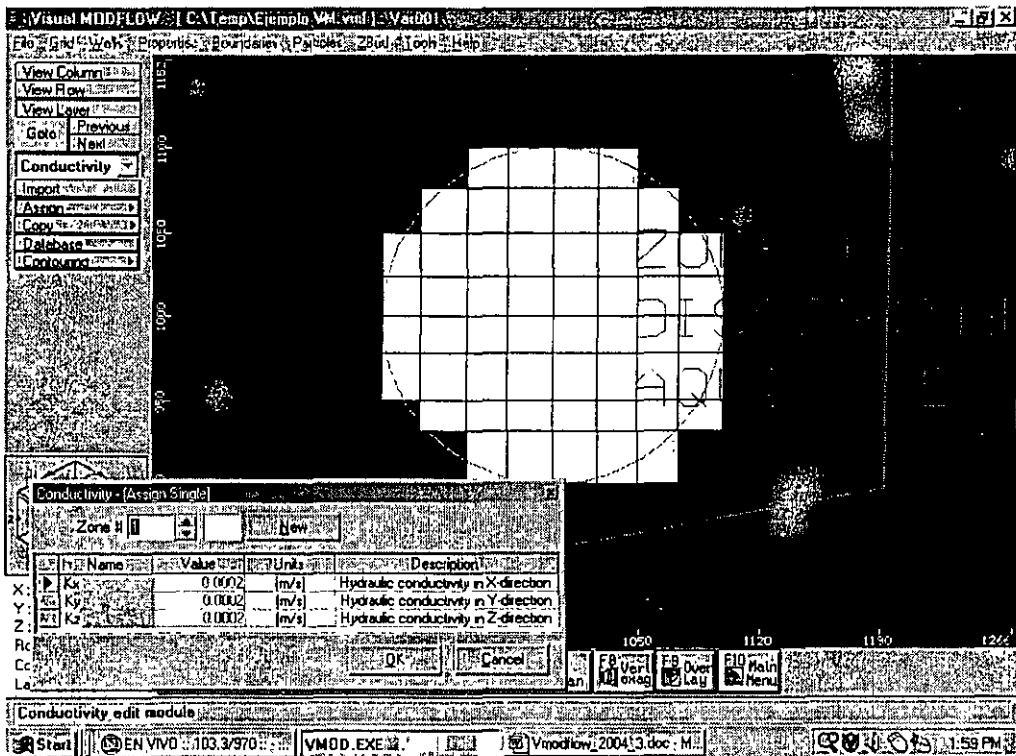


Figura 11. Asignando las propiedades de la discontinuidad del acuitardo.

En *Zone #*, Tecléé 1

☞ En las celdas donde los acuíferos se comunican como se muestra en la figura 11.

☞ OK

☞ Copy (del menú izquierdo) ☞ Layer

Aparecerá una ventana (Figura 12), en la porción superior seleccionar *Zone #1*

☞ Layer 4 (en la porción inferior)

☞ OK

☞ Zoom out

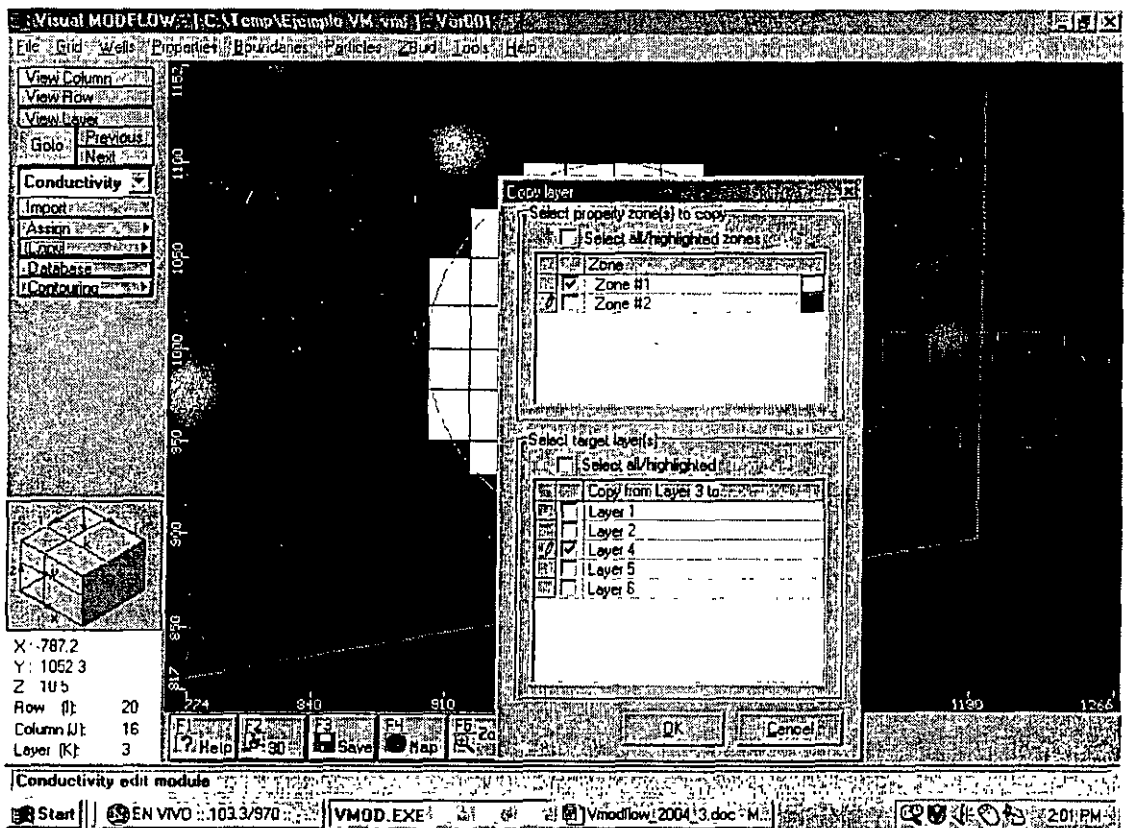


Figura 12. Copiando las propiedades de la discontinuidad del acuitardo.

☞ *View Column* (del menú izquierdo)

☞ en una columna que pase por la zona de la discontinuidad del acuitardo.

Las seccion deberá aparecer como en la figura 13.

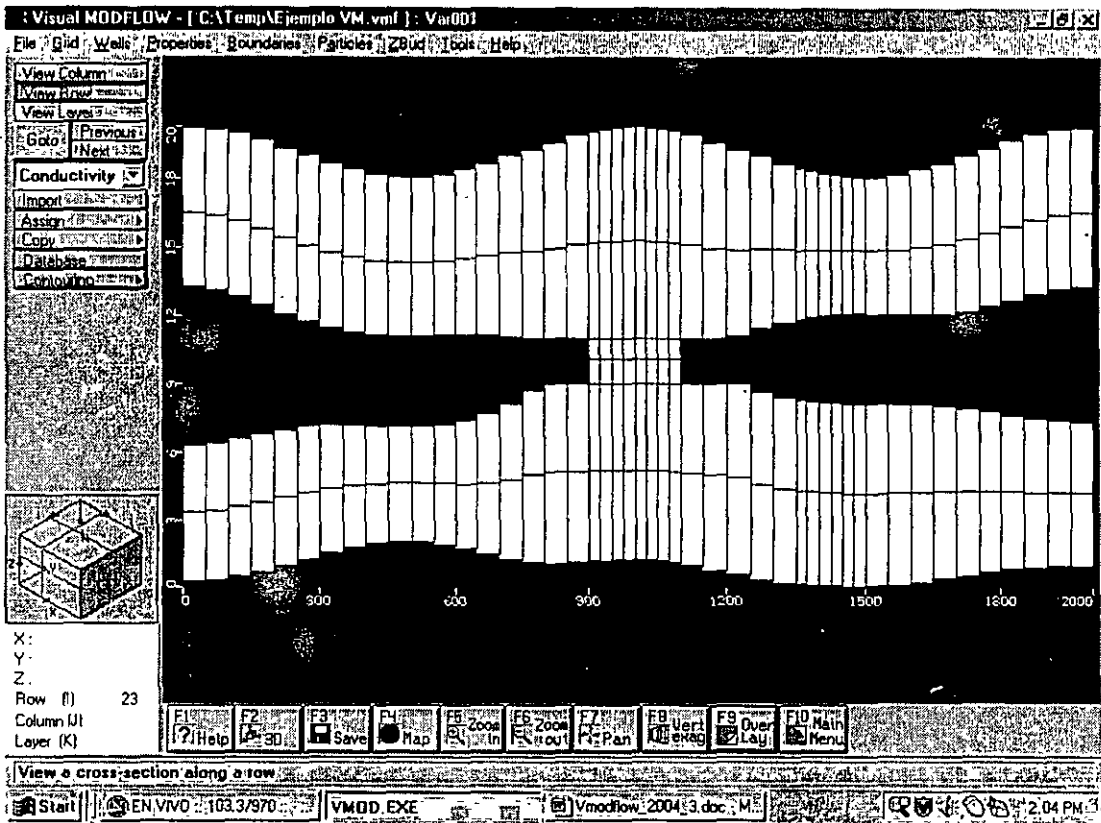


Figura 13. Distribución de las conductividades hidráulicas

7. DELIMITACION DE LAS FRONTERAS DE FLUJO

Boundaries

Constant head

Aparecerá una ventana preguntando si se desea salvar la información.

Yes

Assign (del menú izquierdo) line

Mover el mouse a la celda de la esquina superior izquierda y en el centro de la celda.

Después mover el mouse a la esquina superior derecha y (utilizar botón derecho) en el centro de la celda. Una línea horizontal de celdas cambiará a color rosa y aparecerá una

ventana para asignar los valores de carga constante (figura 14). Asignar los siguientes valores:

Stop time: 3650 ↵

Start time head: 19 ↵

Stop time head: 19 ↵

↵ OK

La línea rosa cambiará a color rojo indicando que la carga constante ha sido asignada.

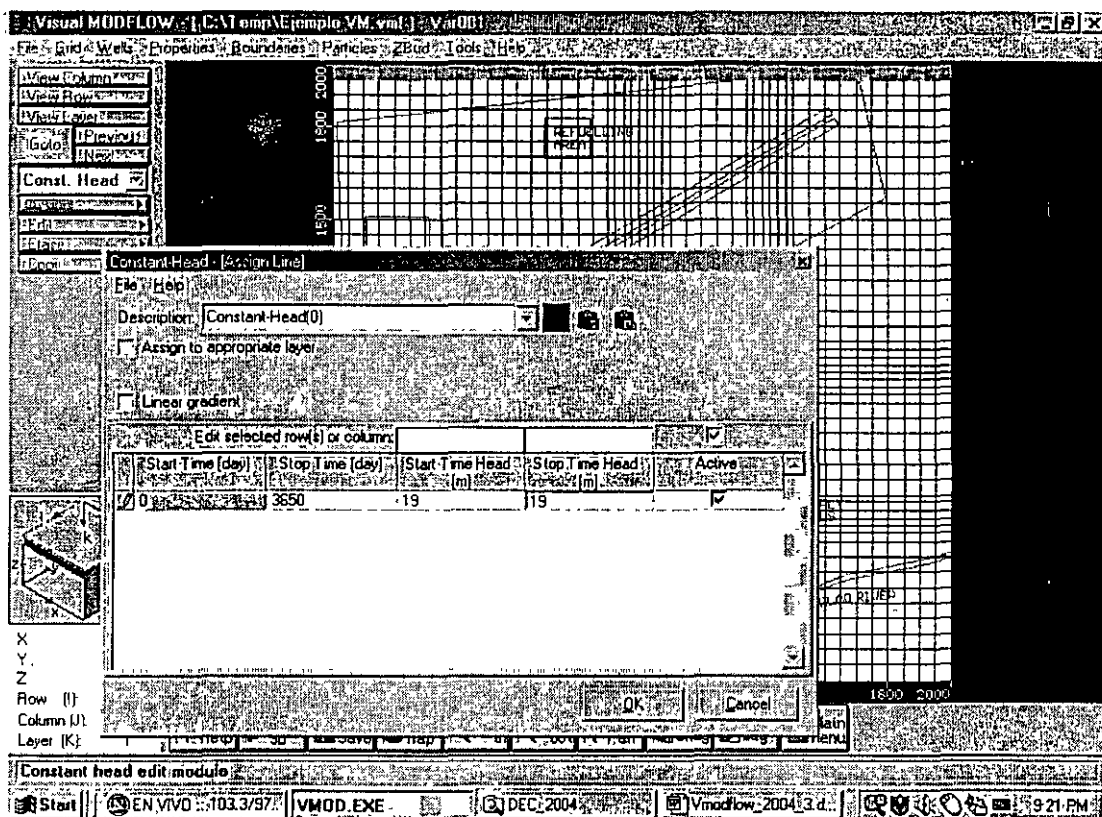


Figura 14. Menú para la asignación de la carga constante

↵ Copy (del menú izquierdo) ↵ Layer

Aparecerá la ventana para copiar propiedades.

↵ Constant head

↵ Layer 2

↵ OK

Esto copiará estas condiciones de frontera a la capa 2.

Ahora asignaremos los valores de carga constante del acuífero inferior.

☞ Goto (del menú izquierdo)

Escoger:

5 ☞

☞ OK

☞ Assign (del menú izquierdo) ☞ Line

Mover el mouse a la celda de la esquina superior izquierda y ☞ en el centro de la celda.

Después mover el mouse a la esquina **superior** derecha y ☞ (**utilizar botón derecho**) en el centro de la celda. Una línea horizontal de celdas cambiará a color rosa y aparecerá una ventana para asignar los valores de carga constante. Asignar los siguientes valores:

Stop time: 3650 ☞

Start time head:18 ☞

Stop time head:18 ☞

☞ OK

La línea rosa cambiará a color rojo indicando que la carga constante ha sido asignada.

☞ Copy (del menú izquierdo) ☞ Layer

Aparecerá la ventana para copiar propiedades.

☞ *Constant head.*

☞ Layer 6

☞ O.K.

☞ Assign (del menú izquierdo) ☞ Line

Mover el mouse a la celda de la esquina **inferior** izquierda y ☞ en el centro de la celda.

Después mover el mouse a la esquina **inferior** derecha y ☞ (**utilizar botón derecho** ☞) en el centro de la celda. Una línea horizontal de celdas cambiará a color rosa y aparecerá una ventana para asignar los valores de carga constante. Asignar los siguientes valores:

Stop time: 3650 ☞

Start time head:16.5 ☞

Stop time head:16.5 ☞

☞ OK

La línea rosa cambiará a color rojo indicando que la carga constante ha sido asignada.

☞ Copy (del menú izquierdo) ☞ Layer

Aparecerá la ventana para copiar propiedades.

☞ *Constant head(2).*

☞ Layer 6

☞ OK

Después de asignar los valores de carga constante:

☞ View column

☞ en cualquier columna para ver una sección del modelo (figura 15).

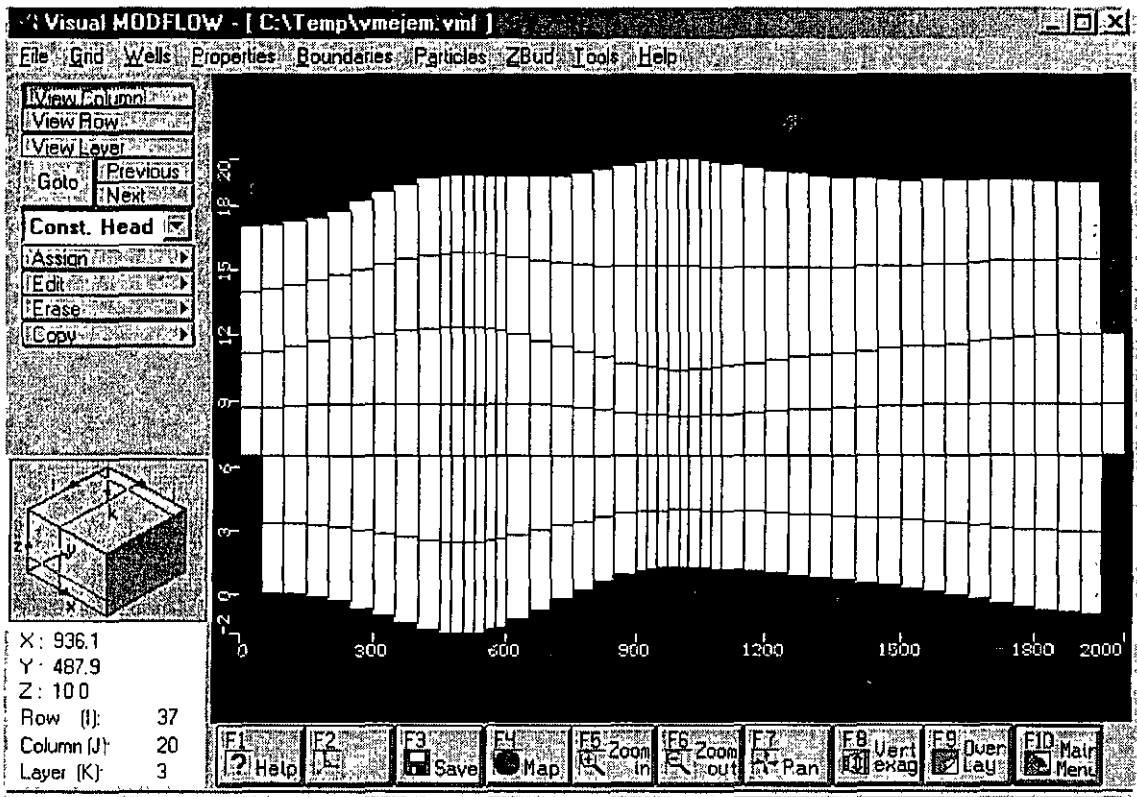


Figure 15. Fronteras de carga constante

Ahora asignaremos la frontera del río al sur de la zona.

☞ View layer

☞ en la capa superior del modelo (capa 1)

☞ Boundaries

☞ Rivers

☞ Assign (del menú izquierdo) ☞ Line

Utilizando el plano base como guía se hay que digitalizar el río mediante ☞ comenzando desde el margen inferior izquierdo y tratando de seguir su contorno. Cuando se ha llegado al final (al margen inferior derecho) hay que ☞ (utilizar botón derecho ☞). Aparecerá una ventana para pedir la información del río (figura 16).

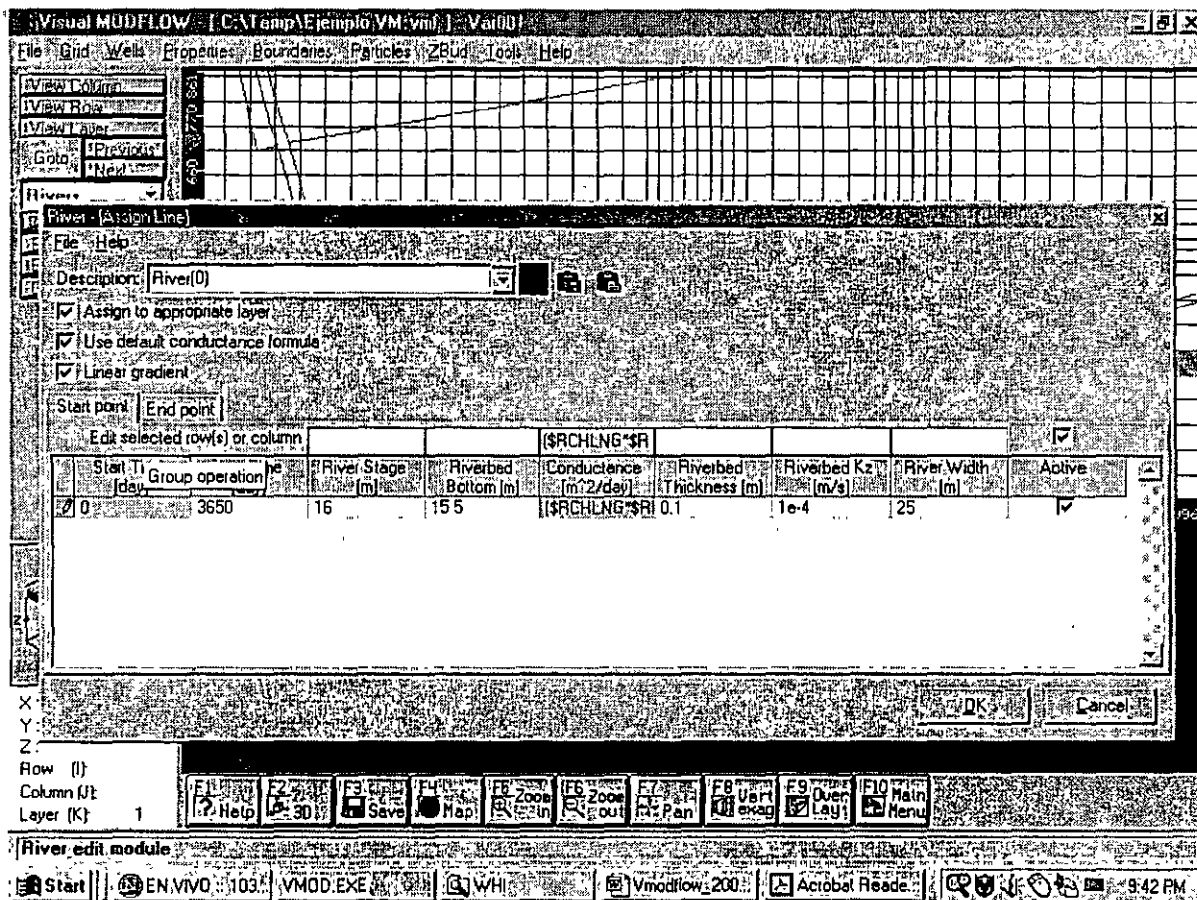


Figura 16. Ventana de información del río.

☞ Linear gradient

En la pestaña de *Start Point*, asignar los siguientes valores:

- Stop time (day): 3650 ☞
- River Stage Elevation (m): 16.0 ☞
- River Bottom Elevation (m): 15.5 ☞
- Riverbed thickness (m): 0.1 ☞
- Riverbed Kz (m/s): 1e-4 ☞

River Width (m): 25 ↵

En la pestaña de *End Point*, asignar los siguientes valores:

Stop time (day): 3650 ↵

River Stage Elevation (m): 15.5 ↵

River Bottom Elevation (m): 15.0 ↵

Riverbed thickness (m): 0.1 ↵

Riverbed Kz (m/s): 1e-4 ↵

River Width (m): 25 ↵

↵ OK

Después de que el río ha sido definido, una línea azul delimitará su extensión.

8. ASIGNACION DE PARTICULAS

Ahora asignaremos algunas partículas que emanen de la zona de tanques (*refueling area*, en la parte superior del modelo) para delimitar el area de influencia que tienen estos tanques.

Las partículas pueden ser de 2 tipos: *backward*, para delimitar el area de donde las partículas provienen; y *forward*, para delimitar el area hacia donde van las partículas.

NOTA: Esta manera de simular el movimiento de las partículas se realiza tomando en cuenta ÚNICAMENTE el flujo del agua subterránea. El MT3D dentro de Visual Modflow es un paquete de transporte de contaminantes mucho mas completo.

↵ Particles

↵ Yes (Para salvar la información de las fronteras)

↵ Zoom in y ampliar la zona de los tanques (*refueling area*)

↵ Add (del menú izquierdo) ↵ Add circle

↵ En el centro del area de tanques que se encuentra en la porción centro-superior de la zona. Expandir el círculo que se forma hasta que cubra el recuadro del area de tanques y ↵.

Aparecerá una ventana (figura 17) seleccionar:

↵ Forward

↵ OK

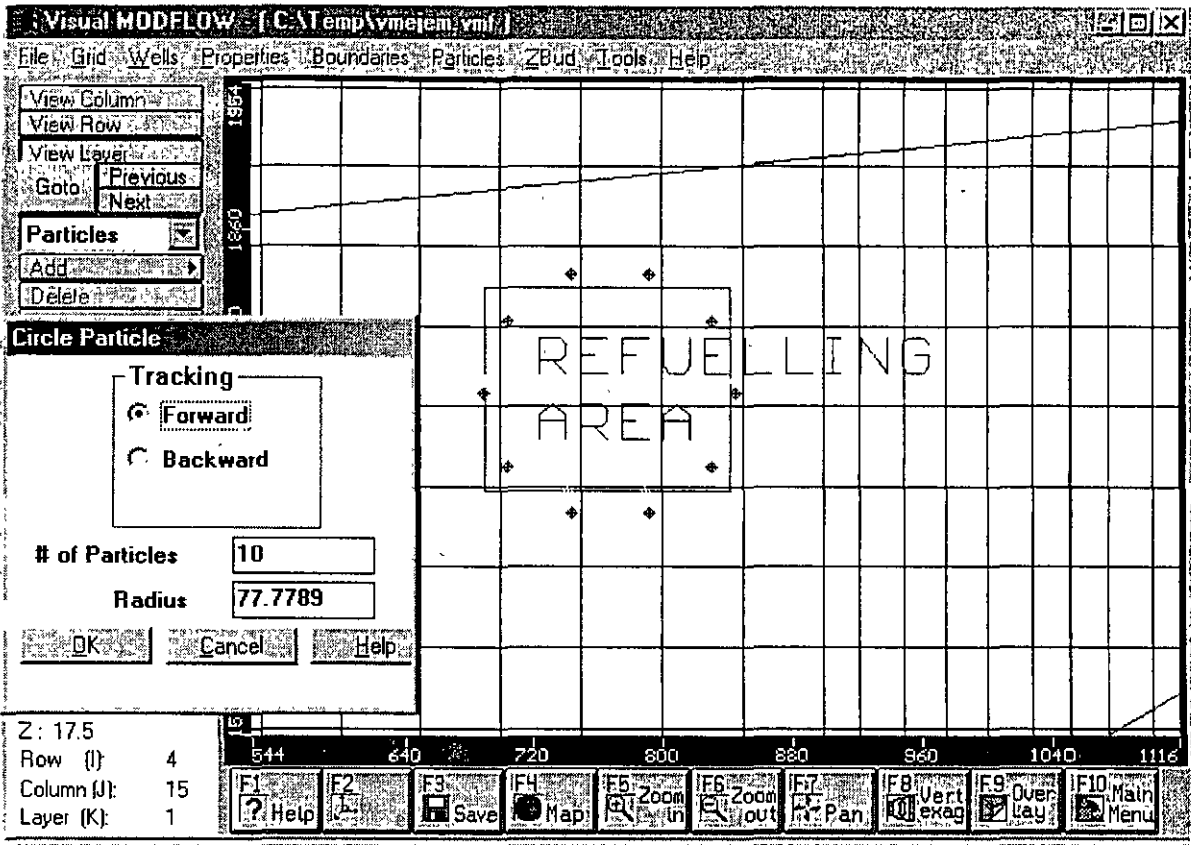


Figura 17. Agregando partículas

9. AGREGAR POZOS

Del menú superior, Wells

Pumping wells


Yes (Para salvar la información de las partículas)

Zoom out

Zoom in

cerca de los pozos de abastecimiento de agua (*supply wells*) y hacer una ventana que los abarque volviendo a para conseguir un acercamiento de la zona.

Del menú izquierdo, Add well

Mover el cursor al centro del pozo izquierdo y  en él. Aparecerá una ventana con la información del pozo (figura 18).

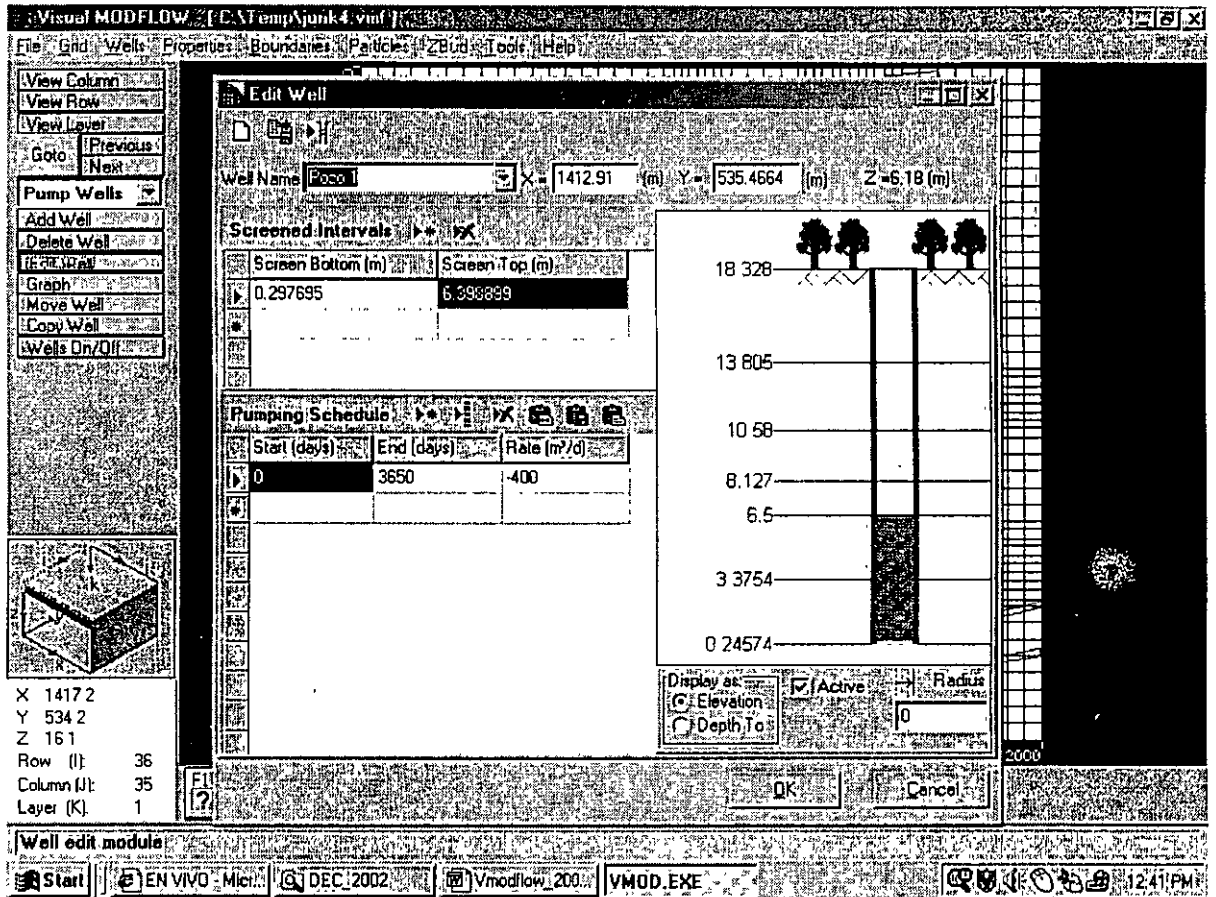




Figura 18. Información del pozo

Agregar la siguiente información:

Well Name: **POZO 1**

 debajo de *Screen top*

Estos pozos deberán estar ranurados solo en el acuífero inferior, que son los últimos 6 metros del modelo aproximadamente.  dentro del pozo a una elevación aproximada de 6 metros, y hay que mover la barra azul sin depresionar el mouse hasta la base del pozo, y depresionar en ese lugar. Los últimos 5 metros del pozo deben de haber cambiado a un color azul representando el intervalo ranurado.

Agregar la siguiente información de bombeo:

End: **3650**

Rate: **-400**

NOTA: El bombeo del pozo debe de ser de **negativo**. Si el pozo es de inyección el signo debe ser **positivo**.

☞ OK

☞ Copy well (del menú izquierdo)

Mover el cursor hasta que esté posicionado sobre el pozo izquierdo y ☞, después mover el cursor al pozo de la derecha y ☞ en él para copiar el pozo.

☞ Edit well (del menú izquierdo)

☞ En el pozo de la derecha

Cuando aparezca el menú cambiar el nombre del pozo por **POZO 2** y cambiar el caudal a $550 \text{ m}^3/\text{d}$ (*recuerde agregar el signo menos*)

☞ en OK

☞ Zoom out (F6) (Del menú inferior)

☞ Main Menu (F10) (Del menú inferior)

☞ Yes (para salvar la información de los pozos)

10. CORRER MODFLOW

☞ Run

☞ OK (para aceptar el estado estacionario, *steady state*)

☞ Del menú superior, ☞ Run

Aparece una ventana para definir que es lo que se va a correr (figura 19).

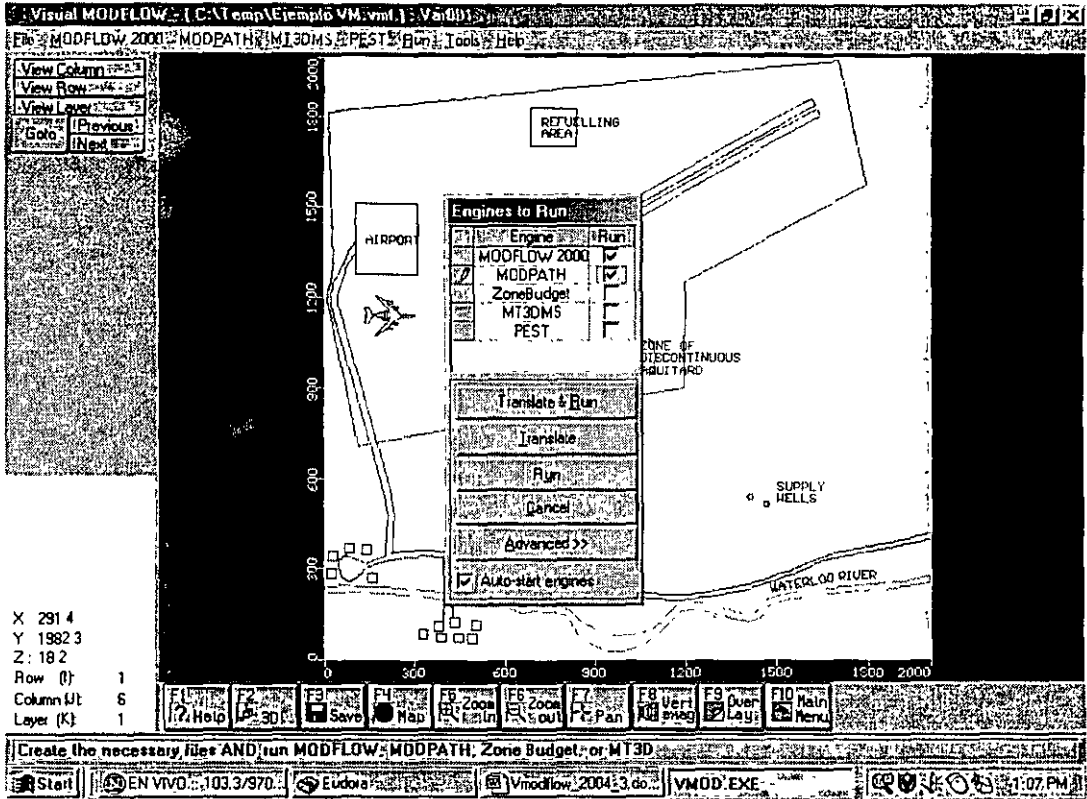


Figura 19. Corriendo el Visual Modflow

☒ en el recuadro de *Modflow 2000*

☒ en el recuadro de *Modpath*

☒ Translate & Run

El modelo comenzará a correr, al termino ☒ close

11. VISUALIZACION DE LOS RESULTADOS

☒ Output

Esto nos permite ver los niveles piezométricos calculados para el acuífero superior (figura 20).

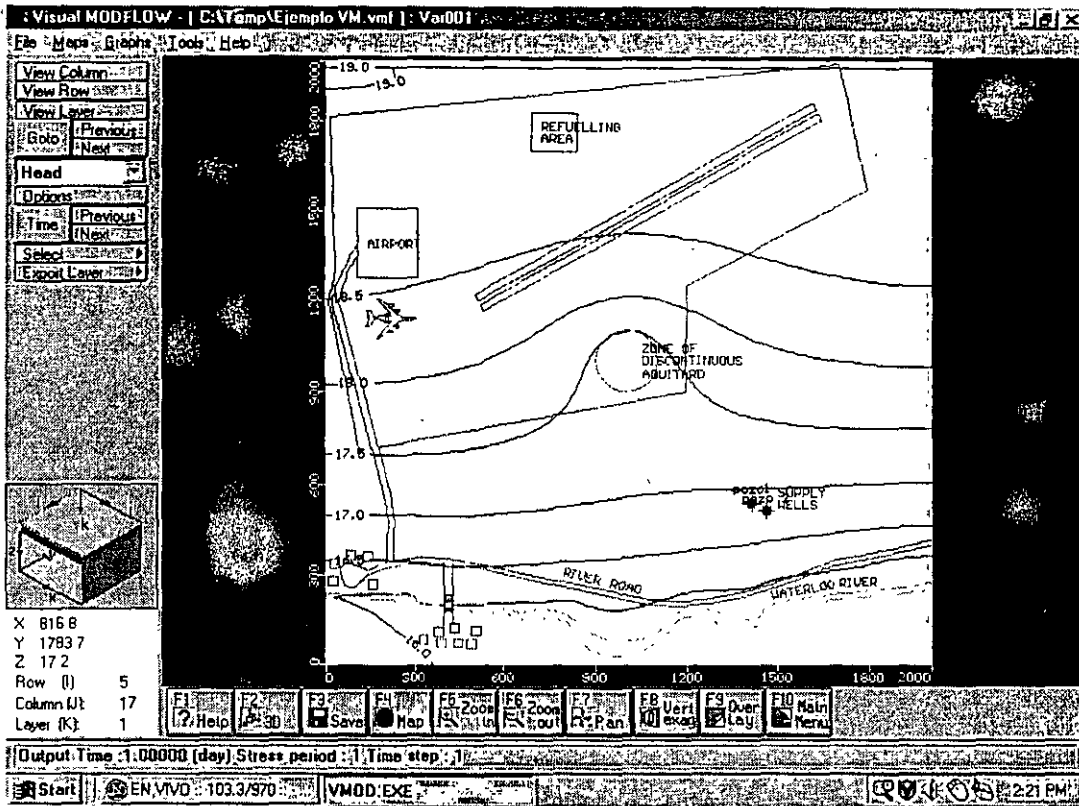


Figura 20. Niveles piezométricos en el acuífero superior

☞ en *Next* o *Previous* (a la derecha del Goto) nos permite ver las configuraciones de las otras capas.

☞ Maps (del menú superior), ☞ Pathlines

Esto nos permite ver el movimiento de las partículas (figura 21).

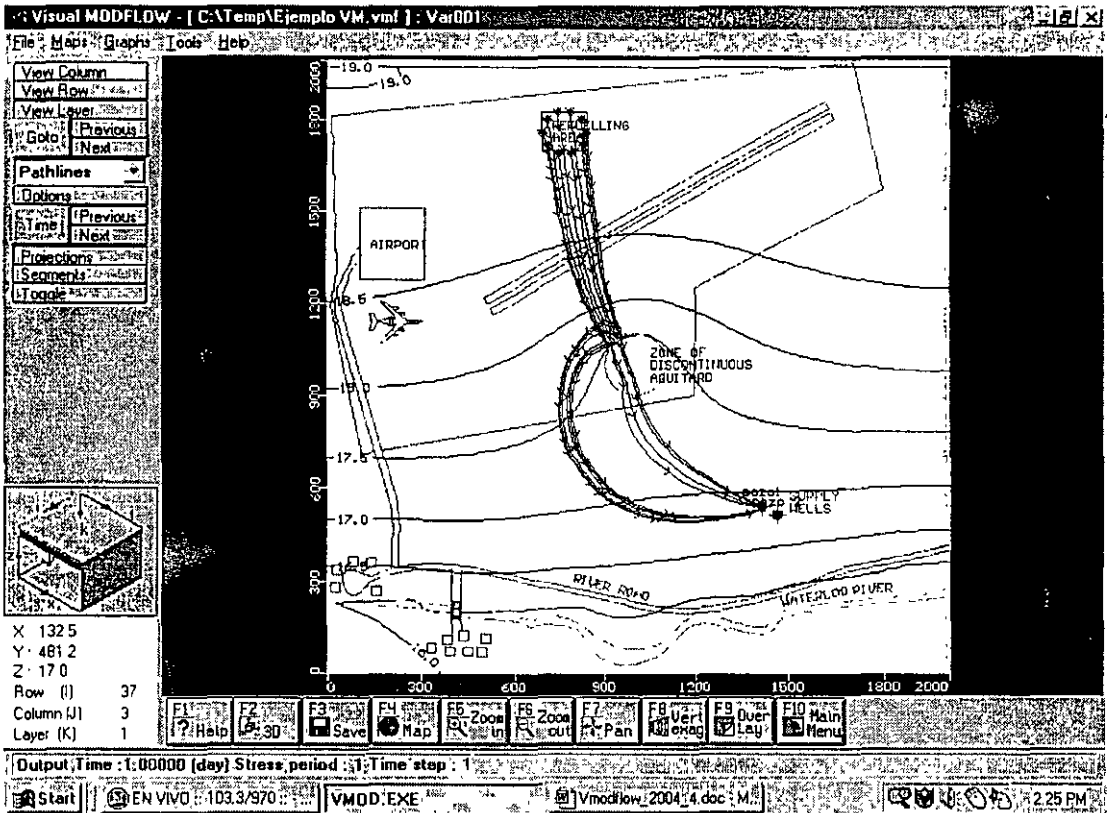


Figura 21. Movimiento de las partículas

☞ View column

Mover el cursor hacia alguna columna cerca de la zona discontinua del acuitardo y ☞. Esto nos dará una visión de la sección del modelo (figura 22).

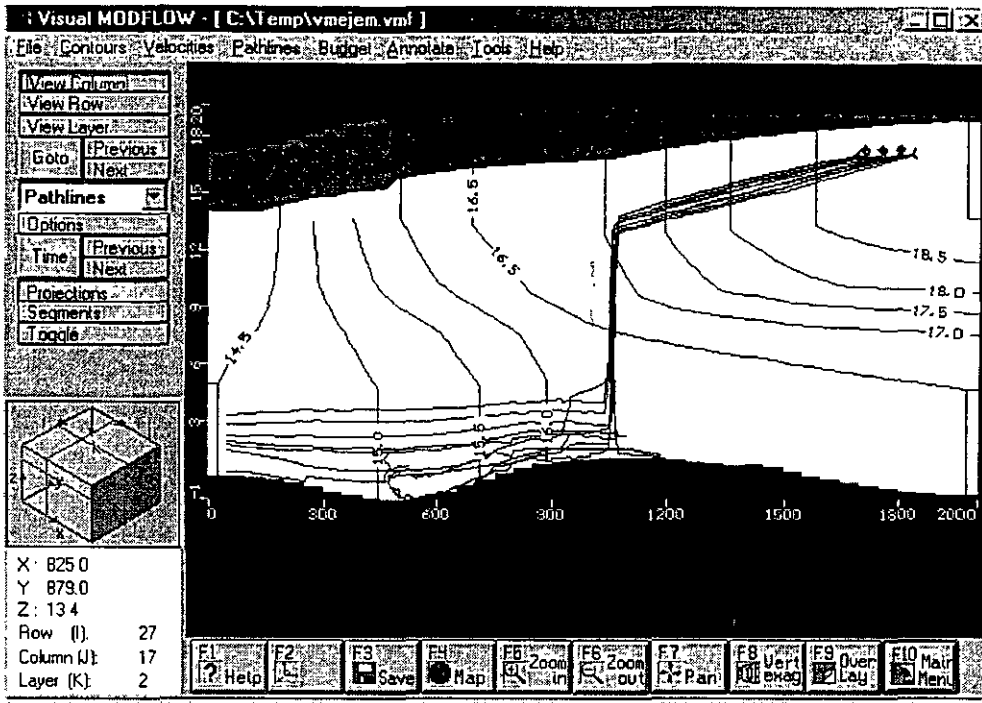


Figura 22. Movimiento de las partículas en sección

Estos resultados muestran que la contaminación del acuífero superior puede llegar a los pozos de abastecimiento que bombean del acuífero inferior por medio de la discontinuidad del acuitardo.

A manera de ejercicio y para determinar la predicción que se hubiera hecho de no haberse tomado en cuenta la discontinuidad del acuitardo, cambie las conductividades hidráulicas para simular un acuitardo continuo y vuelva a simular el movimiento de las partículas.

Las figura 23 muestra el resultado si la conductividad hidráulica que simula la perforación abandonada no hubiera sido tomada en cuenta. Este resultado predeciría que la mayor parte de la contaminación permanecería en el acuífero superior sin infiltrarse por la discontinuidad del acuitardo, produciendo una visión errónea del problema

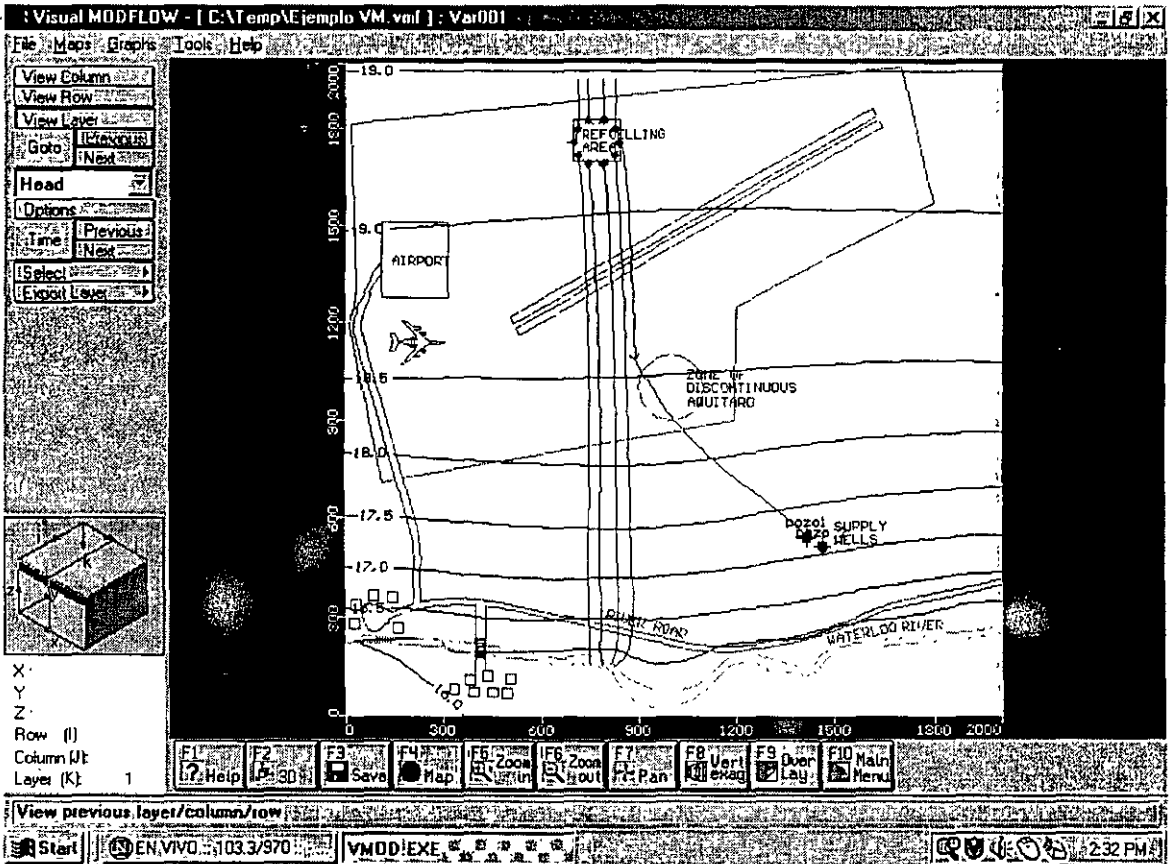


Figura 23. Resultados del acuífero superior al tener un acuitardo continuo

¿Por qué se ve que una partícula alcanza los pozos aún con el acuitardo continuo? ¿Cuál es la interpretación?

12. Ejercicio Avanzado de Visual Modflow- Calibración

Del ejercicio anterior elimine la frontera de río, y permita un acuitardo continuo

Ahora calibre el modelo para obtener la configuración piezometrica en la primera capa, que aparece en la figura 24 (seguir utilizando el estado estacionario).

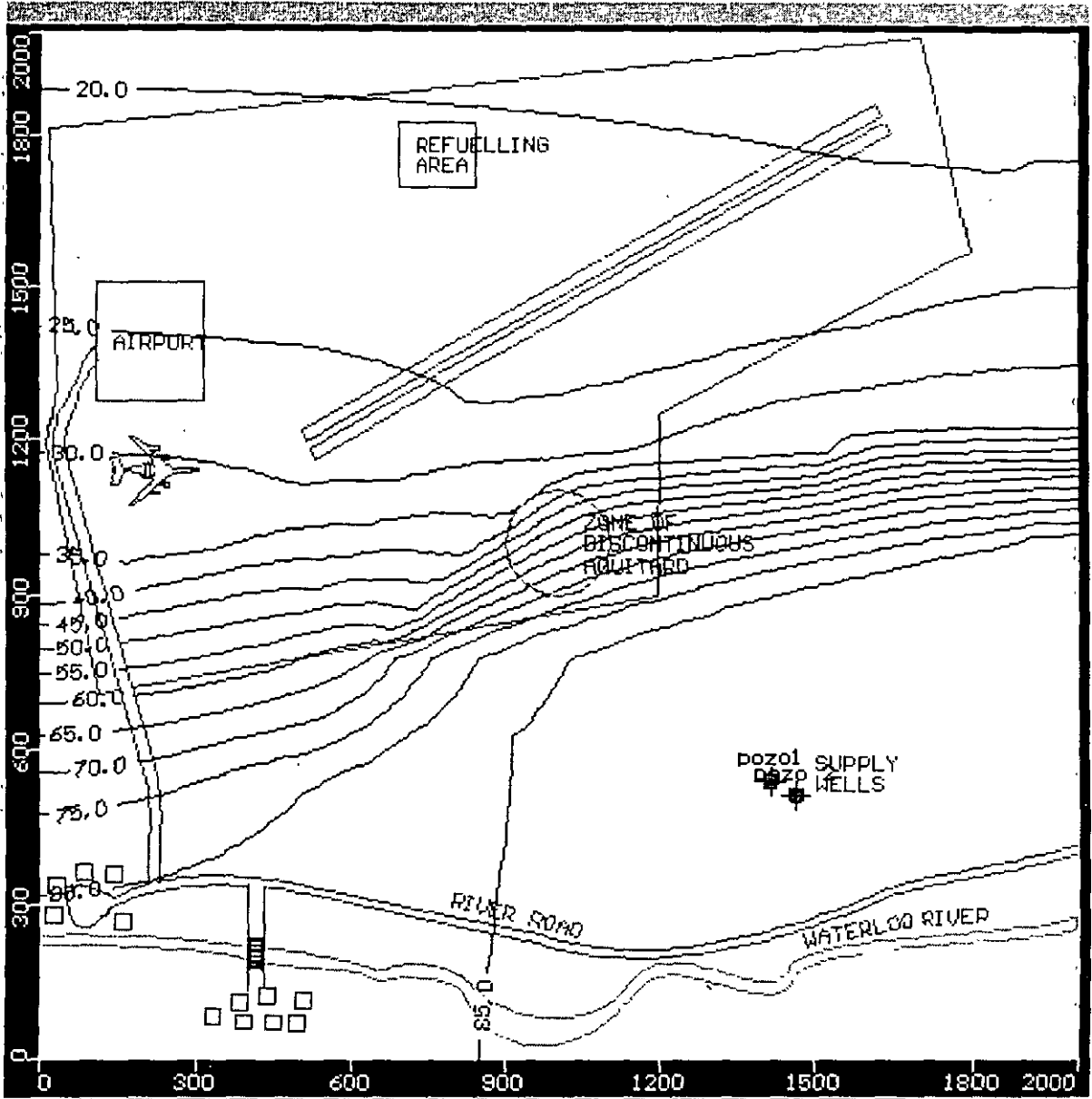


Figura 24. Resultados del ejercicio de calibración

13. Ejercicio Avanzado de Visual Modflow- Partículas

Calcular cuanto tiempo tardaran las partículas en llegar a los pozos en los 2 casos.

Solución:

Para empezar hay que correr el modelo en estado transitorio. Los datos que les dimos permiten correrlo únicamente a 10 años. El resultado que da a 10 años es que las partículas apenas se mueven. Hay que cambiar todas las fronteras y pozos para que corran mas años.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
GWW MODELOS EN GEOQUÍMICA Y
PRUEBAS DE BOMBEO

EXPOSITOR: ING. DAVID GONZÁLEZ POSADAS
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

PRUEBAS DE BOMBEO

ING. DAVID GONZÁLEZ POSADAS

1.- GENERALIDADES

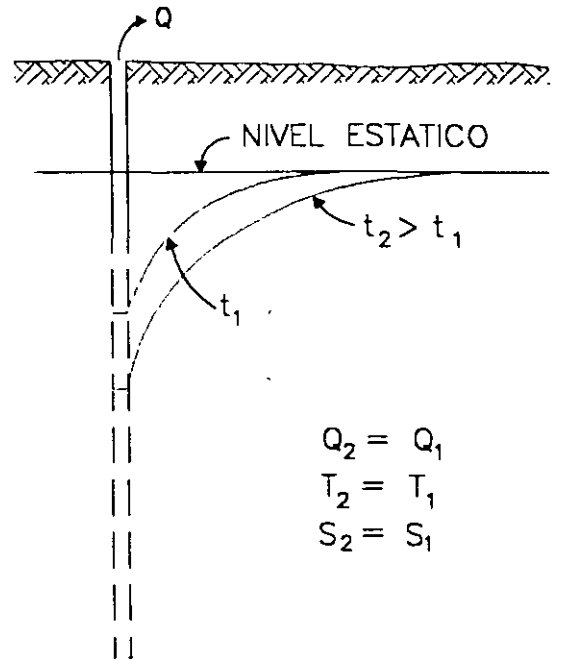
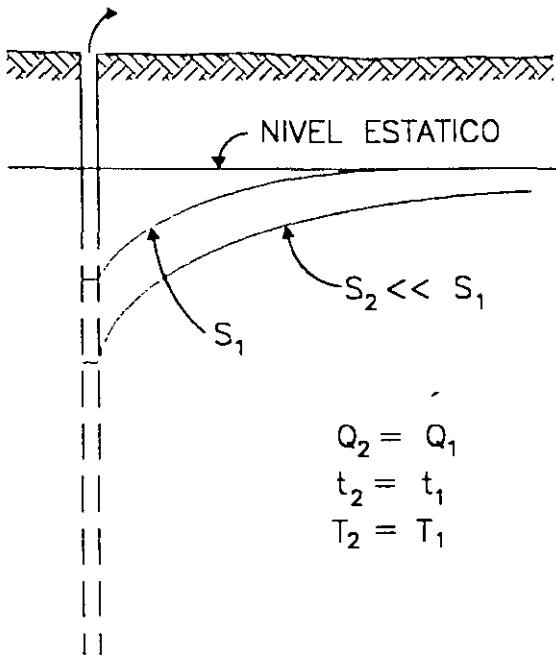
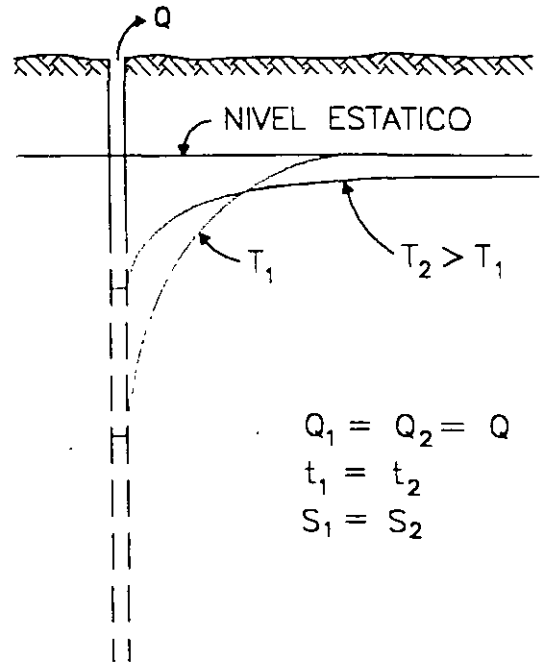
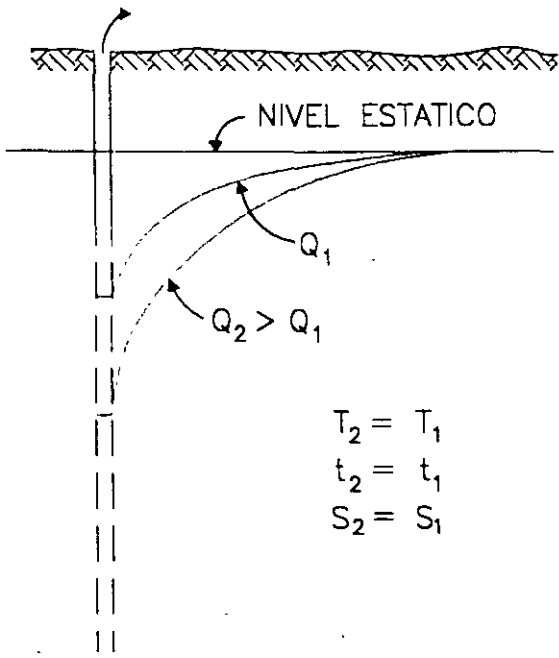
La realización de una prueba de bombeo consiste en observar los efectos de abatimiento o recuperación de los niveles piezométricos en un acuífero. Los niveles son obtenidos a través de captaciones hidráulicas del tipo de pozos o norias y pueden ser observados en el propio pozo de bombeo (pozo de operación) o en pozos próximos a él (pozo de observación).

Al iniciarse el bombeo en un pozo, el nivel del agua sufre un abatimiento el cual es mayor en el propio pozo y decrece conforme aumenta la distancia. La fuerza que induce que el agua se mueva hacia el pozo, es el gradiente que se genera entre las cargas hidráulicas del propio pozo y las próximas a él.

El agua fluye a través del acuífero desde cualquier dirección, aumentando su velocidad conforme se acerca al pozo; expresado de acuerdo a la ley de Darcy nos dice que, en un medio poroso el gradiente hidráulico es directamente proporcional a la velocidad, por lo que el abatimiento en la superficie piezométrica forma un cono de depresión, cuyo tamaño y forma dependen del caudal, tiempo de bombeo, características del acuífero, La influencia de algunos de estos factores en la forma de la depresión piezométrica se muestra en la figura 1.

2.- OBJETIVOS

El objetivo principal de las pruebas de bombeo es estimar las características hidrodinámicas de la formación acuífera como son transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento. También se llega a definir a través de la interpretación de pruebas de bombeo, el tipo de acuífero, la existencia de barreras laterales, recarga de ríos o manantiales, radio de influencia del pozo, factor de infiltración y predicción del comportamiento de los niveles piezométricos.



INFLUENCIA DEL CAUDAL (Q), TIEMPO DE BOMBEO (t), TRANSMISIBILIDAD (T) Y ALMACENAMIENTO (S), EN EL CONO DE DEPRESION.

FIGURA 1

3.- EQUIPO NECESARIO

- a) Sonda eléctrica (dos en caso de que se cuente con pozo de observación).
- b) Cronómetro.
- c) Regla de aforo (si el pozo tiene descarga libre y no cuenta con medidor de flujo) ver figura 2.
- d) Flexómetro.

4.- SELECCIÓN DEL SITIO DE LA PRUEBA

En ocasiones, el sitio de la prueba está obligado, por ejemplo, cuando se trata de un problema de carácter local o interesa conocer las características hidráulicas del acuífero en un sitio específico.

En estudios geohidrológicos de carácter regional para elegir el sitio de la prueba, generalmente se realizan en pozos existentes pero considerando los aspectos siguientes.

- Que el equipo de bombeo se encuentre en condiciones apropiadas para sostener un caudal constante durante la prueba.
- Que la profundidad de nivel del agua sea fácilmente medible.
- Que el agua bombeada no se infiltre hasta el acuífero en las proximidades del pozo.
- Que las características constructivas y el corte geológico del pozo sean conocidos.
- El pozo es totalmente penetrante.
- Que los pozos próximos no operen durante la prueba.

Puesto que no es fácil que se cumplan simultáneamente todos estos requisitos, en cada caso deberá juzgarse con cierto criterio, si el incumplimiento de uno o varios de ellos obstaculiza significativamente o no, el buen desarrollo y la interpretación de la prueba.

5.- POZOS DE OBSERVACIÓN

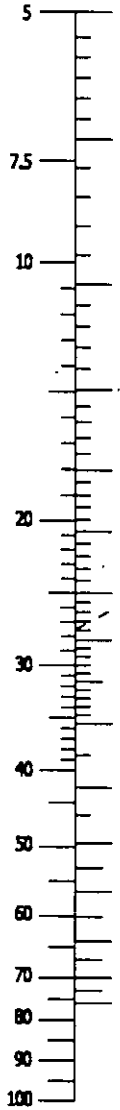
Para la interpretación completa de una prueba, lo ideal es contar con uno o varios pozos de observación dispuestos a diferentes distancias del pozo de bombeo. Cuando esto es posible las características deducidas son más confiables y representativas de un área mayor. Por ello, es muy recomendable disponer al menos de un pozo de observación.

NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL GASTO A TRAVES DE UN TUBO

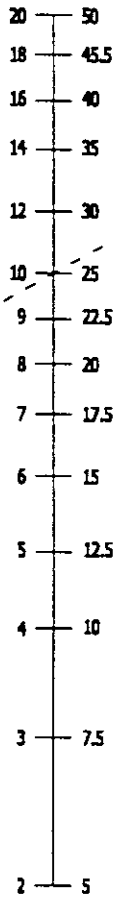
$$Q = 0.0174 \frac{AD^2}{\sqrt{H}}$$

D, H, A, EN CM
Q EN LT

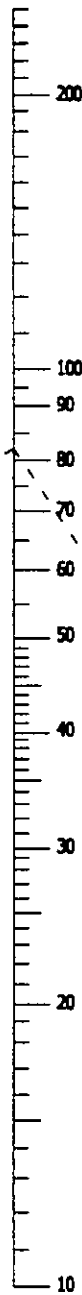
"A" EN CM CUANDO "H" ES IGUAL A 15 CM



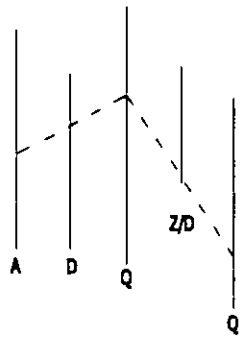
"D" DIÁMETRO INTERIOR DEL TUBO EN PULGADAS



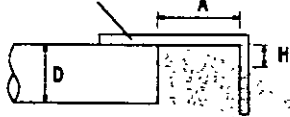
"Q" GASTO EN LA DESCARGA EN LT/SEG



SOLUCIÓN

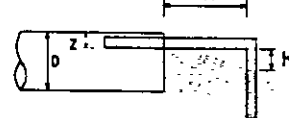


ESCUADRA DE CARPINTERO
O REGLA PLEGADIZA



EjemPlo 1
TUBO LLENO
EL DIÁMETRO DEL TUBO 25 CM (10")
"A" = 27.5 cm
"H" = 15 cm
"Q" = 81 LTS/SEG

ESCUADRA DE CARPINTERO
O REGLA PLEGADIZA



EjemPlo 2
TUBO PARCIALMENTE LLENO
EL DIÁMETRO DEL TUBO 25 CM (10")
"A" = 27.5 cm
"H" = 15 cm
"Z" = 5 cm
Z/D = (FALTANTE/DIÁMETRO) = (5/25) = 0.20

"Q" GASTO AJUSTADO PARA TUBOS PARCIALMENTE LLENOS LT/SEG



En la práctica es común que por razones presupuestales no se cuente con pozos de observación, por lo que la prueba se limita a interpretar las mediciones observadas en el propio pozo de bombeo. Los niveles dinámicos observados en dicho pozo pueden presentar cierta inconsistencia de acuerdo al comportamiento esperado, esto es debido a características constructivas del propio pozo, por lo anterior los resultados obtenidos de pruebas interpretadas en el pozo de operación, deberán tomarse con su debida reserva.

6.- EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

Habiendo revisado el correcto funcionamiento del equipo de medición se inicia midiendo el nivel estático en el pozo de bombeo y en los pozos de observación. Se anotará la hora de inicio y datos distintivos de cada pozo.

Se iniciará el bombeo, procurando mantener un caudal constante, y se procederá a medir la profundidad al nivel del agua en el pozo de bombeo y en el (o los) de observación, con la secuencia de tiempos que se indica a continuación.

LECTURA	TIEMPO A PARTIR DE LA INICIACIÓN DEL BOMBEO	
	T I E M P O	
1	0	TIEMPO A PARTIR DE LA INICIACIÓN DEL BOMBEO
2	15	SEGUNDOS
3	30	SEGUNDOS
4	1	MINUTO
5	2	MINUTOS
6	4	MINUTOS
7	8	MINUTOS
8	15	MINUTOS
9	30	MINUTOS
10	1	HORA
11	2	HORAS
12	4	HORAS
13	8	HORAS
14	16	HORAS
15	24	HORAS
16	32	HORAS
17	40	HORAS
18	48	HORAS
		CADA 8 HASTA 72 HORAS

A intervalos de tiempo seleccionados, se harán las observaciones o lecturas necesarias para cuantificar el caudal de bombeo.

Con las observaciones realizadas, se construirá en el sitio de la prueba, la gráfica de variación del nivel dinámico en el tiempo, para el pozo de bombeo y para cada uno de los pozos de observación. En la graficación podrá utilizarse papel semilogarítmico o logarítmico (los tiempos se llevarán en la escala logarítmica). Estas gráficas son útiles para juzgar el correcto desarrollo de la prueba: permiten detectar errores de medición, variaciones sensibles del caudal y otras anomalías causadas por factores externos, y constituyen un elemento de juicio para continuar o suspender una prueba.

Cuando en la gráfica nivel dinámico-tiempo del pozo bombeado se observe estabilización del nivel dinámico por un tiempo mínimo de 4 horas, podrá suspenderse la etapa de bombeo antes de alcanzar la duración prefijada, (ver figura 3).

Una vez concluida la etapa de bombeo, se incluirá la de recuperación, en la que se efectuarán observaciones con la misma secuencia que la etapa de abatimiento. Estos tiempos son una guía de la frecuencia con que deben realizarse las observaciones. Si, por cualquier causa, no puede hacerse contacto con el nivel dinámico en el tiempo señalado, se hará la medición y se indicará el tiempo real a que corresponde.

7.- ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO

7.1.- REGIMEN ESTABLECIDO

Cuando se bombeo agua mediante un pozo, esta se deriva del almacenamiento del acuífero, y en tanto no exista una recarga vertical, el cono de depresión se va extendiendo más y más, decreciendo la magnitud de los abatimientos a medida que el área afectada es mayor. hasta que la superficie piezométrica se estabiliza en las proximidades del pozo y se llega a una condición de flujo establecido.

Las fórmulas para un pozo descargando bajo condiciones de flujo establecido, se derivaron desde tiempo atrás por varios investigadores, existiendo dos fórmulas básicas; una para acuíferos libres y otra para confinados.

Para un acuífero libre, la fórmula es.

$$H_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_2}{r_1} \text{-----}(1)$$

En la cual: h_1 = Altura piezométrica a la distancia r_1 del pozo de bombeo
 h_2 = Altura piezométrica a la distancia r_2 del pozo de bombeo
 Q = Caudal de bombeo
 K = Permeabilidad
 L = Logaritmo base "e"

Ver figura No. 4.

PROFUNDIDAD AL NIVEL DINAMICO, EN METROS.

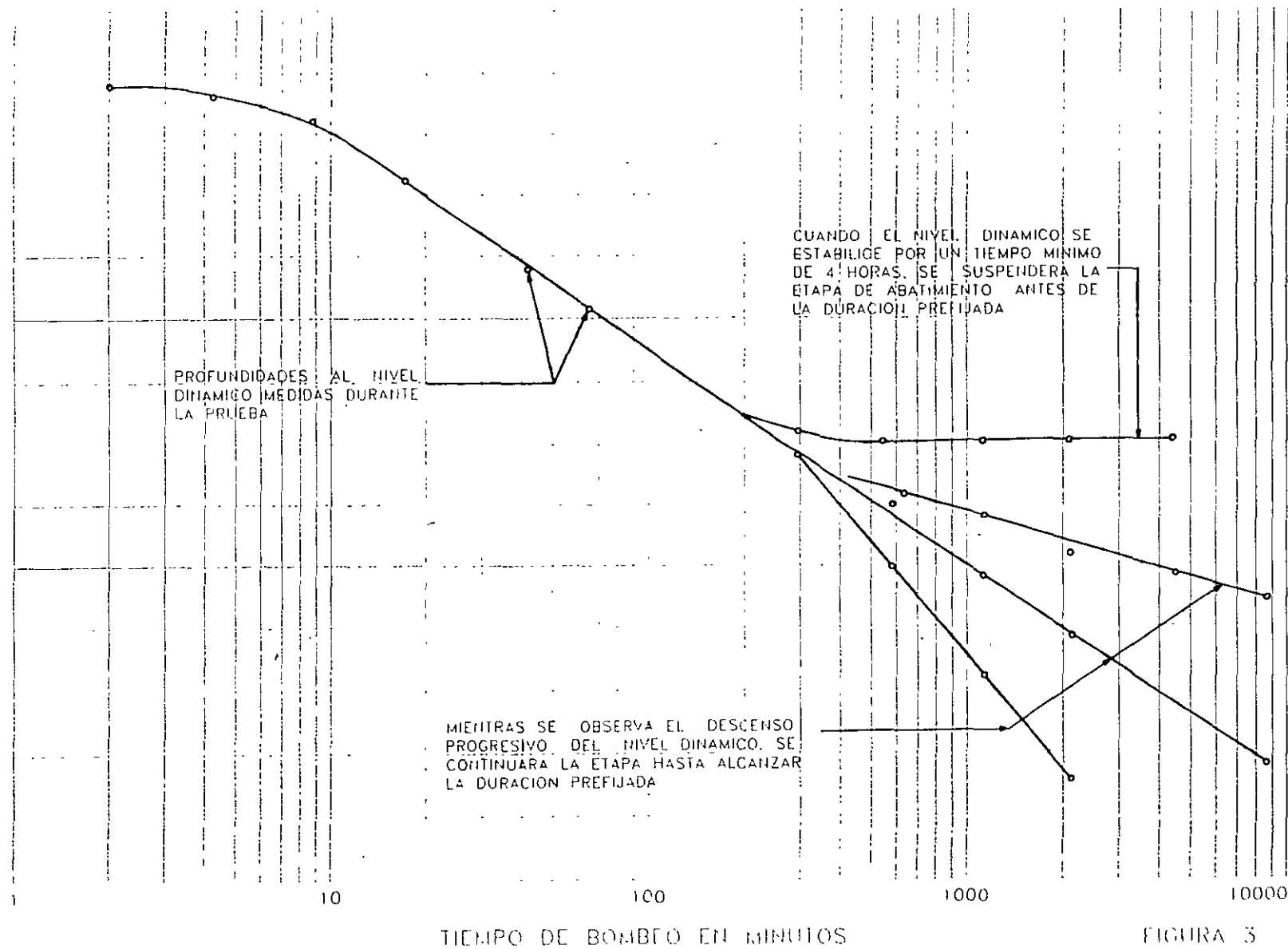
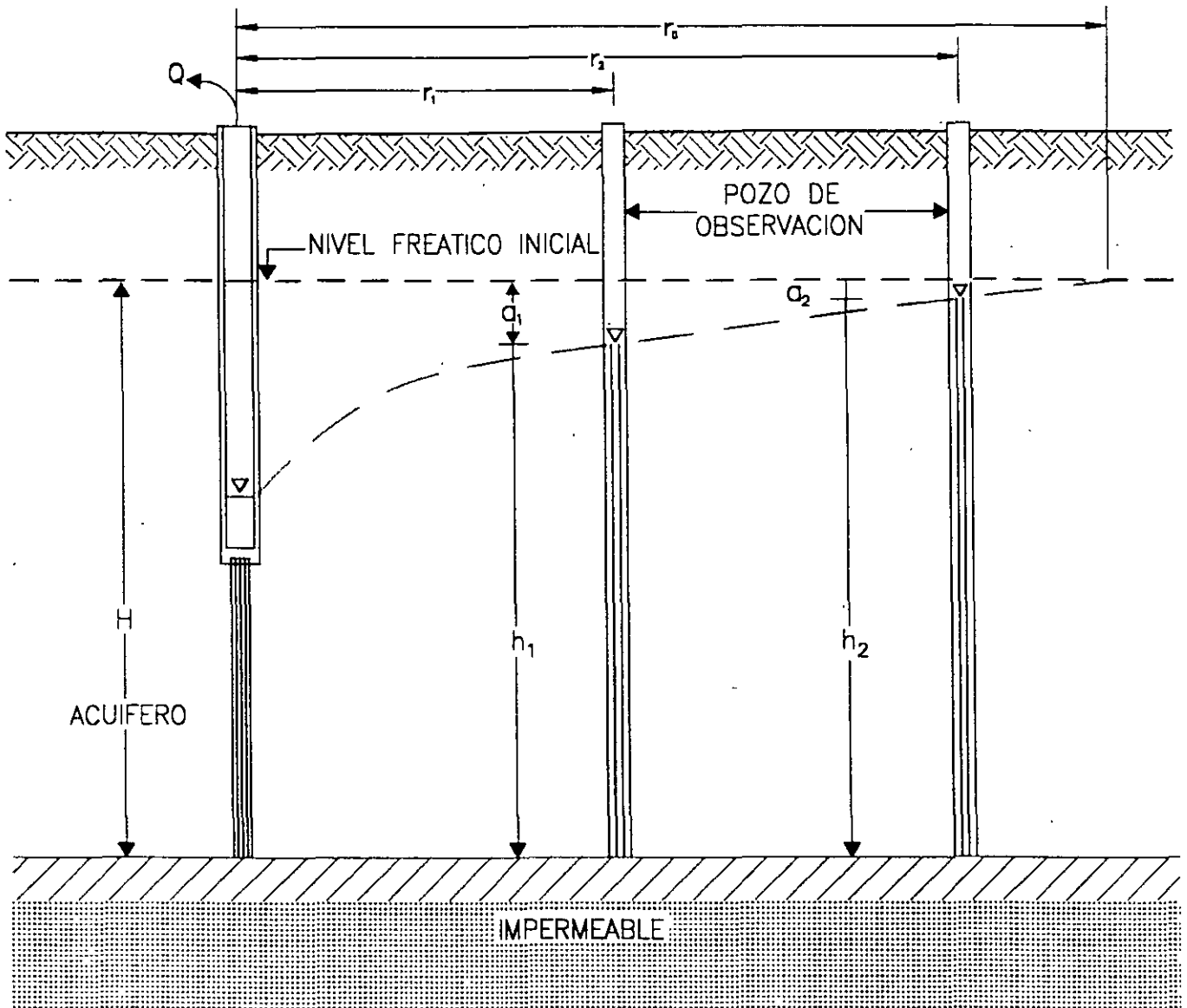


FIGURA 3

REGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO
HACIA POZOS EN UN ACUIFERO LIBRE



$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_2}{r_1}$$

(Fórmula de Dupuit)

La fórmula correspondiente a un acuífero confinado es:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2 \pi K b} L \frac{r_1}{r_2} \text{-----(2)}$$

En la cual $b =$ espesor del acuífero. Y los demás terminos, son los mismos que los de la expresión anterior. Ver figura 5.

La derivación de las fórmulas anteriores, está basada en las siguientes hipótesis simplificadoras:

- a) El acuífero es homogéneo e isótropo en el área afectada por el bombeo
- b) El espesor saturado inicial del acuífero libre, es constante
- c) Para el acuífero confinado, el espesor es constante
- d) El pozo penetra totalmente al acuífero
- e) La superficie piezométrica (o freática) es horizontal antes de iniciarse el bombeo
- f) El abatimiento y el radio de influencia no varían con el tiempo.
- g) El flujo es laminar.

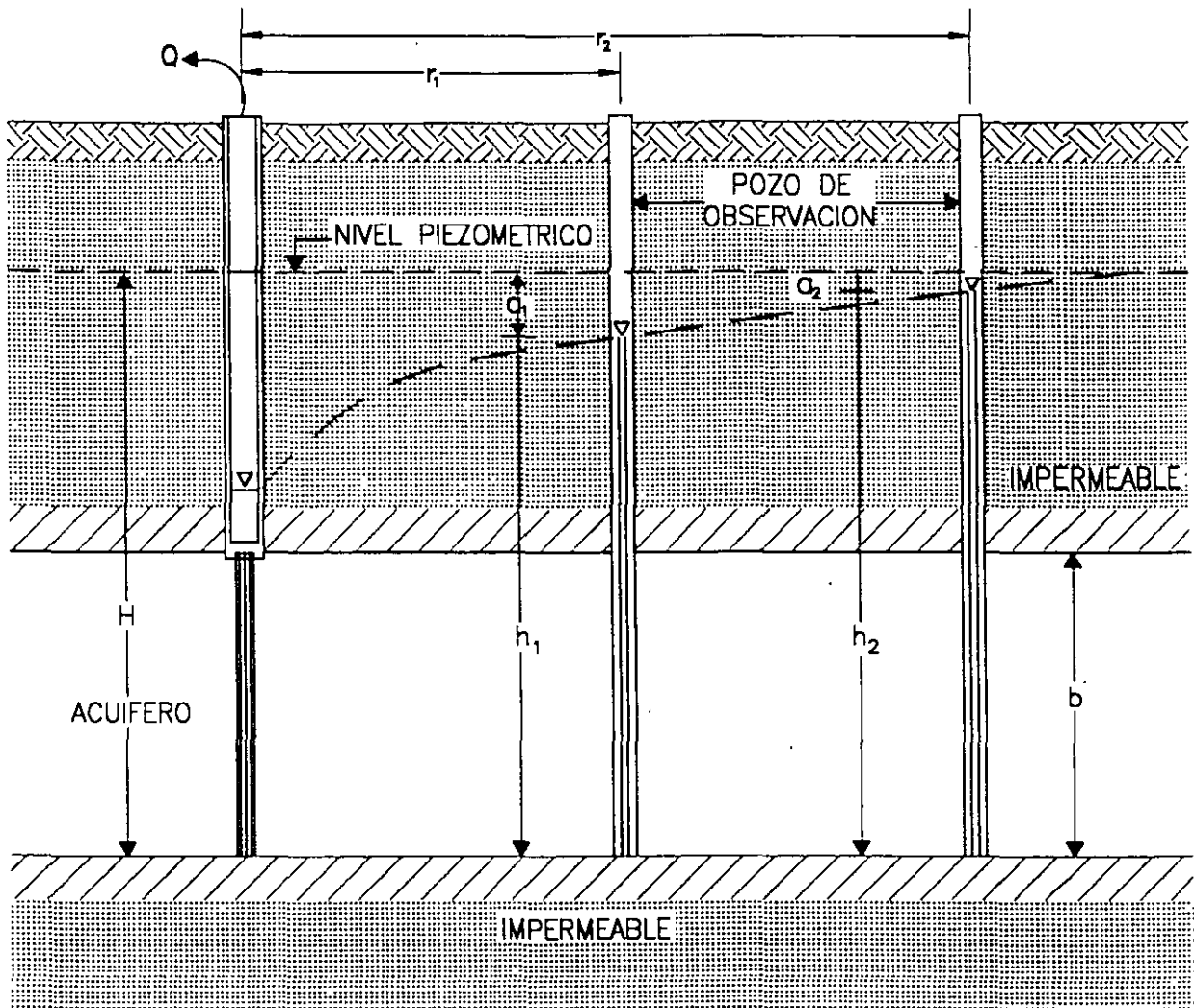
Estas hipótesis parecen limitar seriamente la aplicabilidad de ambas fórmula, pero en realidad no es así, la permeabilidad media del acuífero es más o menos constante; aunque la superficie piezométrica no es completamente horizontal en ningún caso, el gradiente hidráulico es generalmente muy pequeño y no afecta sensiblemente la forma de la superficie piezométrica: el flujo es laminar en la mayor parte del área afectada por bombeo, y solo en la vecindad inmediata del pozo de bombeo puede llegar a ser turbulento; aunque el flujo no es rigurosamente establecido, después de cierto tiempo de bombeo puede considerarse como tal en un área próxima al pozo de bombeo.

Teniendo dos pozos de observación se obtiene la permeabilidad despejando de la s ecuaciones 1 y 2.

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} L \frac{r_2}{r_1} \text{ para acuífero libre}$$

$$K = \frac{Q}{2 \pi b(h_2^2 - h_1^2)} L \frac{r_2}{r_1} \text{ para acuífero confinado}$$

REGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO
HACIA POZOS EN UN ACUIFERO CONFINADO



$$s = h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi K b} L \frac{r_1}{r_2}$$

(Fórmula de Thiem)

FIGURA 5

Por otra parte

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \text{-----(4)}$$

Despejando S

$$S = \frac{4 T t}{r^2} u$$

Donde: r es la distancia al pozo de bombeo; t, tiempo de bombeo; S, coeficiente de almacenamiento, T, transmisibilidad.

Los valores de la función de pozo en relación con los de u, se encuentra en tabla 1, los cuales vaciados en una gráfica de W(u) contra 1/u en papel logarítmico, nos da una curva tipo para interpretar pruebas de bombeo en pozos totalmente penetrantes en acuíferos confinados (figura 6).

En base a las fórmulas 3 y 4 Theis desarrolló un método gráfico de solución para determinar los parámetros T y S, de acuerdo a los pasos siguientes:

- a) Trazar la curva tipo W(u)-1/u en papel con trazo doble logarítmico.
- b) Construir la gráfica abatimiento – tiempo del pozo de observación en papel idéntico al utilizado en el inciso a.
- c) Superponer las gráficas manteniendo los ejes paralelos y buscar la coincidencia de la curva de campo y la curva tipo.
- d) Substituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones (3) y (4), despejando T y S.

En general, debe darse menor peso a los puntos correspondientes a los tiempos más cortos, pues en esta parte de la prueba pueden tenerse las mayores discrepancias entre las condiciones reales y las hipótesis establecidas para obtener la fórmula; hay cierto retraso que puede ser mayor en esta parte de la prueba. en la que los niveles se abaten rápidamente: el caudal puede variar apreciablemente por el incremento brusco de la carga de bombeo, etc. Para tiempos mayores de bombeo, estas discrepancias se van minimizando y se tiene un ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

Ejemplos de interpretación.....

Aún cuando las fórmulas anteriores son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: no proporciona ninguna información respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero, y no permiten calcular la variación de los abatimientos en el tiempo. Además, no son aplicables al estudio de acuíferos semiconfinados, ni a sistemas de penetración parcial. Por otra parte su aplicación requiere de dos pozos de observación.

7.2.- REGIMEN TRANSITORIO

En 1935, C.V. Theis inició el estudio de la hidráulica de pozos en régimen transitorio, al desarrollar la fórmula que lleva su nombre. Mediante ella pueden deducirse los valores de los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento, a partir de los abatimientos registrados en uno o varios pozos de observación para diferentes tiempos de bombeo, con la ventaja de que no es necesario esperar la estabilización del cono de abatimiento, como en régimen establecido.

La derivación de la fórmula de Theis se basa en las siguientes consideraciones.

- a) El acuífero es homogéneo e isotrópico
- b). El espesor saturado del acuífero es constante
- c) El acuífero tiene extensión lateral infinita
- d) El bombeo del pozo es a costa del almacenamiento del acuífero
- e) El pozo penetra totalmente el acuífero
- f) El agua del acuífero es liberado instantáneamente con el abatimiento

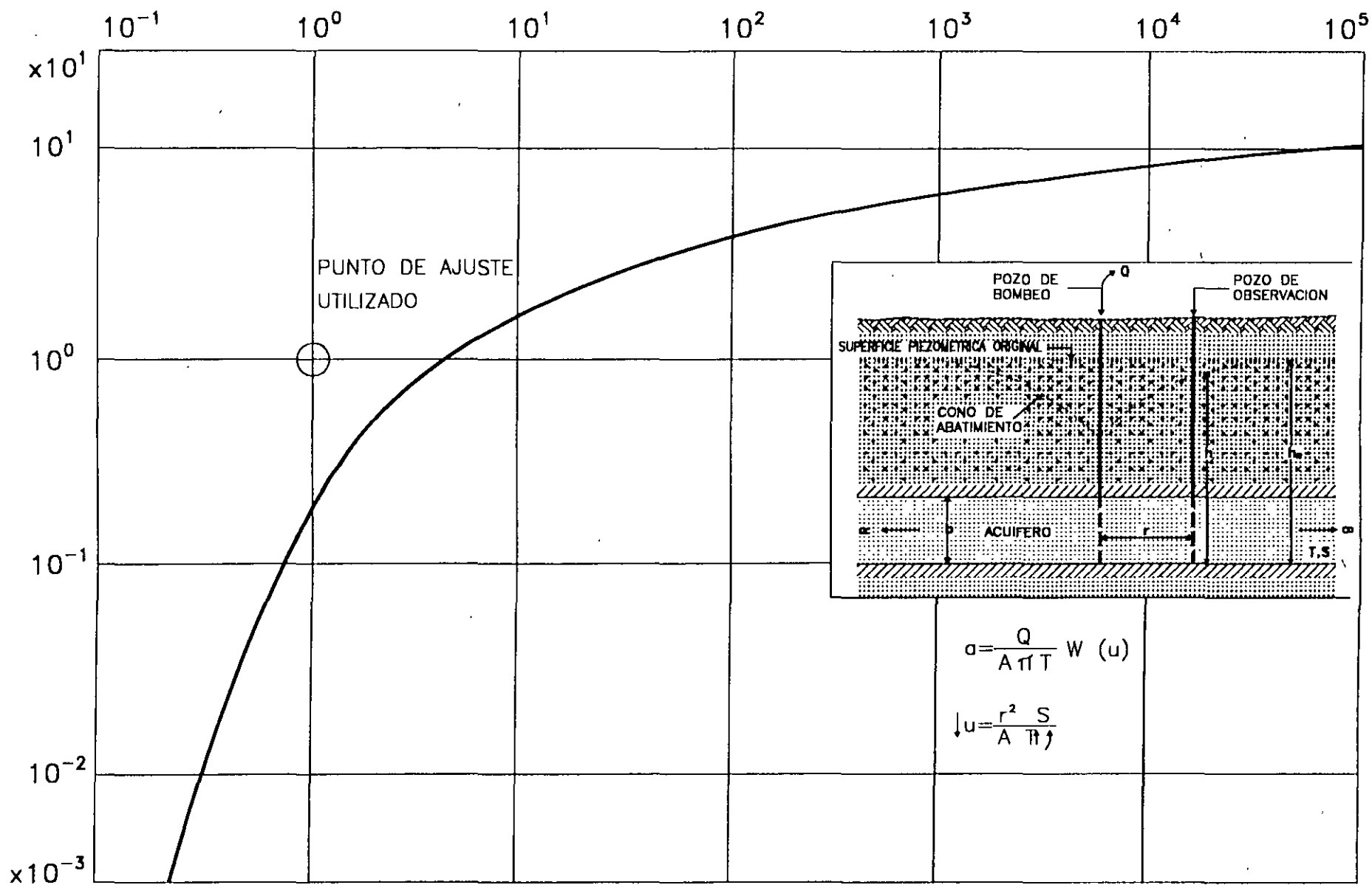
La solución desarrollada por Theis, es:

$$a = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \text{-----} (3)$$

Despejando T.

$$T = \frac{Q}{4\pi a} W(u)$$

Donde: a es el abatimiento registrado a la distancia r del pozo de bombeo; Q, es el caudal, T la transmisibilidad; W (u), la función de pozo.



CURVA TIPO PARA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO
 EN ACUIFEROS CONFINADOS

Prueba de Bombeo

Pozo No. 40-OBS	Lugar SISTEMA ALZATE	Etapa de ABATIMIENTO	
Pozo de OBSERVACION	Distancia al pozo de operación (m) 100.00	Caudal en lps 100.00000	Duración en min 940.0000

Resultados

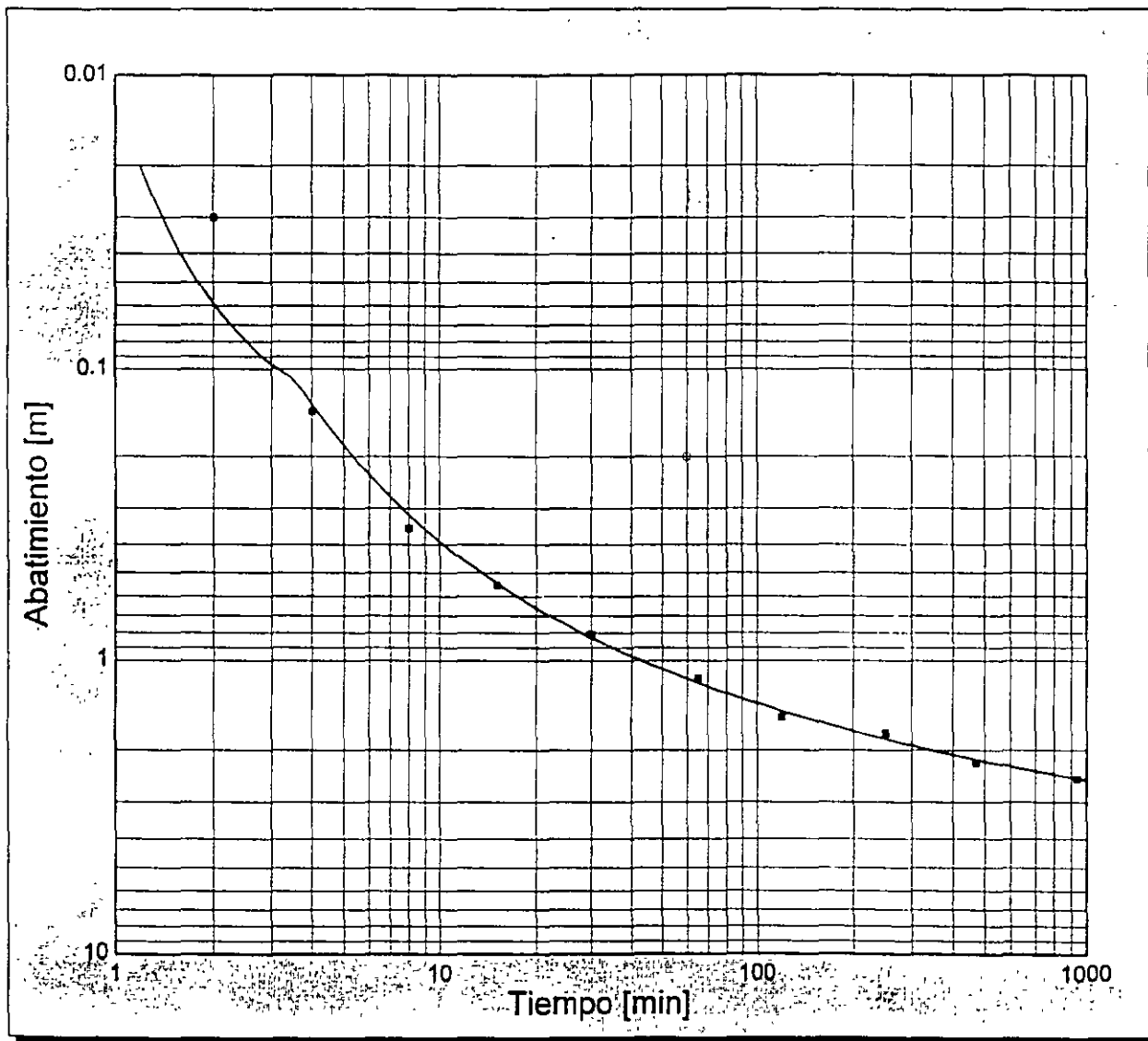
Transmisibilidad en m ² /dia <i>m²/day</i> 1429.861 (0.0165)	Coeficiente de Almacenamiento 0.001362297	Estimación del Error [m] 0.04
---	--	----------------------------------

Método utilizado	Método de Theis
------------------	-----------------

Tiempo en min.	Profundidad en m	Caudal en lps	Valor no tomado en cuenta	Valor estimado	Diferencia
1.2	0.02000	100.000		0.00000	-0.02000
2.0	0.03000	100.000		0.05917	0.02917
4.0	0.14000	100.000		0.13219	-0.00781
8.0	0.35000	100.000		0.31567	-0.03433
15.0	0.55000	100.000		0.54145	-0.00855
30.0	0.81000	100.000		0.83299	0.02299
60.0	0.20000	100.000	*	1.15043	0.95043
65.0	1.15000	100.000		1.18815	0.03815
120.0	1.55000	100.000		1.48172	-0.06828
250.0	1.75000	100.000		1.84022	0.09022
470.0	2.20000	100.000		2.15180	-0.04820
940.0	2.50000	100.000		2.49566	-0.00434

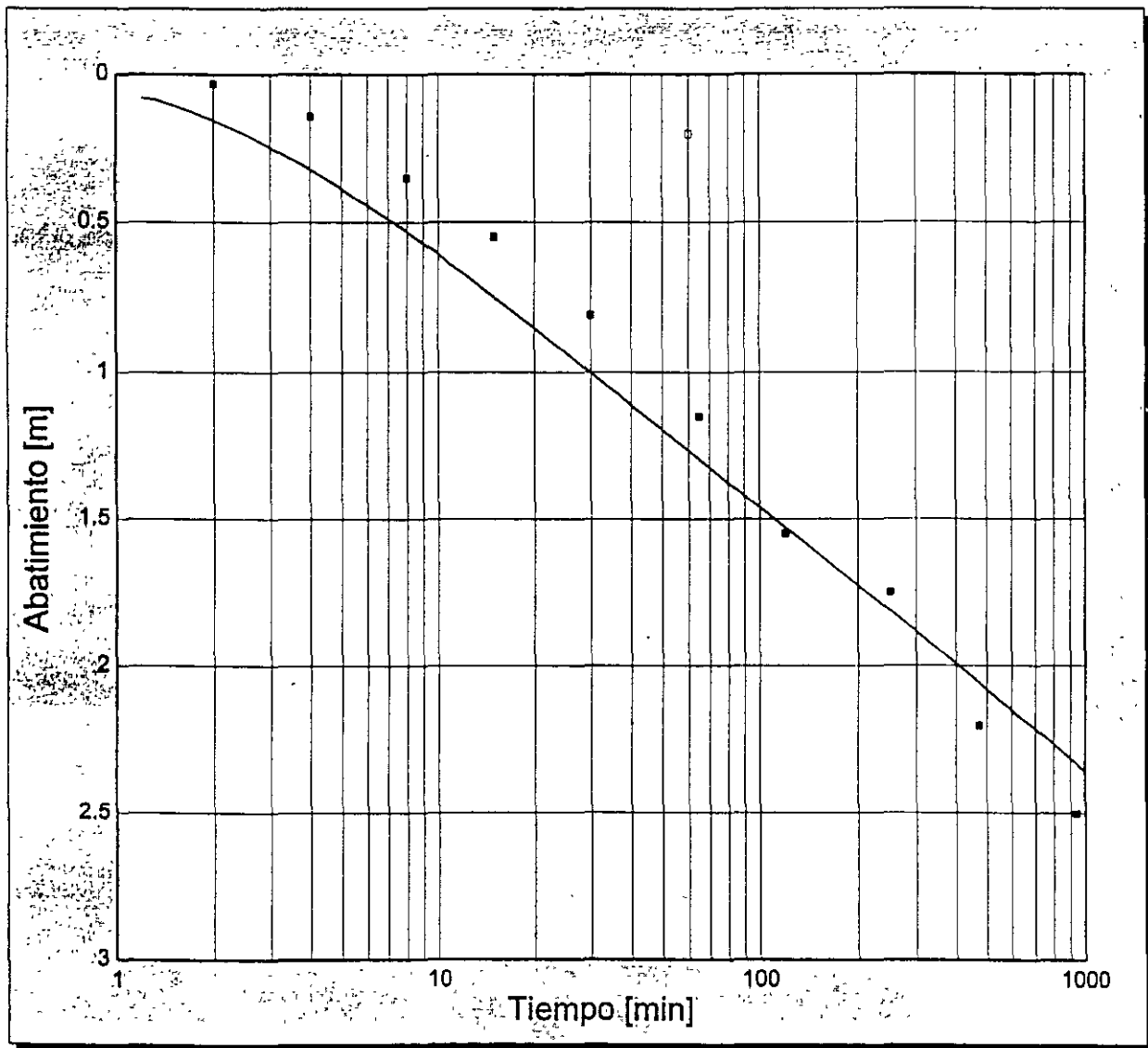
Prueba de Bombeo

Pozo No. 40-OBS	Lugar SISTEMA ALZATE	Etapa de ABATIMIENTO	
Pozo de OBSERVACION	Distancia al pozo de operación (m) 100.00	Caudal en lps 100.00000	Duración en min 940.0000
			Resultados
Transmisibilidad en m ² /dia 1429.861 (0.0165)	Coficiente de Almacenamiento 0.001362297	Estimación del Error [m] 0.04	
Método utilizado			Método de Theis



Prueba de Bombeo

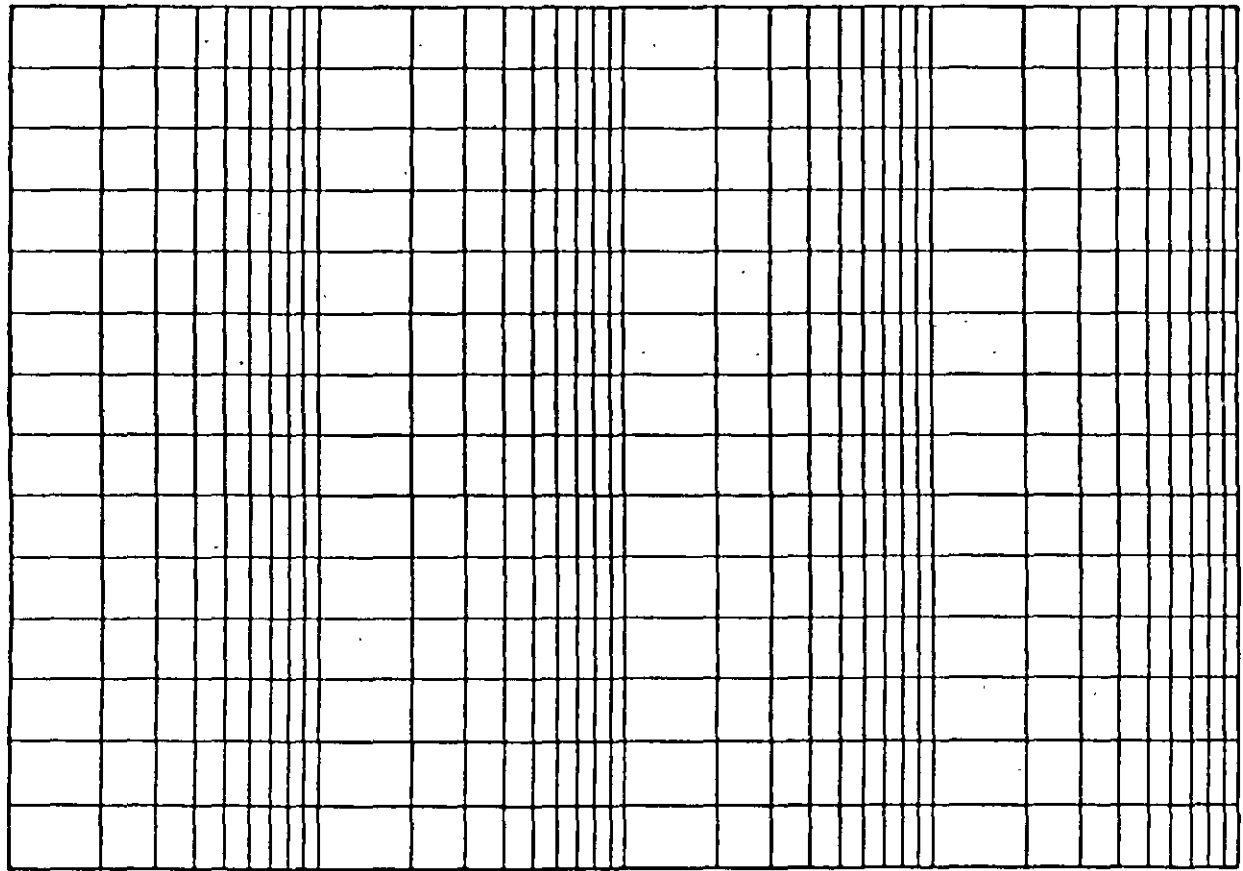
Pozo No. 40-OBS	Lugar SISTEMA ALZATE	Etapa de ABATIMIENTO	
Pozo de OBSERVACION	Distancia al pozo de operación (m) 100.00	Caudal en lps 100.0000	Duración en min 940.0000
Resultados			
Transmisibilidad en m ² /dia 1832.453 (0.0212)	Coefficiente de Almacenamiento 0.0006559420	Estimacion del Error [m] 0.15	
Método utilizado		Método de Jacob	



D

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA, (m)



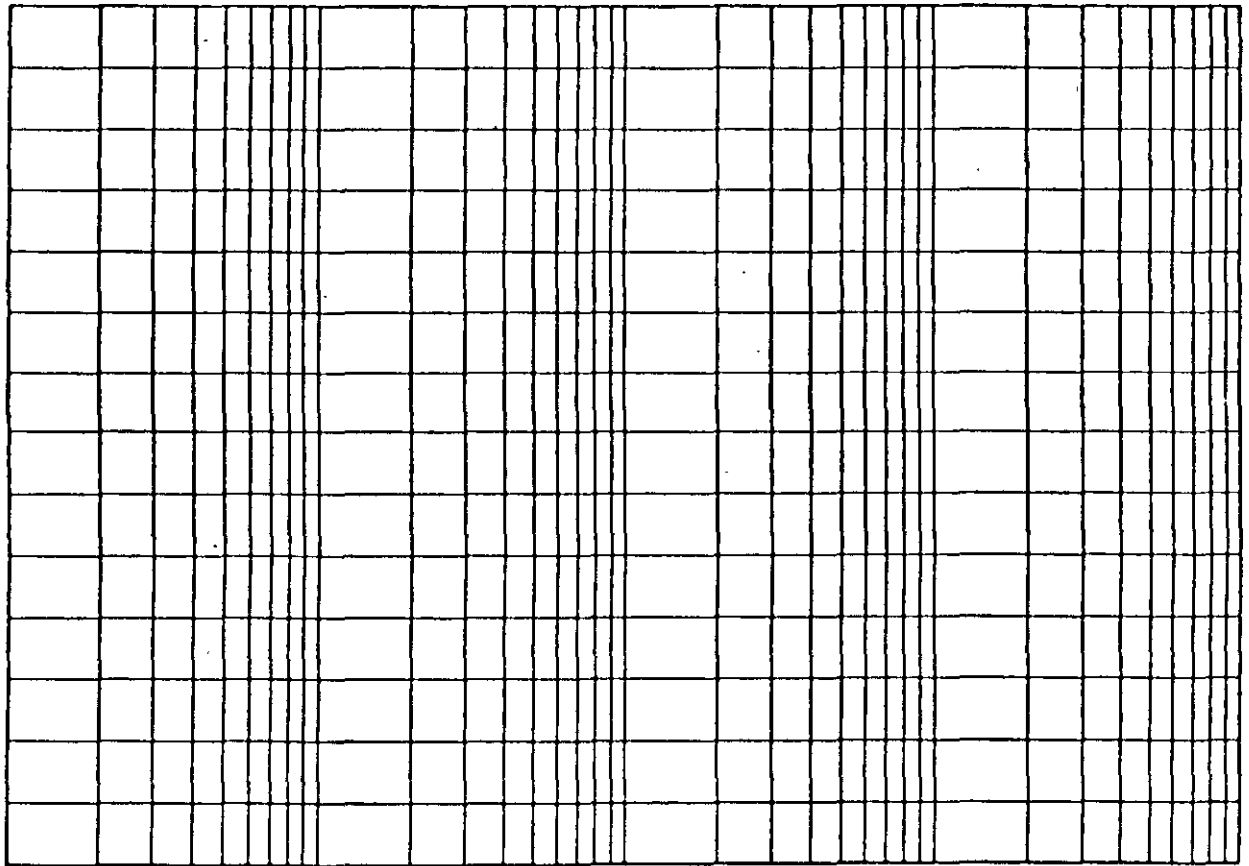
TIEMPO EN

FECHA
FIGURA

PRUEBA DE BOMBEO
ETAPA DE

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA, (m)



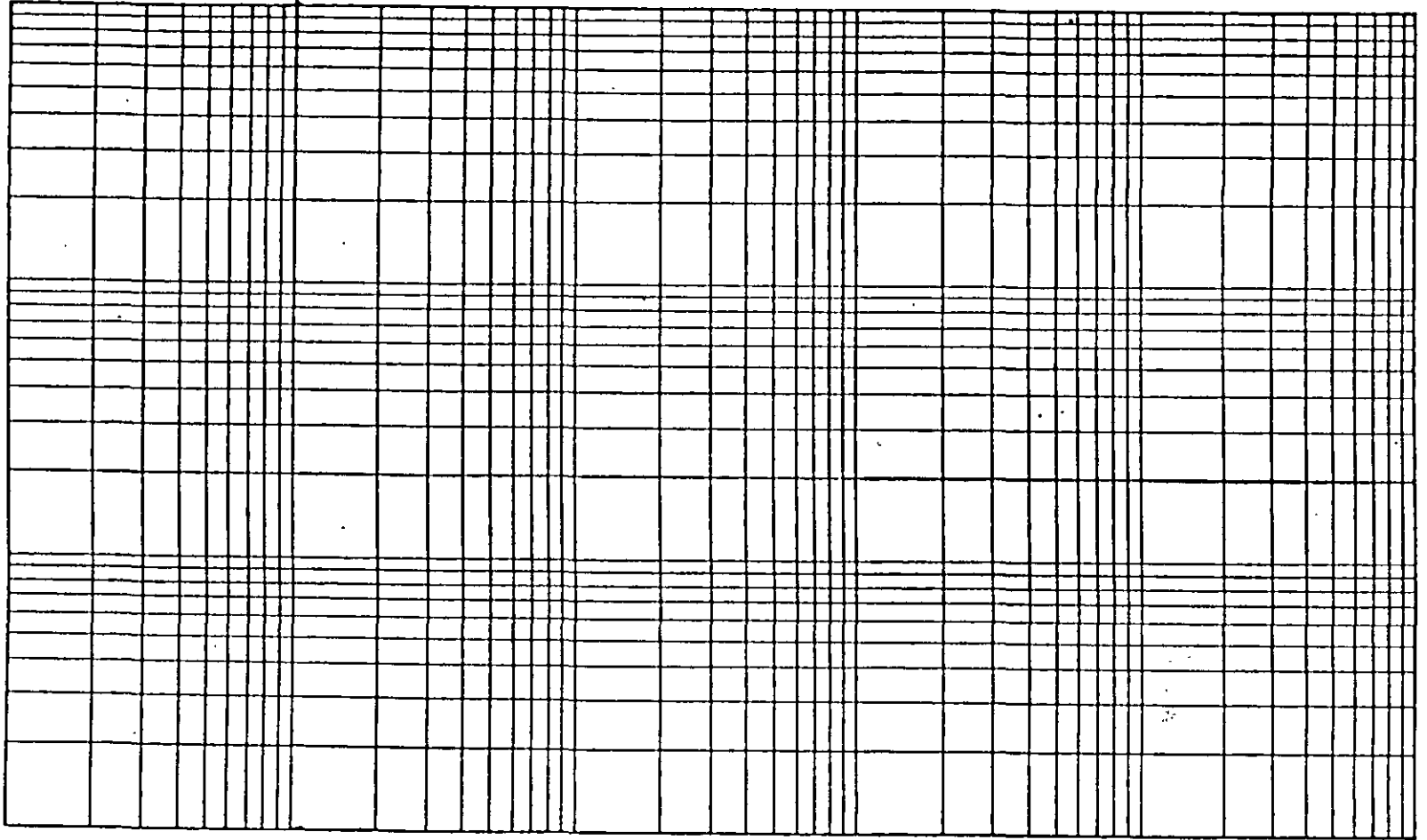
TIEMPO EN

FECHA
FIGURA


PRUEBA DE
BOMBEO
ETAPA DE

D

ABATIMIENTO EN METROS



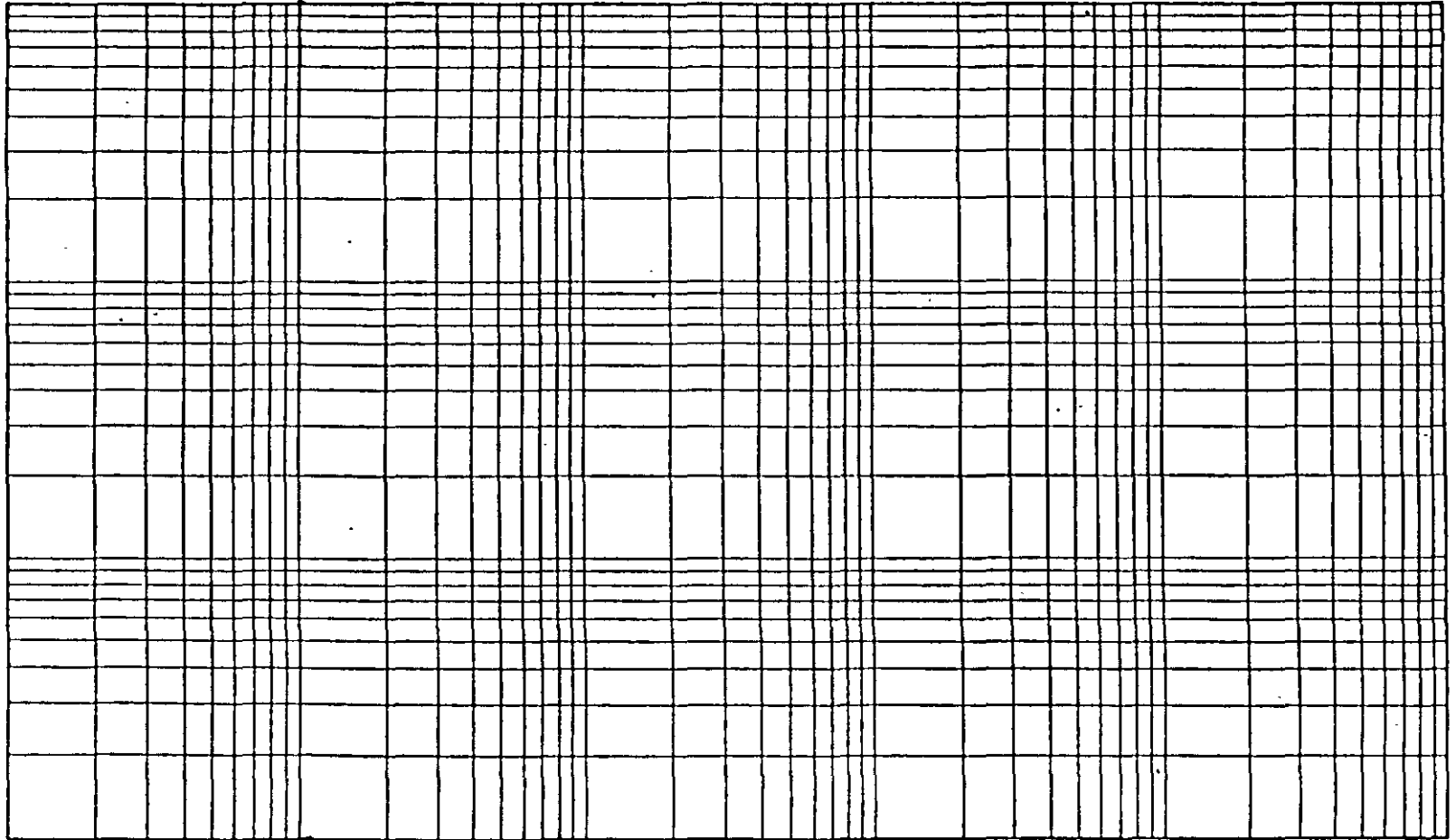
TIEMPO EN MINUTOS

FECHA:
FIGURA:

LESER Y ASOCIADOS, S.A.

REPRESENTACION
LOGARITMICA DE
PRUEBAS DE
BOMBEO
ETAPA DE

D

ABATIMIENTO EN METROS



TIEMPO EN MINUTOS

FECHA:
FIGURA:



LESSEY Y ASOCIADOS, S.A.

REPRESENTACION
LOGARITMICA DE
PRUEBAS DE
BOMBEO
ETAPA DE

FÓRMULA MODIFICADA PARA PRUEBAS DE BOMBEO CON REGIMEN TRANSITORIO

Un método más sencillo para la interpretación de las pruebas de bombeo, fue desarrollado por Jacob, quien observó que para tiempos largos ($t > 5 S r^2/T$), la ecuación (3), puede modificarse sin un error significativo a la forma siguiente:

$$a = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S} \text{-----}(5)$$

A partir de esta fórmula, desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consiste en lo siguiente.

- Construir la gráfica abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logarítmica).
- Pasar una recta por los puntos que se alinean, y determinar su pendiente, los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba generalmente se apartan de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ($t < 5 S r^2/T$) para los cuales no es válida la fórmula de Jacob.
- Si la pendiente de la recta de ajuste es Δs , la Transmisibilidad puede obtenerse de la expresión.

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s} \text{-----}(6)$$

- Determinar el valor del tiempo, t_0 , para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.
- Calcular el coeficiente de almacenamiento mediante la expresión.

$$S = \frac{2.24 T t_0}{r^2} \text{-----}(7)$$

Ejemplos de interpretación

El método anterior puede seguirse, cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación para un tiempo dado. En este caso se gráfica el abatimiento (en escala aritmética) contra la distancia (en escala logarítmica). Los coeficientes buscados se obtienen mediante las fórmulas.

$$T = \frac{0.366 Q}{\Delta S} \text{ y } S = \frac{2.25 Tt}{r^2} \text{ ----- (8)}$$

En donde r corresponde al valor para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.

La forma más general del método, se aplica cuando se tienen observaciones en varios pozos de observación para diferentes tiempos, en este caso, los valores de la relación t/r se anotan en el eje logarítmico, y se sigue la secuela descrita anteriormente.

PRUEBAS DE BOMBEO EN ACUÍFEROS SEMICONFINADOS

Probablemente, el acuífero más común en la naturaleza es el de tipo semiconfinado; los rellenos siempre tienen cierta estratificación, alternándose estratos de granulometría variada. Cuando un estrato de material permeable queda limitado verticalmente por materiales, también saturados, de menor permeabilidad, se tiene un acuífero semiconfinado. (ver figura 7).

Al bombearse un acuífero de este tipo se provocan abatimientos de sus niveles piezométricos, generándose una diferencia vertical de cargas, que induce el flujo descendente del agua a través del semiconfinante. La cantidad de agua que circula a través de este es directamente proporcional a la diferencia de cargas entre las superficies freática y piezométrica, e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica del mismo estrato.

Puesto que en este sistema solo una parte del volumen bombeado procede del acuífero, y el resto es aportado por el estrato adyacente el semiconfinante, el abatimiento de los niveles piezométricos es menor que en el caso del acuífero confinado. Como la aportación vertical aumenta con el tiempo, el abatimiento de los niveles piezométricos va decreciendo, hasta que la aportación vertical equilibra el caudal de extracción y en ese momento, los niveles piezométricos se estabilizan.

ACUÍFERO SEMICONFINADO

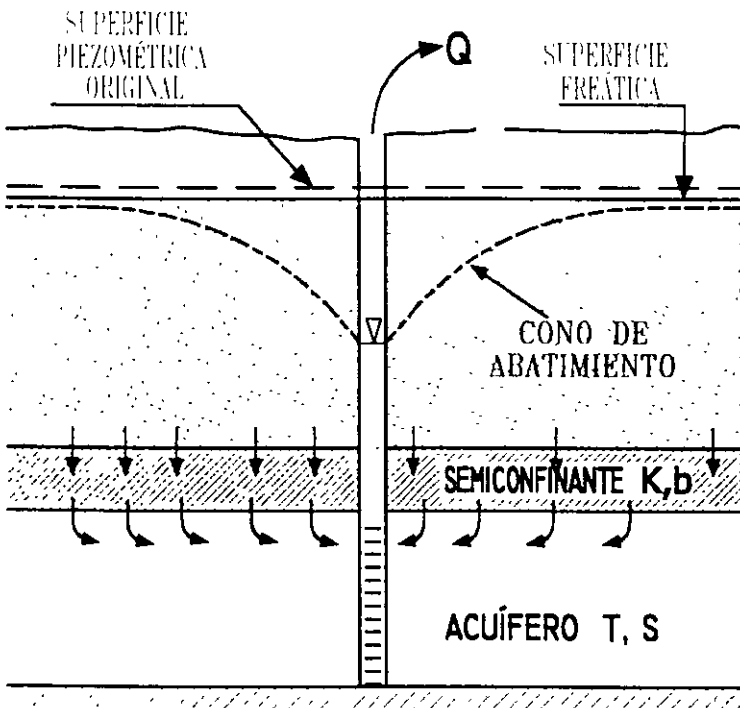


FIGURA 7

ACUIFERO SEMICONFINADO

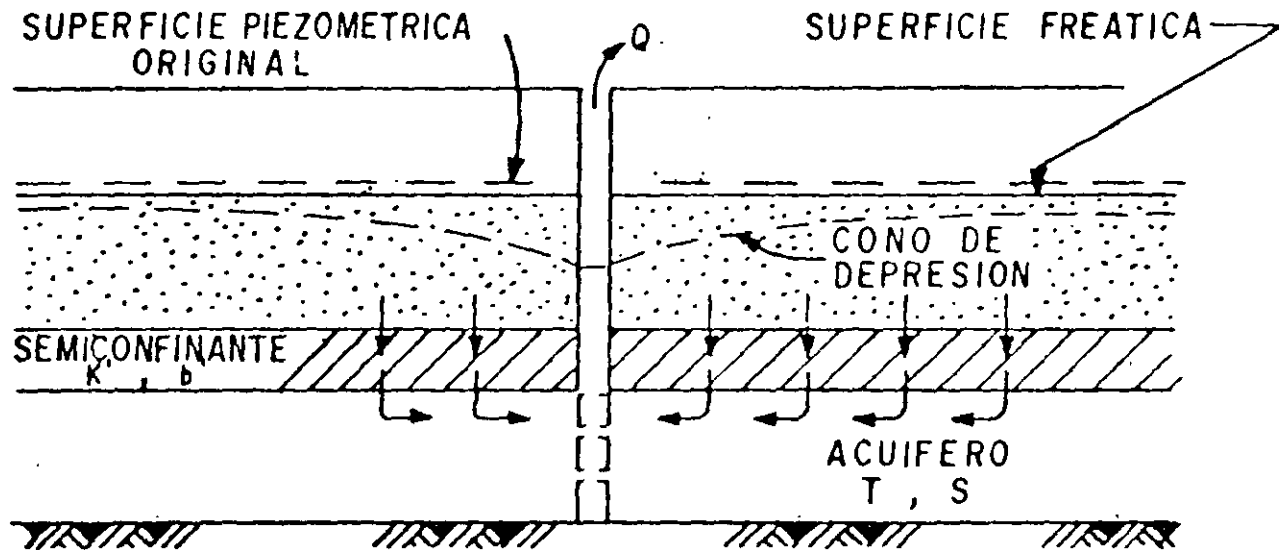


FIGURA 7

La solución correspondiente a este sistema es la siguiente.

$$A = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$$

Despejando T:

$$T = \frac{Q}{4\pi a} W(u, r/B)$$

Por otra parte:

$$U = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

Despejando S

$$S = \frac{4 T t}{r^2} u$$

Donde

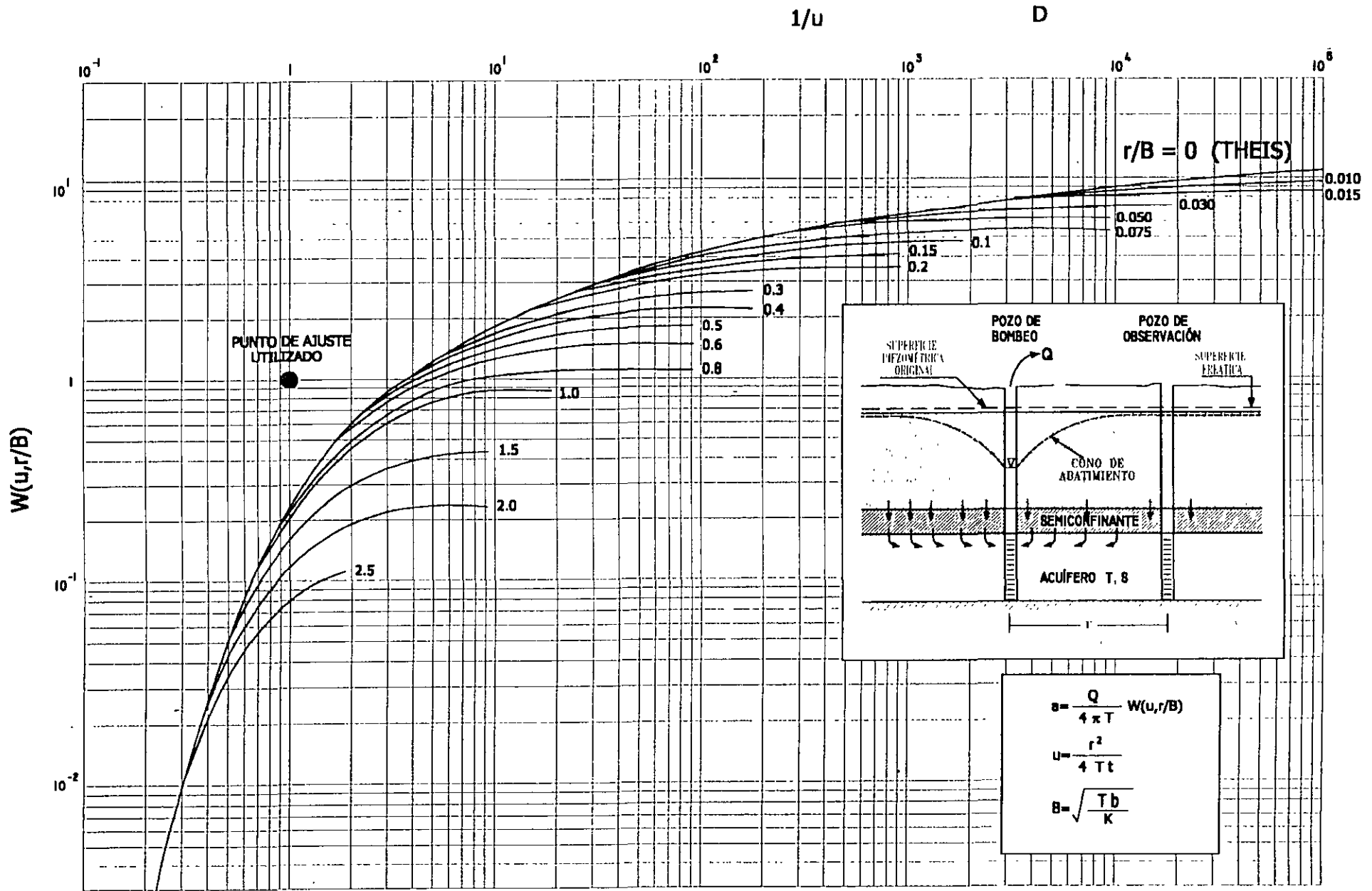
$$B = \sqrt{T b'/K'}$$

Siendo K' y b' la permeabilidad vertical y el espesor del estrato semiconfinante.

Las curvas tipo correspondientes a esta solución se presentan en la figura 8, en la cual puede apreciarse el comportamiento arriba descrito.

El procedimiento de interpretación de las pruebas en este caso es semejante al seguido en el caso de los acuíferos confinados, con la diferencia de que ahora debe buscarse la coincidencia entre la curva de campo y una de las curvas tipo. Lograda la coincidencia, se selecciona un punto de ajuste, y se substituyen los valores de sus coordenadas en las ecuaciones correspondientes, para deducir los parámetros buscados.

Ejemplos de interpretación.....



**CURVA TIPO PARA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO
EN ACUÍFEROS SEMICONFINADOS**

MÉTODO GRÁFICO DE HANTUSH PARA ACUÍFEROS SEMICONFINADOS

- 1.- Graficar el abatimiento medido en un pozo de observación contra el tiempo en minutos en papel semilogarítmico y entrepolar los datos hasta que el máximo abatimiento (S_{max}) se encuentre.
- 2.- Localizar el punto de inflexión en la curva de abatimiento tomando $S_i = S_{max}/2$, en donde S_i es el abatimiento en el punto de inflexión.
- 3.- Determinar gráficamente la pendiente m_i de la curva de abatimiento en el punto de inflexión y leer el tiempo t_i correspondiente al punto de inflexión.
- 4.- Como se comprueba en el apéndice A del libro Geohydrology de De Wiest. (ref. 1).

$$e^{r/b} K_o \frac{r}{B} = \frac{2.3 S_i}{m_i}$$

Los valores de la función $e^x k_o(X)$ en donde $x = r/b$, han sido trabajados por Hantush. Aquí la función está determinada por la relación 2.3 si/mi. El valor del argumento, llamado r/B , puede determinarse mediante la tabla 1.

- 5.- Calcular T de la fórmula siguiente:

$$T = \frac{0.159 \times Q}{S_{max}} K_o(r/b)$$

- 6.- En el punto de inflexión

$$U_i = \frac{r^2 S}{4 \times 60 T t_i} = \frac{r}{2b}$$

de esta relación se puede obtener S.

PRUEBA DE BOMBEO EN ACUÍFEROS LIBRES

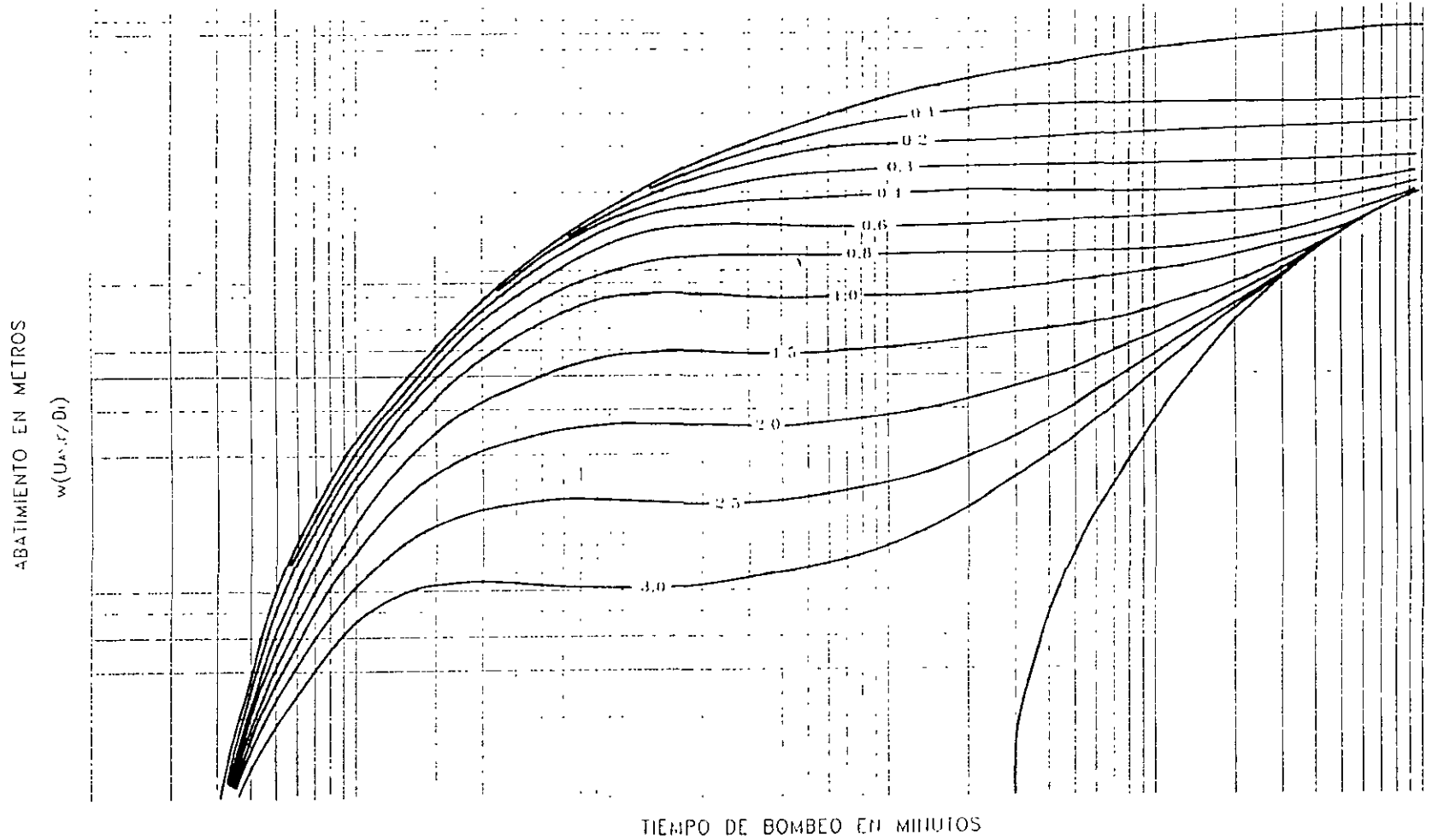
Los acuíferos libres se caracterizan por estar limitados superiormente por una superficie freática, puesto que el espesor saturado del acuífero varía con las fluctuaciones de esta

superficie, la transmisibilidad del acuífero es también variable en el área y en el tiempo. Si las fluctuaciones de los niveles son poco significativos con respecto al espesor del acuífero, la transmisibilidad puede suponerse constante, y la interpretación de las pruebas se efectúan como si se tratara de un acuífero confinado. En cambio, si dichas fluctuaciones son importantes, específicamente, mayores del 20% del espesor saturado del acuífero, los abatimientos medidos se corrigen en la forma siguiente.

$$ac = a - \frac{a^2}{2b}$$

Siendo ac el abatimiento corregido y b , el espesor saturado inicial del acuífero, los abatimientos así corregidos, se interpretan como si se tratara de un acuífero confinado.

CURVA TIPO PARA INTERPRETACION EN ACUIFERO LIBRE



$$T = Q w(U, r/D_i) / 4 \pi s$$

$$S = 4 T_s (U_s / r) ^2$$

REPRESENTACION LOGARITMICA
DE PRUEBAS DE BOMBEO

FIGURA 9

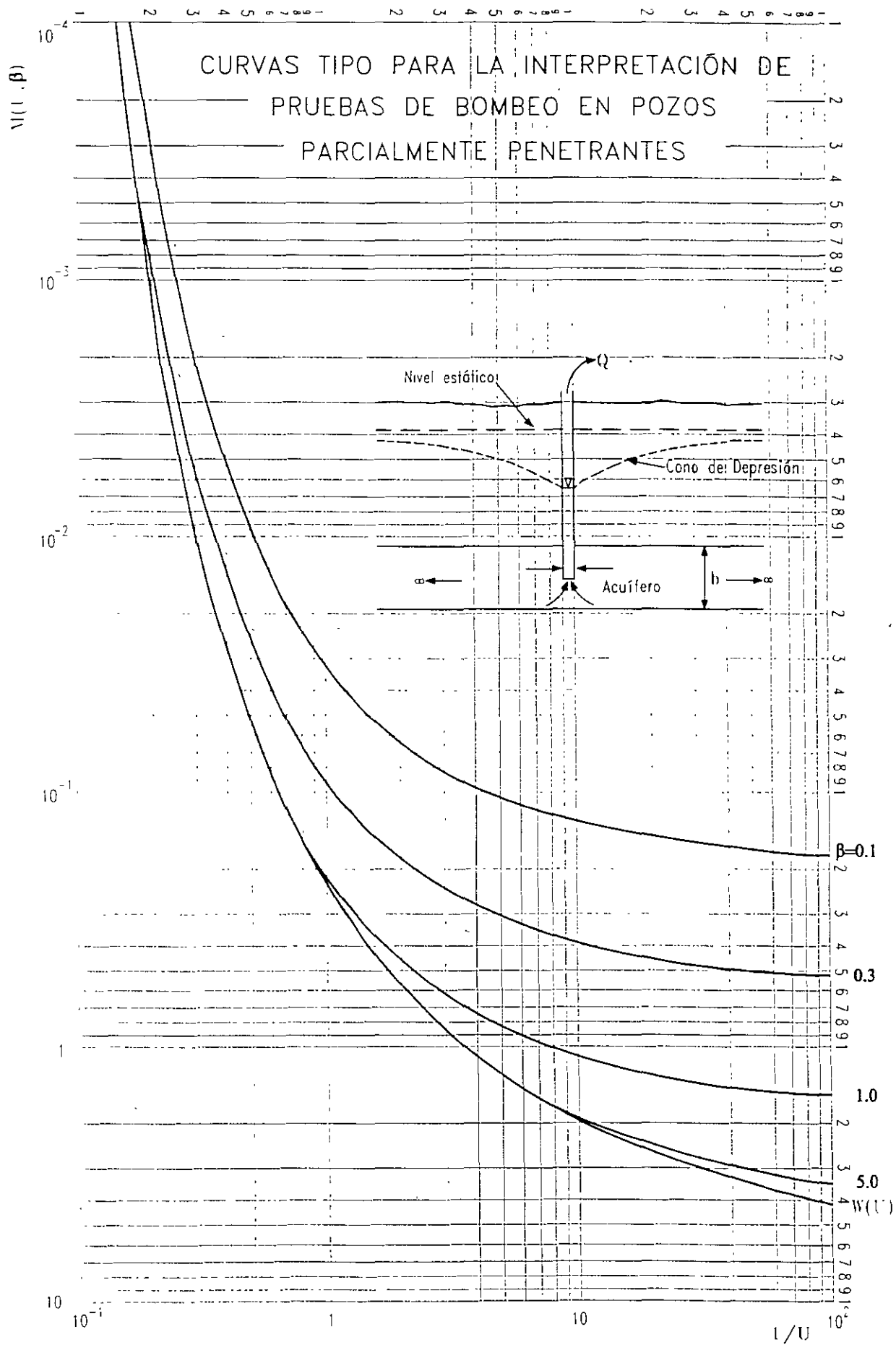


FIGURA 10

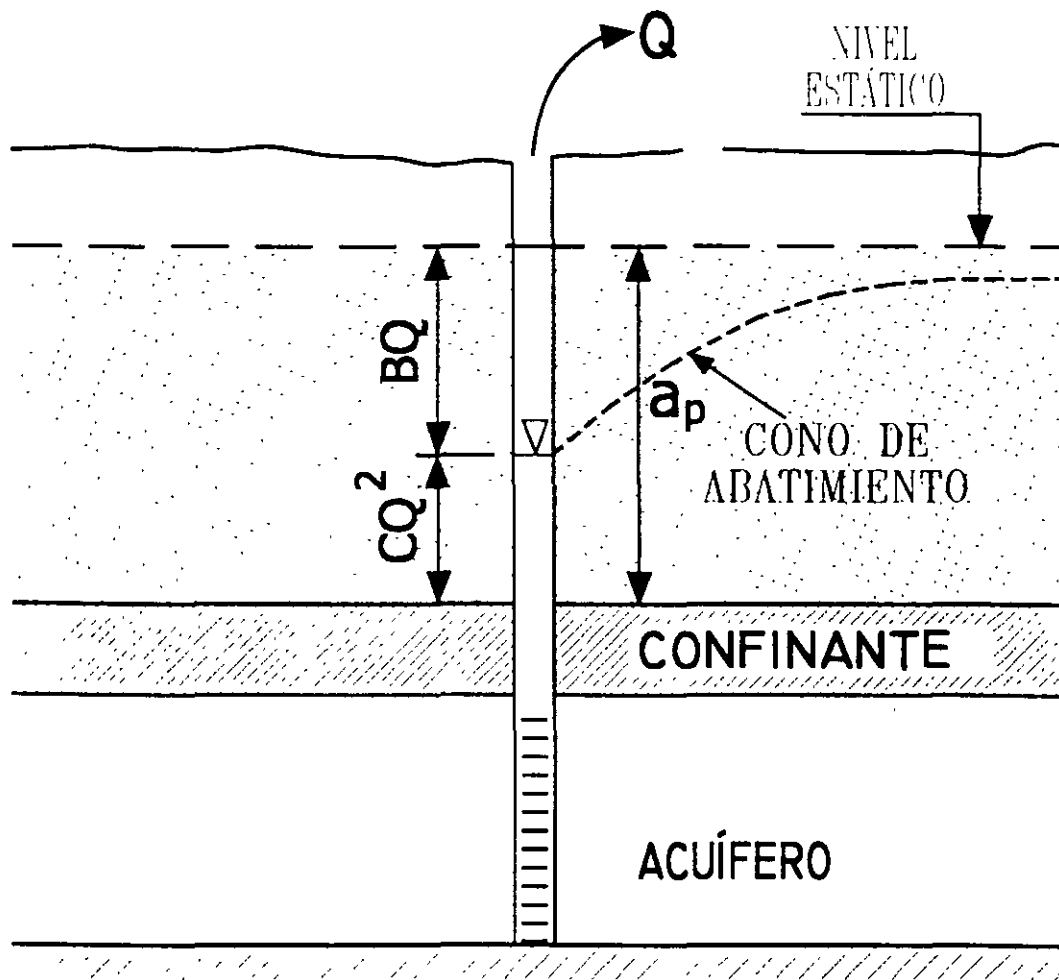


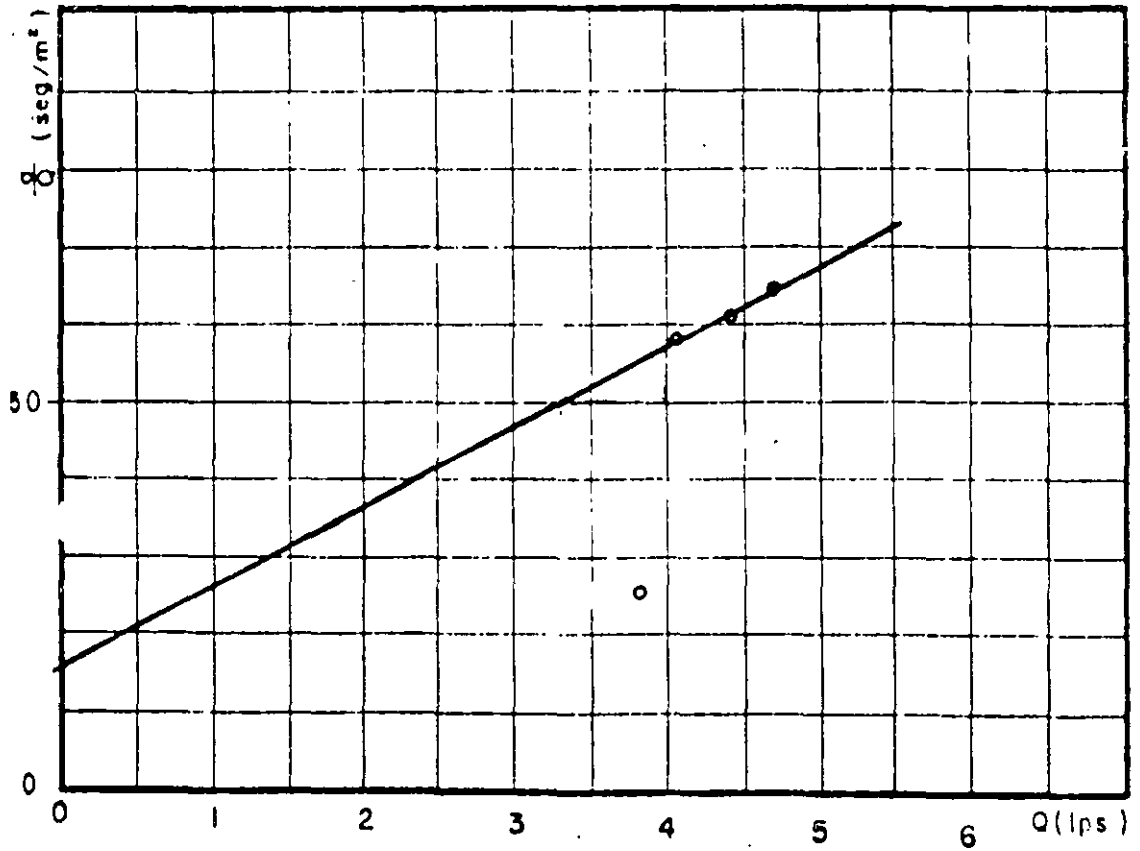
FIGURA 23

INTERPRETACION DE LA PRUEBA DE AFORO

ZONA : HUATULCO, OAX.

POZO No. T-2

N.E. : 1.60 m.



$B = 16$

$C = 10,000$

FIGURA 7.1.
HOJA 4 de 4

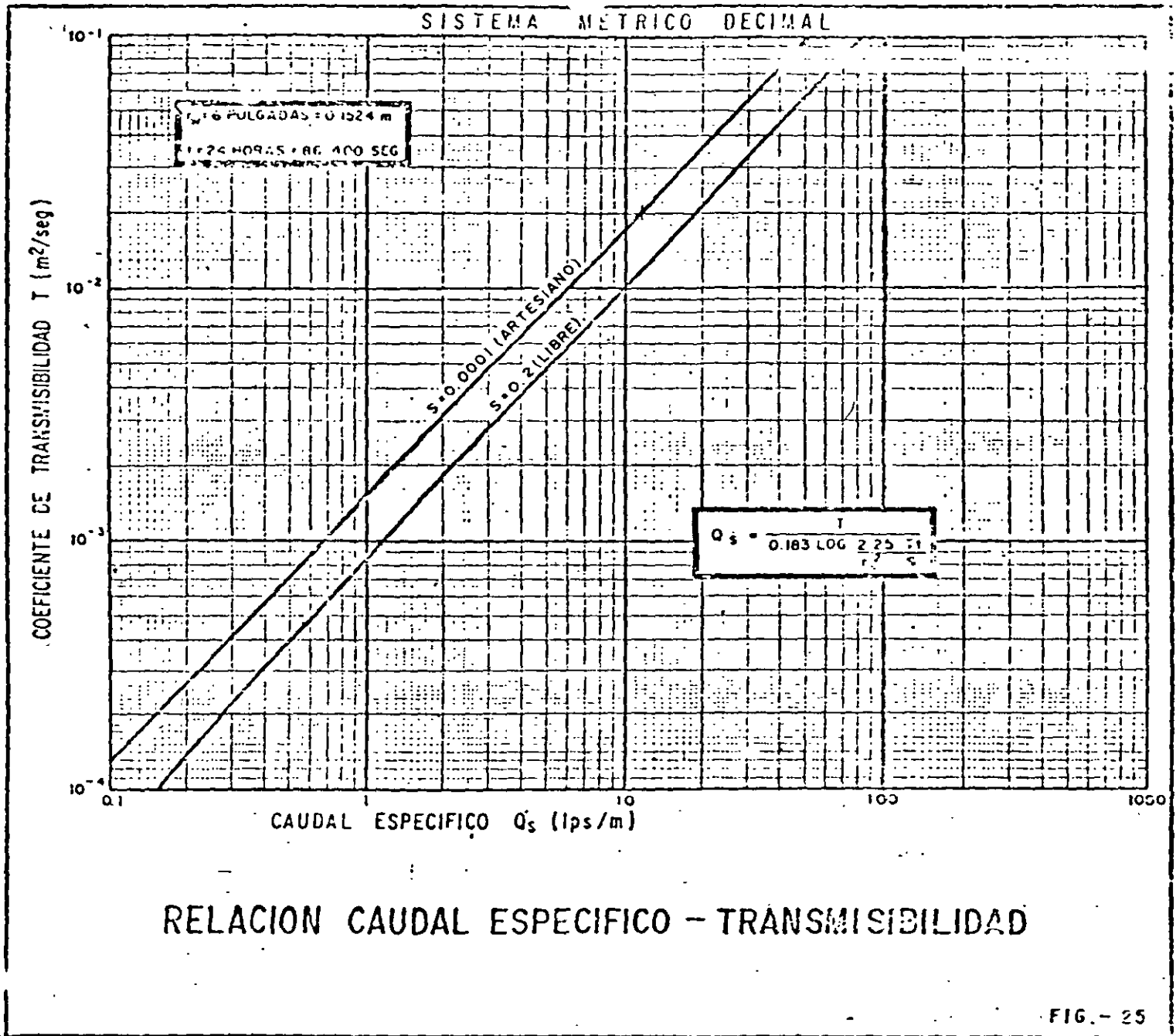


INTERPRETACION DE LA PRUEBA DE AFORO

ZONA : HUATULCO, OAX.

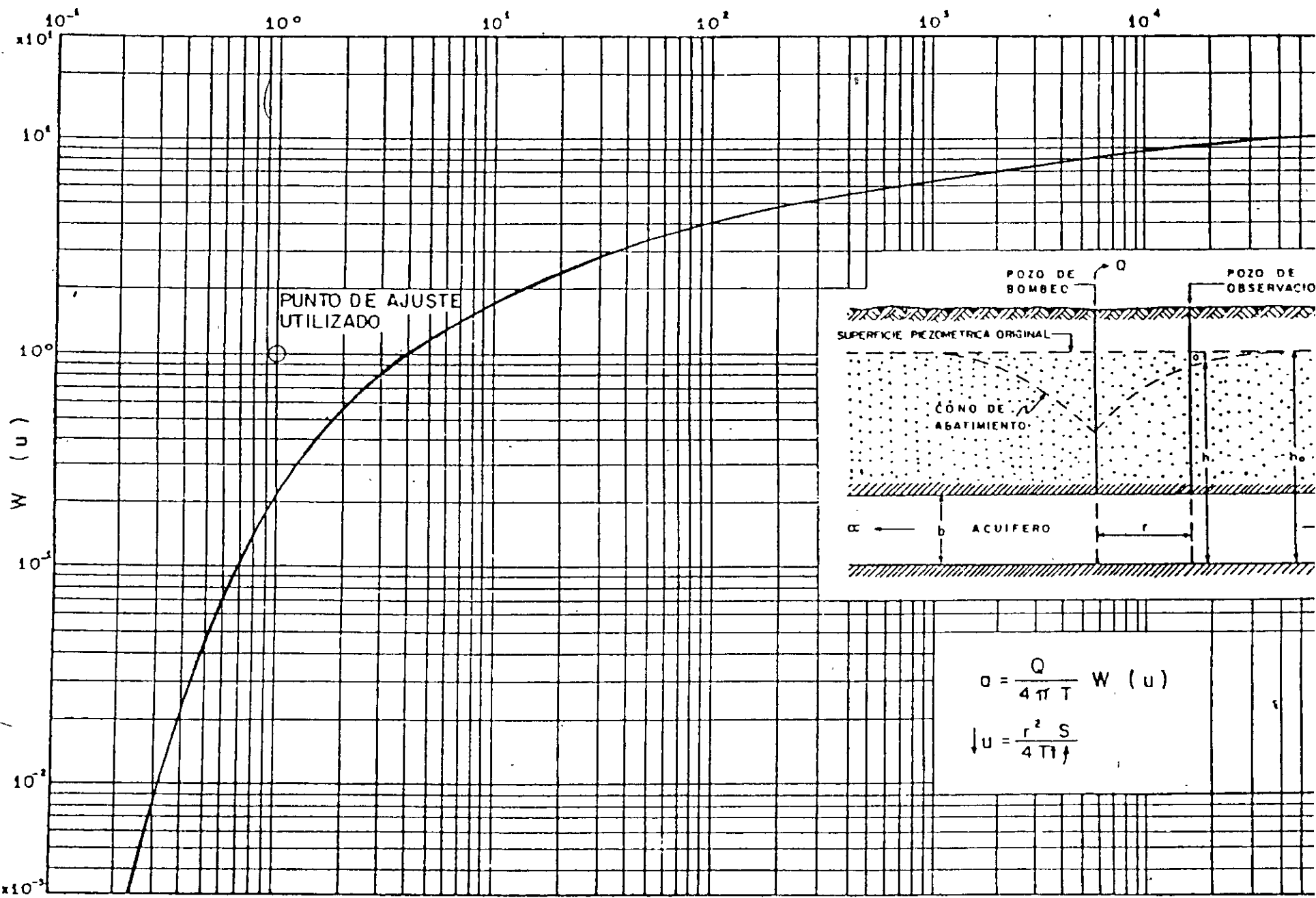
POZO No. T-2

RPM	Q m ³ /seg.	M. D. m	r m	s/Q seg./m ²	B Q m	CQ ² m	DT	DT	Q/DT	Q/DT ⇒ T	
							CALCULADO m	OBSERVADO m	OBSERVADO lps/m	lps/m	m ² /seg
2600	0.0038	1.70	0.10	26.3	0.06	0.14	0.20	0.10	38	63.3	
2800	0.0041	1.84	0.24	58.5	0.065	0.068	0.23	0.24	17	63.9	9 x 10 ⁻²
2900	0.0044	1.87	0.27	61.36	0.07	0.193	0.26	0.27	16.2	62.8	
3000	0.0047	1.91	0.31	65.9	0.075	0.22	0.295	0.31	15.1	62.6	



D

l/u



CURVA TIPO PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN ACUIFERO CONFINADOS

FIGURA



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS
CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
EJERCICIO DE AQUIFERTTEST VER. 3.0
EJERCICIO DE AQUACHEM VER. 3.7

EXPOSITOR: ING. DAVID GONZÁLEZ POSADAS
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

EJERCICIO DE AQUIFERTEST VER.3.0

EJERCICIO 1: Planeando una prueba de bombeo

Esta versión de Aquitertest permite, además de interpretar los resultados provenientes de pruebas de bombeo, el planear la prueba antes de salir al campo. Esta capacidad de aquitertest permite obtener sugerencias para los valores de caudal óptimo, la distancia óptima entre el pozo bombeado y los pozos de observación. Este ejercicio esta diseñado para aprender a obtener cual es el caudal necesario para la prueba de bombeo.

El proposito de este ejercicio es estimar el caudal necesario para producir un abatimiento minimo (2mm=0.002m) en un pozo de observación que está a 10 metros del pozo de bombeo, en los primeros 2 minutos de la prueba de bombeo.

1. CREAR UN NUEVA BASE DE DATOS

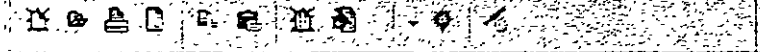
☞☞ en el icono de Aquifer Test 3.0

☞ File (del menú superior)

☞ Create database.

En la ventana que aparece accesar el directorio C:\WHI\Aquifertest\Exercises\ y nombrar al archivo Ejercicio1, y ☞ en Save Una venatan aparecera confirmando que la base de datos ha sido creada.

☞ OK



- Wells
- Pumping tests
- Slug tests

Project

Project name:

Project No: Client:

Location:

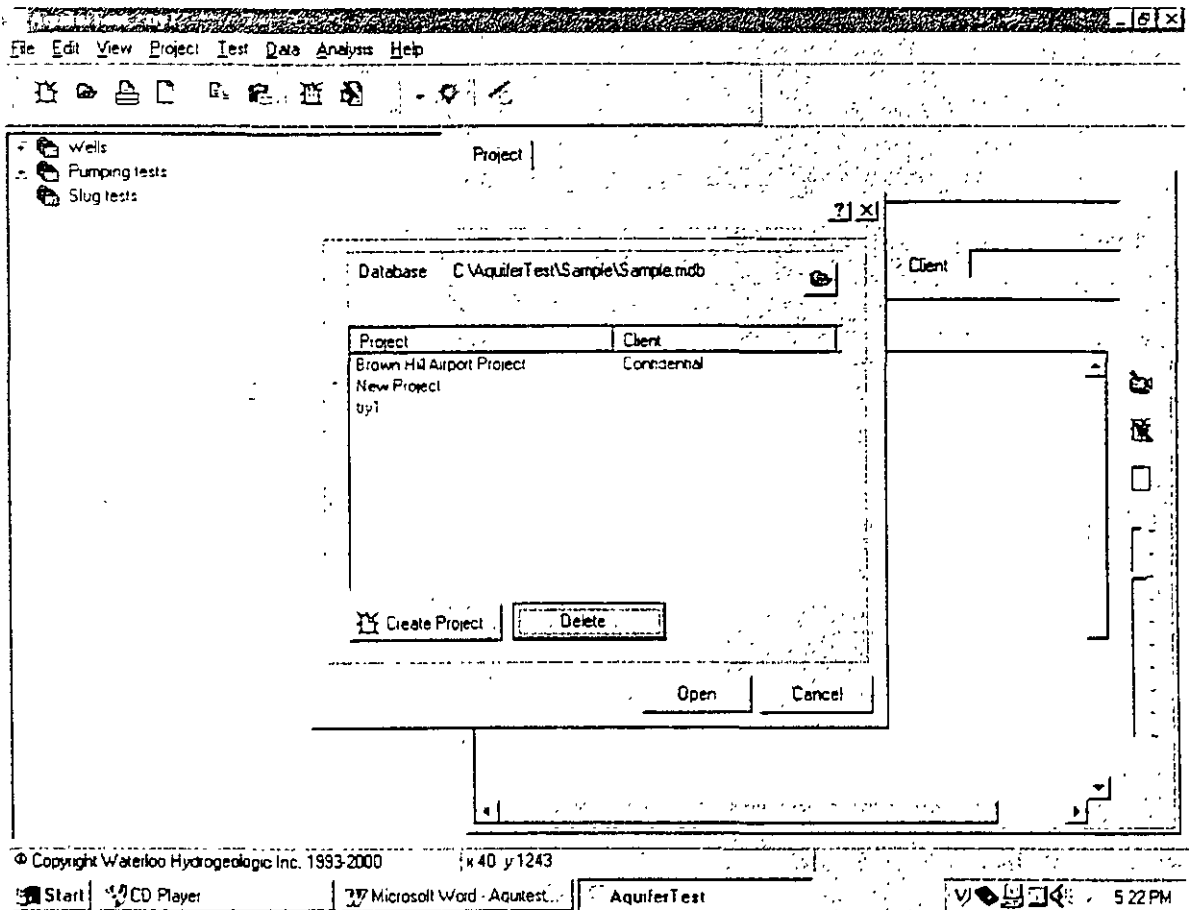
Database "C:\AquiferTest\Exercises\Ejercicio1.MDB" successfully created.

OK

☞ File (del menú superior)


☞ Open project


☞ en el icono para abrir proyectos en la parte superior derecha de la ventana. y buscar el archivo Ejercicio1 (el archivo que acaba de ser creado) dentro de C:\WHI\Aquifertest\Exercises\ y ☞ en Open




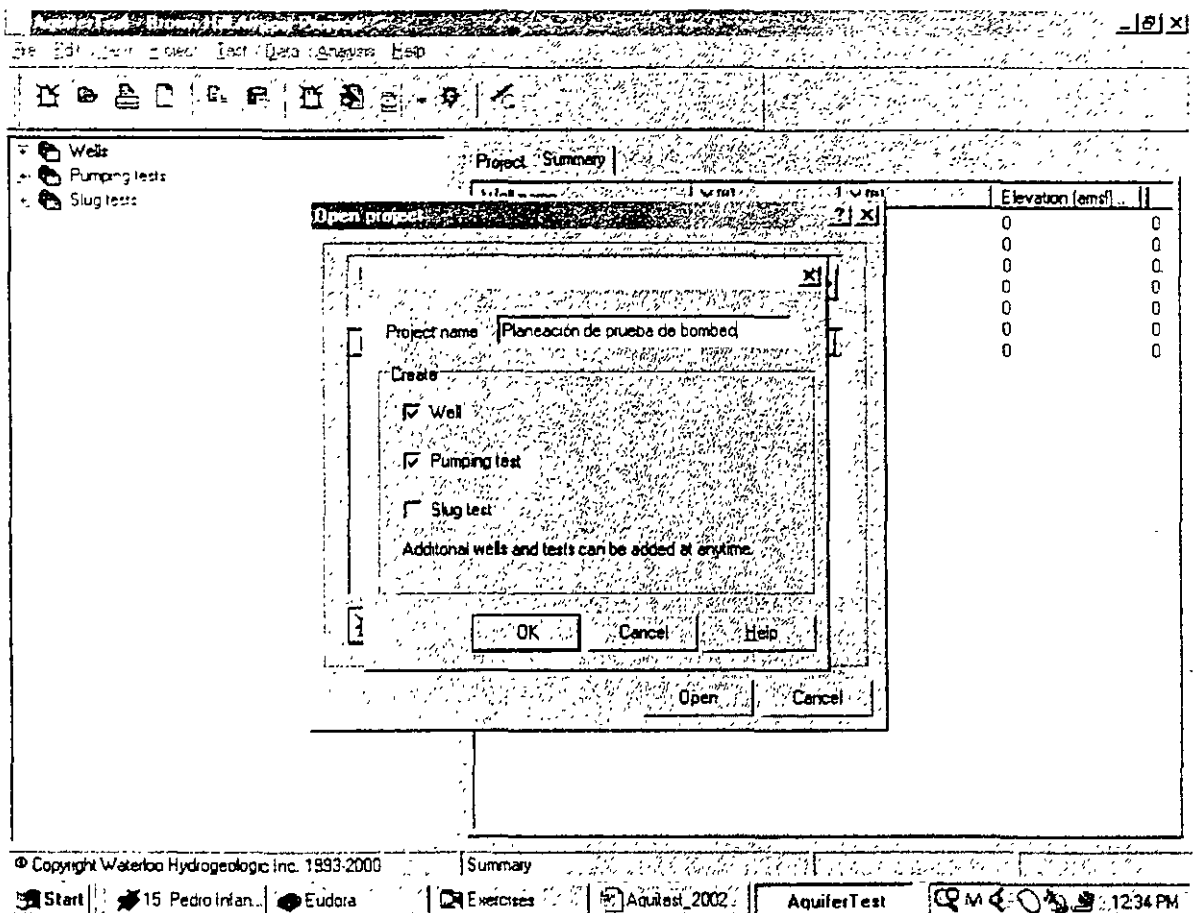
2. CREAR UN NUEVO PROYECTO

En la misma seleccionar

 Create project

En la ventana que aparece, en **project name** escriba: Planeación prueba de bombeo y  en OK

En la ventana anterior que aun seguira abierta,  en **open** (Planeación de prueba de bombeo, deberá estar seleccionada)

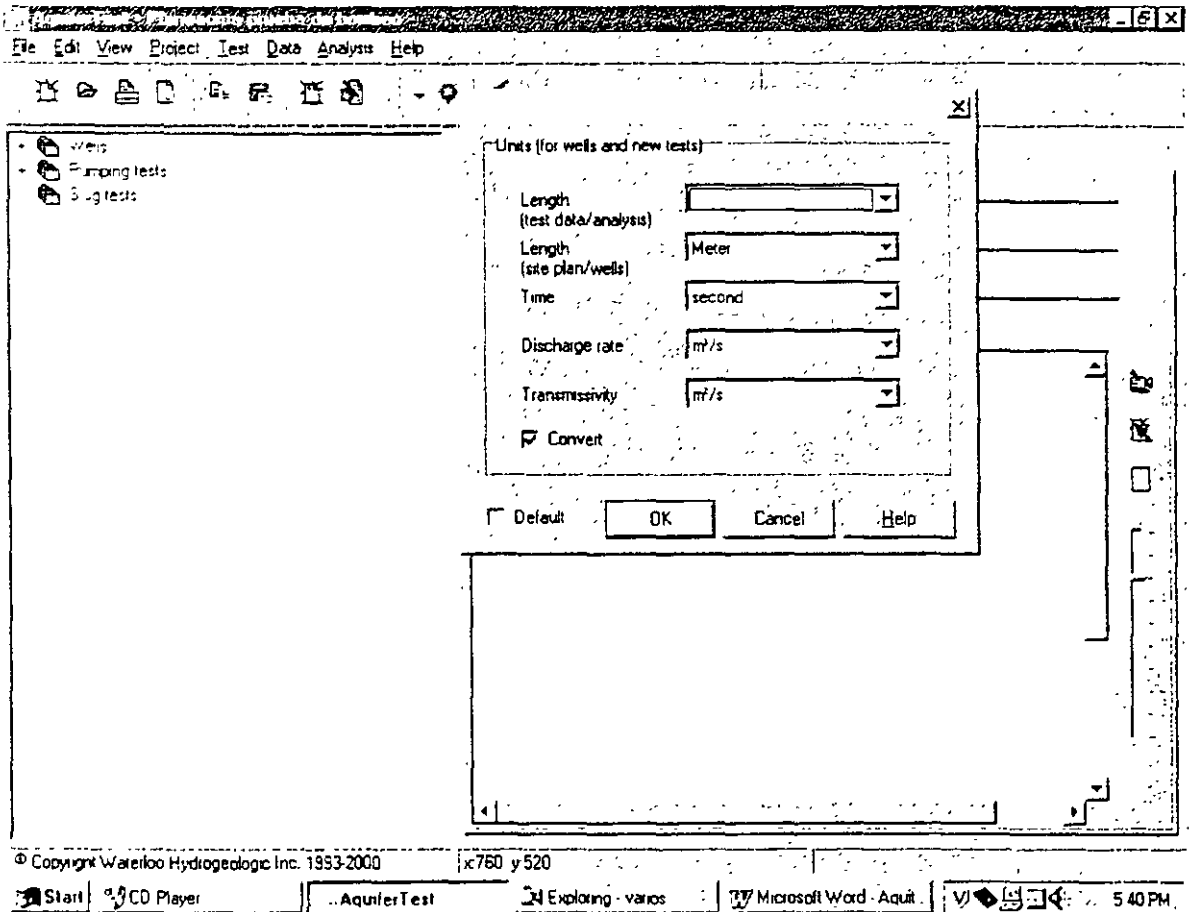


3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE UNIDADES PARA EL PROYECTO

✓ Project (del menú superior)

✓ Units ...

✓ OK



4 CREAR UN NUEVO ANÁLISIS

En cualquier lugar del panel izquierdo (donde se encuentra el menú expandido) hacer un *derecho*. De la ventana que aparece escoger:

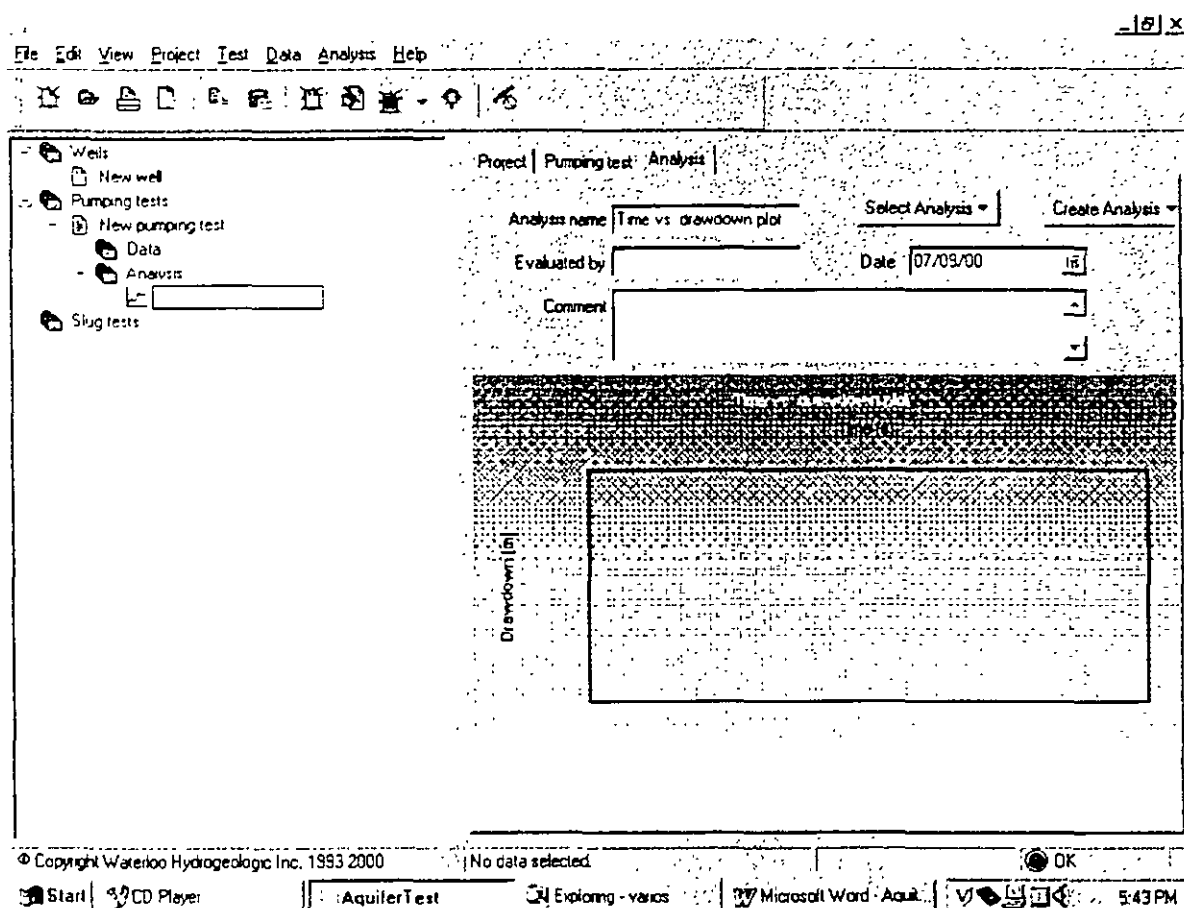
derecho Expand all (para expandir las opciones)

De las opciones que aparecen en el menú izquierdo:

derecho Analysis (para seleccionarlo)

derecho *derecho* en Analysis, y del menú que aparece, *derecho* Create Analysis

En las opciones que aparecen a la derecha escoger **Time vs. drawdown plot** con un *derecho*



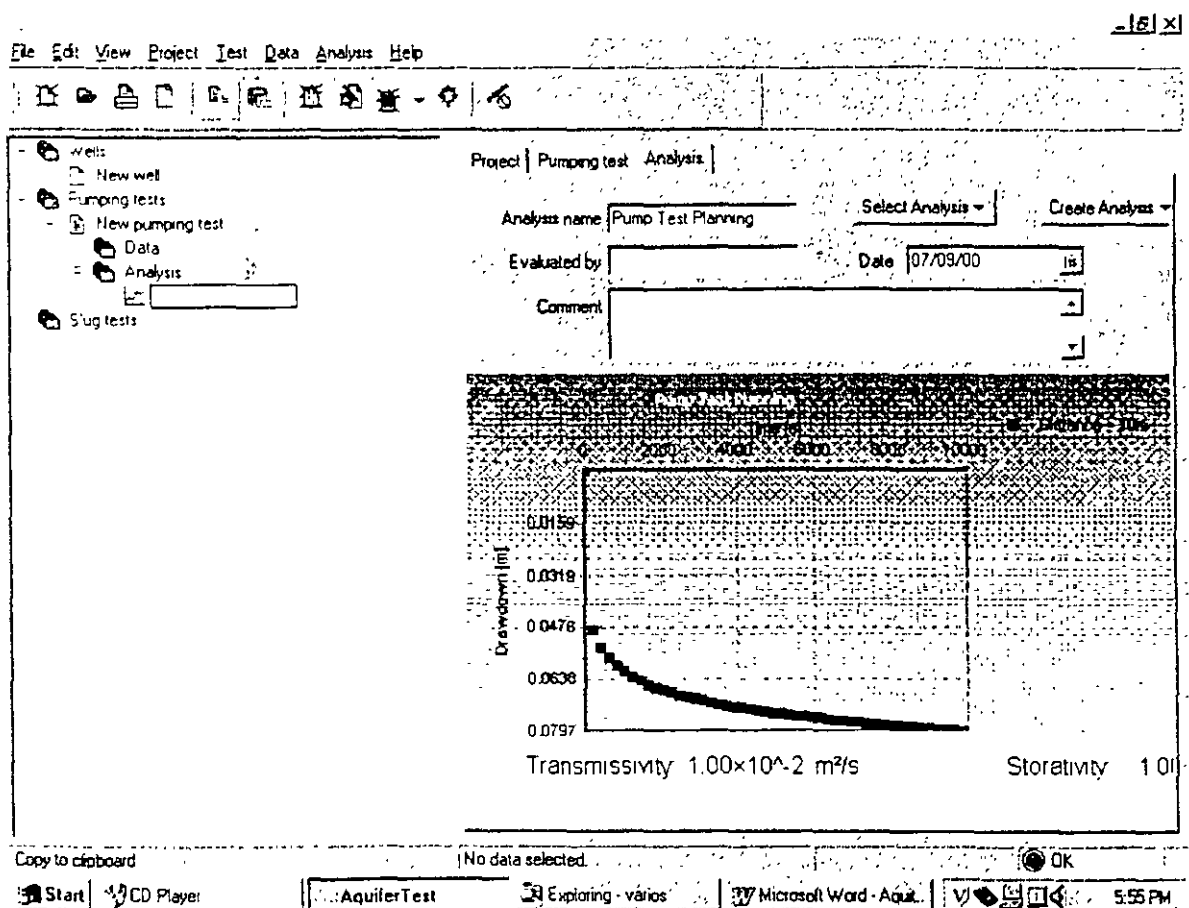
☞ Analysis (del menú superior)

☞ Method

☞ Predicted (Theis) (al final de la lista)

Por default, Aquifer Test mostrará una gráfica de abatimiento con tiempo a una distancia de 10 metros del pozo de bombeo.

Nótese que no se ha introducido al modelo ningún tipo de información de abatimiento respecto al tiempo para ver esta gráfica. Aquifer test crea una serie de datos "sintéticos" que corresponde al abatimiento característico por Theis (recuerdesé que estamos planeando una prueba de bombeo!)

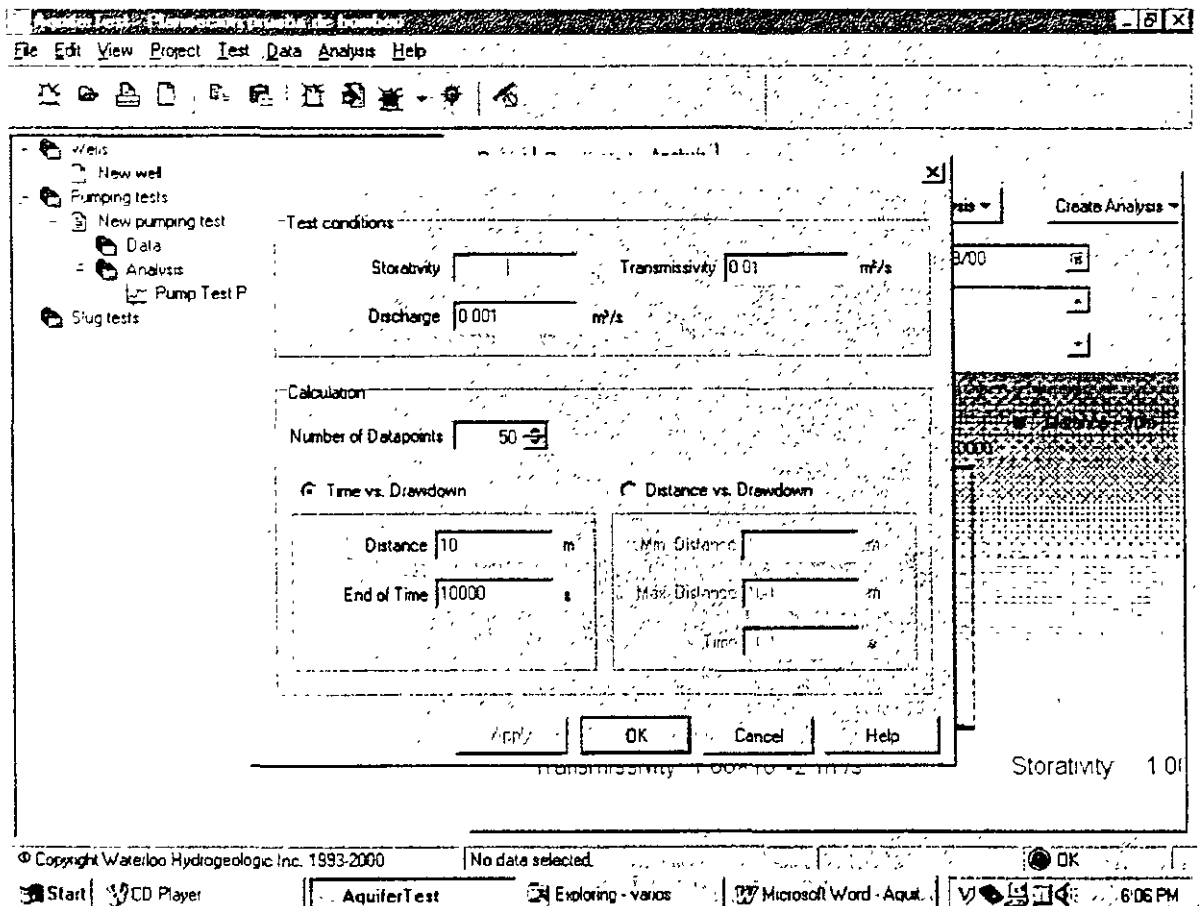


5. CAMBIANDO LAS CARACTERISTICAS DEL ANALISIS

Las características para la predicción de Theis observada en la última figura pueden ser editados para permitir hacer una evaluación de los efectos que pueden resultar en la planación de una prueba de bombeo.

☞ *derecho* en cualquier lugar de la gráfica

☞ settings



Nótese que en “Test Conditions” se requieren valores de almacenamiento, transmisibilidad y caudal. Con información acerca del sitio de estudio se puede estimar el orden de la transmisibilidad y el almacenamiento. Con estos valores estimados, se puede entonces variar el caudal hasta que se obtenga el abatimiento deseado a la distancia establecida.

En “Calculation” se define el número de puntos a ser calculados en la gráfica. También se puede escoger entre estudiar la gráfica de abatimiento vs. Tiempo, o abatimiento vs.

Distancia. Estas opciones permiten variar la distancia de los pozos de observación y el tiempo de la prueba de bombeo para ajustarlas a las condiciones reales del sitio.

Por ejemplo, en la mayoría de los casos, pozos ya existentes en el sitio de estudio son utilizados como pozos de monitoreo. Un pozo de monitoreo puede estar a 25 metros del pozo de bombeo y no a 10 metros como lo sugiere el modelo. Se puede sustituir el valor de 10 metros por el de 25 metros, y posteriormente se podrá observar el abatimiento esperado a una distancia de 25 metros del pozo de bombeo.

En esta ventana asegúrese de que se ha seleccionado tiempo vs. Abatimiento (Time vs. Drawdon).

En "Test Conditions" cambie la siguiente información:

Storativity 0.0001

Transmissivity: 0.01 m²/s (basado en $K=10^{-3}$ m/s; $b=10$ m)

Discharge: 0.001 m³/s (1 lps)

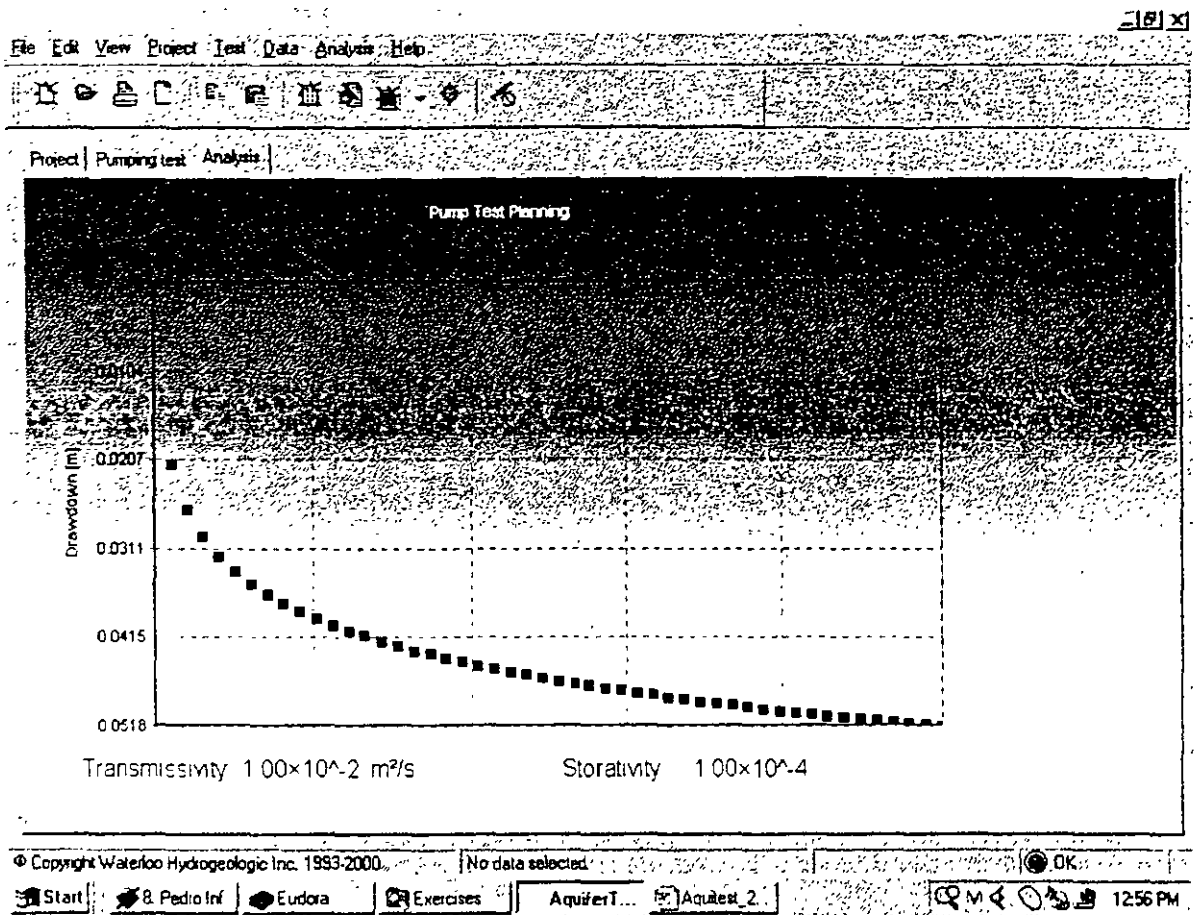
En "Calculation",

Distance: 10 m (al pozo de observación)

End of time: 300 seg (5 min)

OK

Para agrandar la gráfica se presiona CTRL-E, para regresar al modo normal se vuelve a presionar CTRL-E.



De acuerdo con esta gráfica, un caudal de $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$, producirá un abatimiento de aproximadamente 4.3 cm a los 2 minutos del inicio de la prueba, en el pozo de observación localizado a 10 metros de distancia. De esta manera, se satisface con este caudal el criterio que nos habíamos propuesto al principio del ejercicio

Analizemos ahora otra pregunta. ¿Qué tan lejos llegará el cono de depresión después de 2 días de bombeo? Esto nos indicará si podemos llegar a tener interferencia con otros pozos de bombeo cercanos.

Nuevamente haga $\sqrt{\wedge}$ derecho en cualquier lugar de la gráfica y seleccione

$\sqrt{\wedge}$ Settings

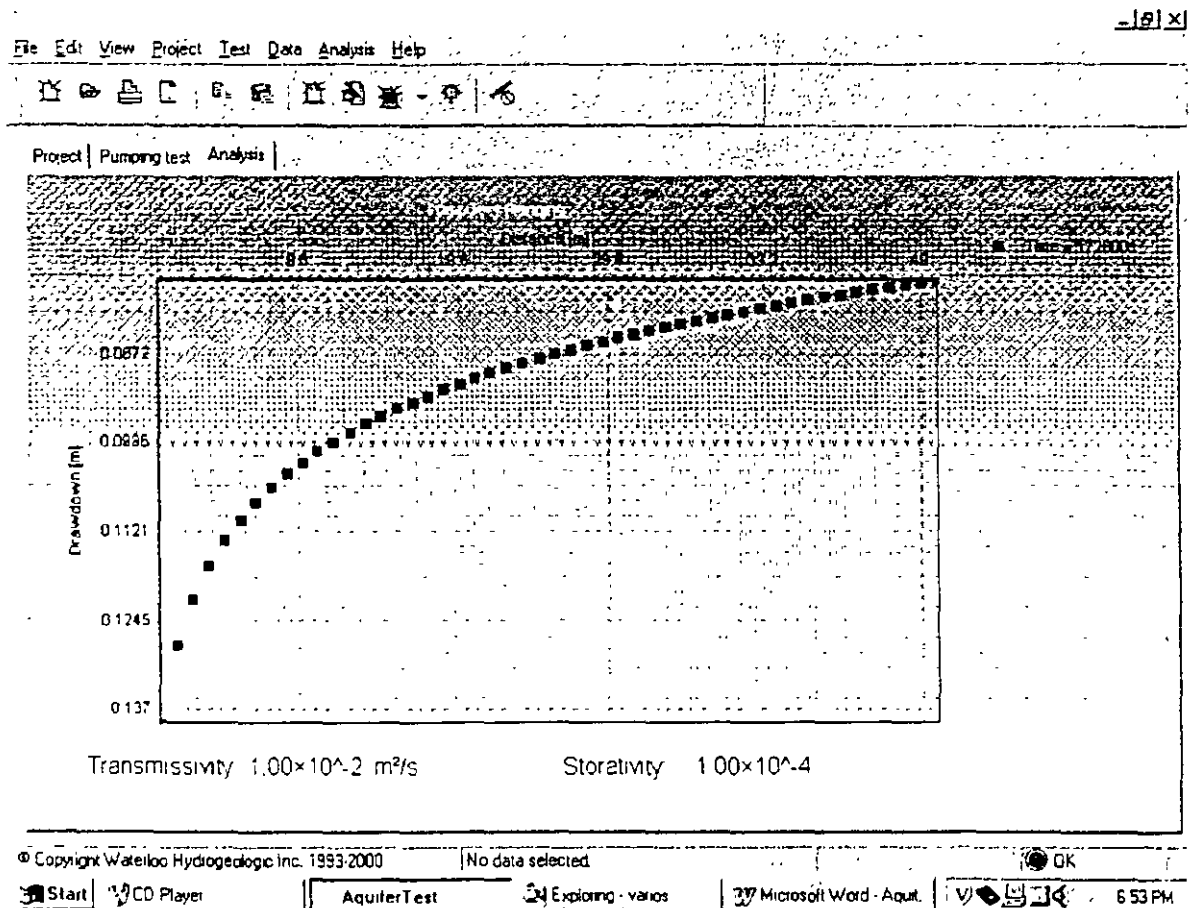
En "Calculation" $\sqrt{\wedge}$ Distance vs. Drawdown

Min Distance. 1 (metros)

Max Distance: 50 (metros)

Time. 172800 (segundos = 2 dias)

$\sqrt{\wedge}$ OK



En la figura se puede apreciar la extensión del cono de abatimiento de nuestro pozo de bombeo. Como se puede observar, la prueba de bombeo produce muy pequeños efectos a una distancia mayor de 50 metros. Si en este radio no existen pozos de bombeo, no existirá entonces ningún problema de interferencia.

Tecleando CTRL-E regresa a la imagen de la gráfica en pequeño.

Final del Ejercicio 1

EJERCICIO DE AQUIFERTEST VER.3.0

EJERCICIO 2: Analisis de una prueba de bombeo en acuífero confinado –

Theis analisis

1 CREAR NUEVO PROYECTO

☞ File (del menú superior)

☞ New Project...

En el **project name** escriba: “Ejercicio 2. Análisis de Theis”, y **DESELECCIONAR** la opciones de **Well** y **Pumping test** (estas opciones las añadiremos mas tarde).

☞ OK

2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE UNIDADES PARA EL PROYECTO

☞ Project (del menú superior)

☞ Units . (asegurese que son las mismas unidades que el ejercicio anterior)

☞ OK

3. CREAR NUEVOS POZOS

☞ Wells (del menú izquierdo)

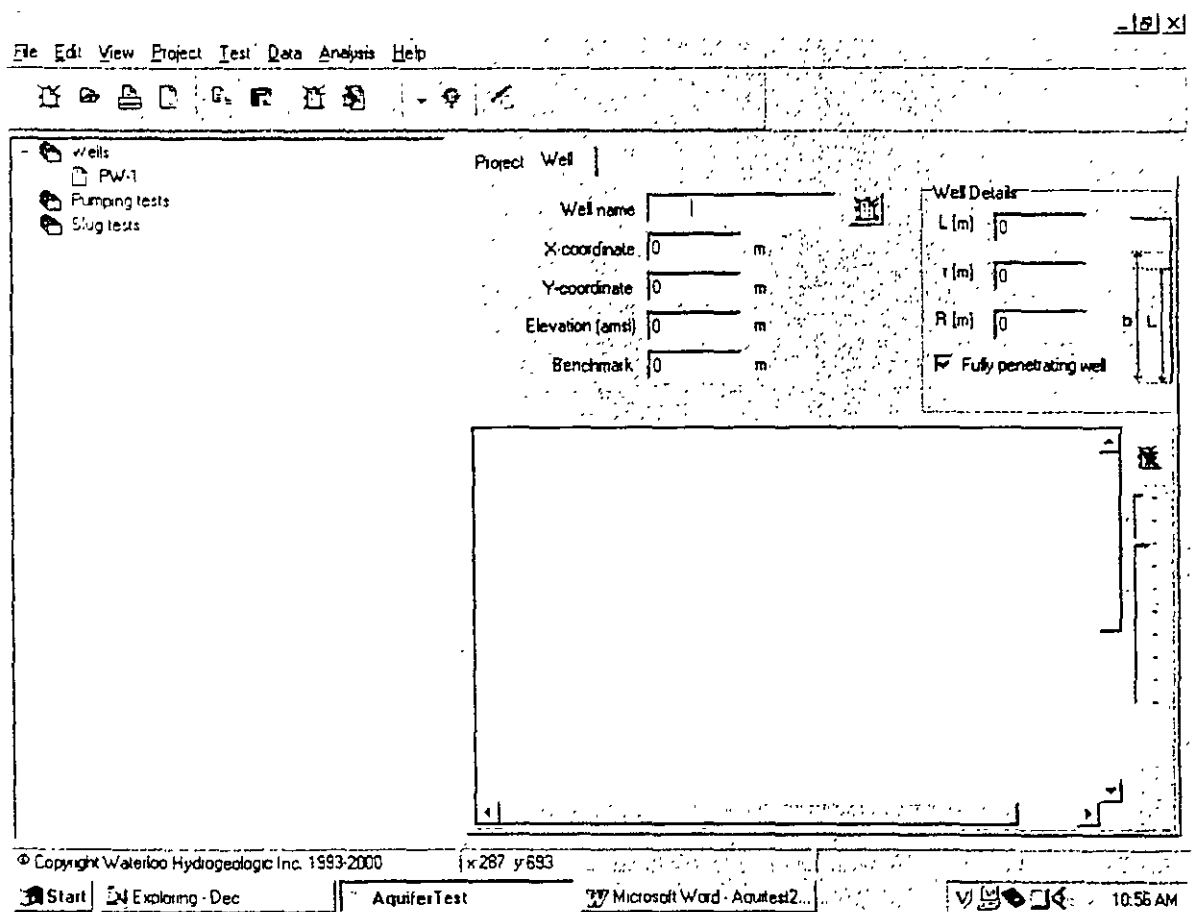
☞ *derecho* en Wells

☞ New Well (del menu que aparece)

Nombrar al pozo PW-1 (Well name)

☞ OK

aparecerá la siguiente pantalla:



Nuevamente

Wells (del menú izquierdo)

derecho Wells

New Well (del menu que aparece)

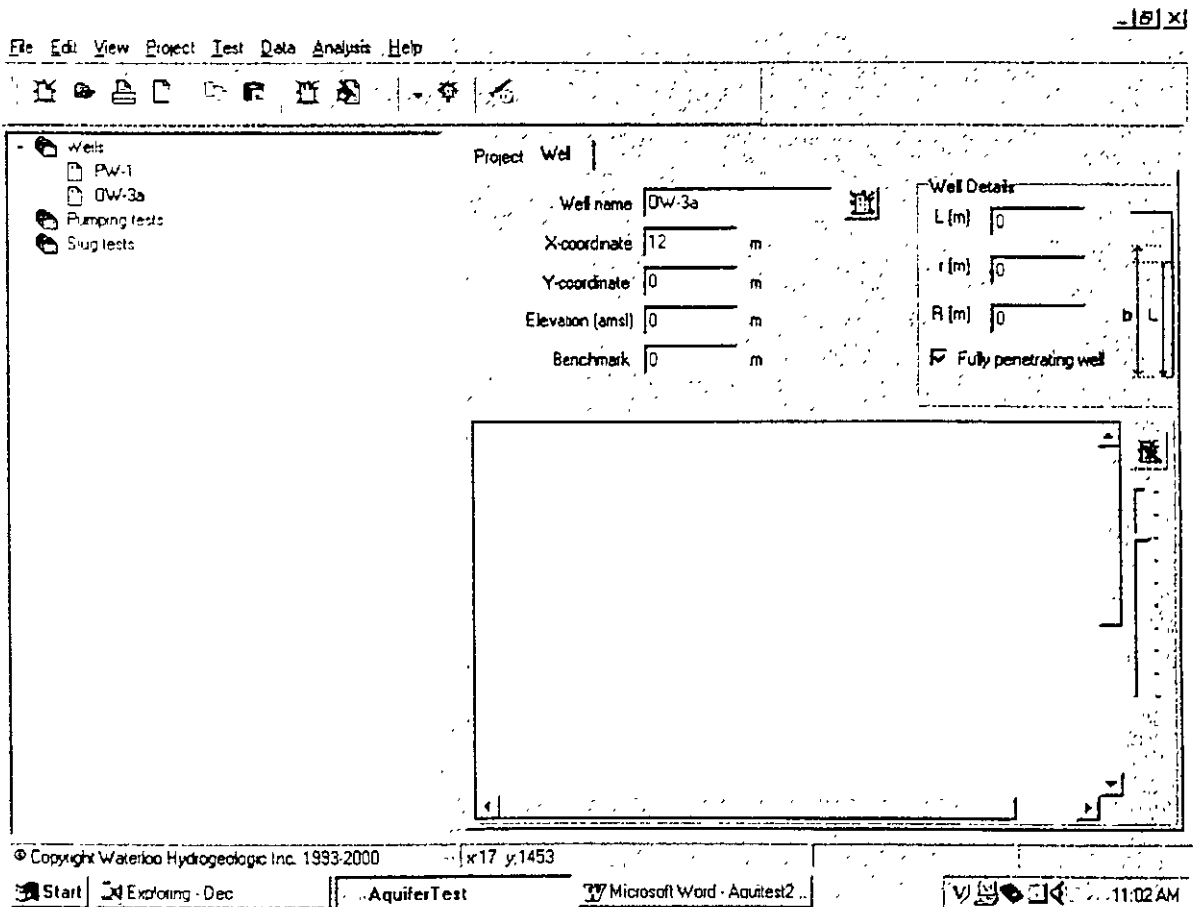
Nombrar al pozo OW-3a (Well name)

OK

agregar en

X coordinate. 12 (metres)

(El pozo PW-1 sera el pozo de bombeo, y el OW-3a el pozo de observación)



4. CREAR UNA PRUEBA DE BOMBEO

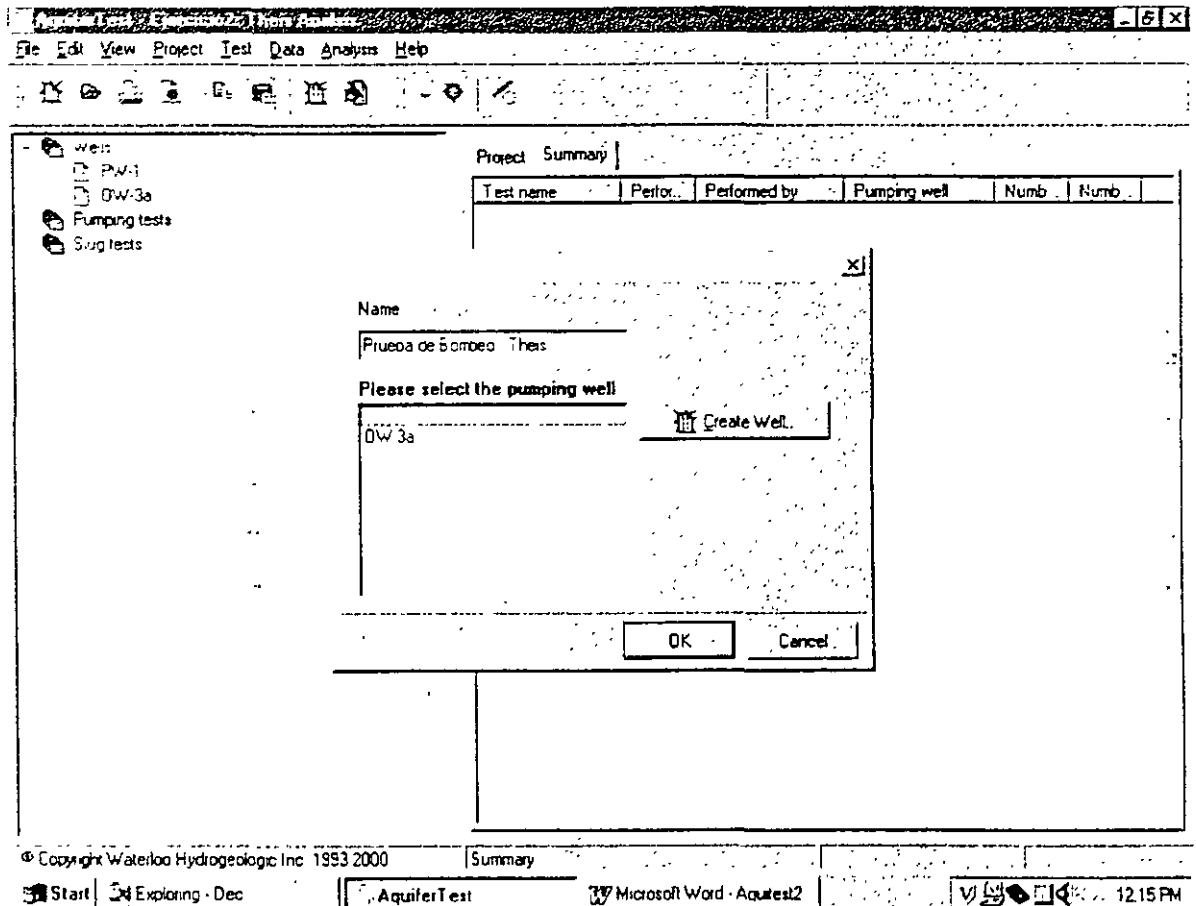
☞ Test (del menú superior)

☞ Create pumping test ..

En el nombre de la prueba (name) escribir: Prueba de Bombeo – Theis

☞ PW-1 (para seleccionarlo)

☞ OK



Llene la forma con la siguiente información:

Pumping Test name: Prueba de Bombeo – Theis (ya debe de estar automáticamente)

Perfomed by: <Escriba su nombre>

Date: <Escriba la fecha de la prueba de bombeo>

Time <Escriba la hora de inicio de la prueba de bombeo>

Pumping well. Asegurese de que el pozo PW-1 esté seleccionado

Discharge rate: seleccione **constant**, $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$

The screenshot shows the AquiferTest software interface. The menu bar includes File, Edit, View, Project, Test, Data, Analysis, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and analysis. The left sidebar shows a tree view with folders for Wells, Pumping tests, and Slug tests. The main window displays the following settings:

- Project: Pumping test
- Pumping test name: Prueba de Bombeo - Theis
- Performed by: Lus Lesser
- Date: 9/1/2002
- Time: 12:00 AM
- Saturated Aquifer thickness: 0
- Pumping well: PW-1
- Discharge rate: Constant (selected), 1.5 m³/s
- Pump time: Start Time: [empty], Stop Time: 1.1
- View/Create Data List: [button]

Below the settings is a table for data entry:

Time (s)	Discharge rate (m ³ /s)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

To the right of the table is a graph area with the y-axis labeled 'Discharge rate (m³/s)' and the x-axis labeled 'Time (s)'. The graph area is currently empty. The status bar at the bottom shows the copyright information for Waterloo Hydrogeologic Inc. (1993-2000) and the taskbar with the Start button, the current user '15 Pedro Infante - D.', the application name 'AquiferTest', the location 'Eudora', and the open file 'AquiferTest_2002_3 do...'. The system clock shows 2:24 PM.

5. CREAR UN NUEVO GRUPO DE DATOS

☞ Prueba de Bombeo – Theis (menú izquierdo)

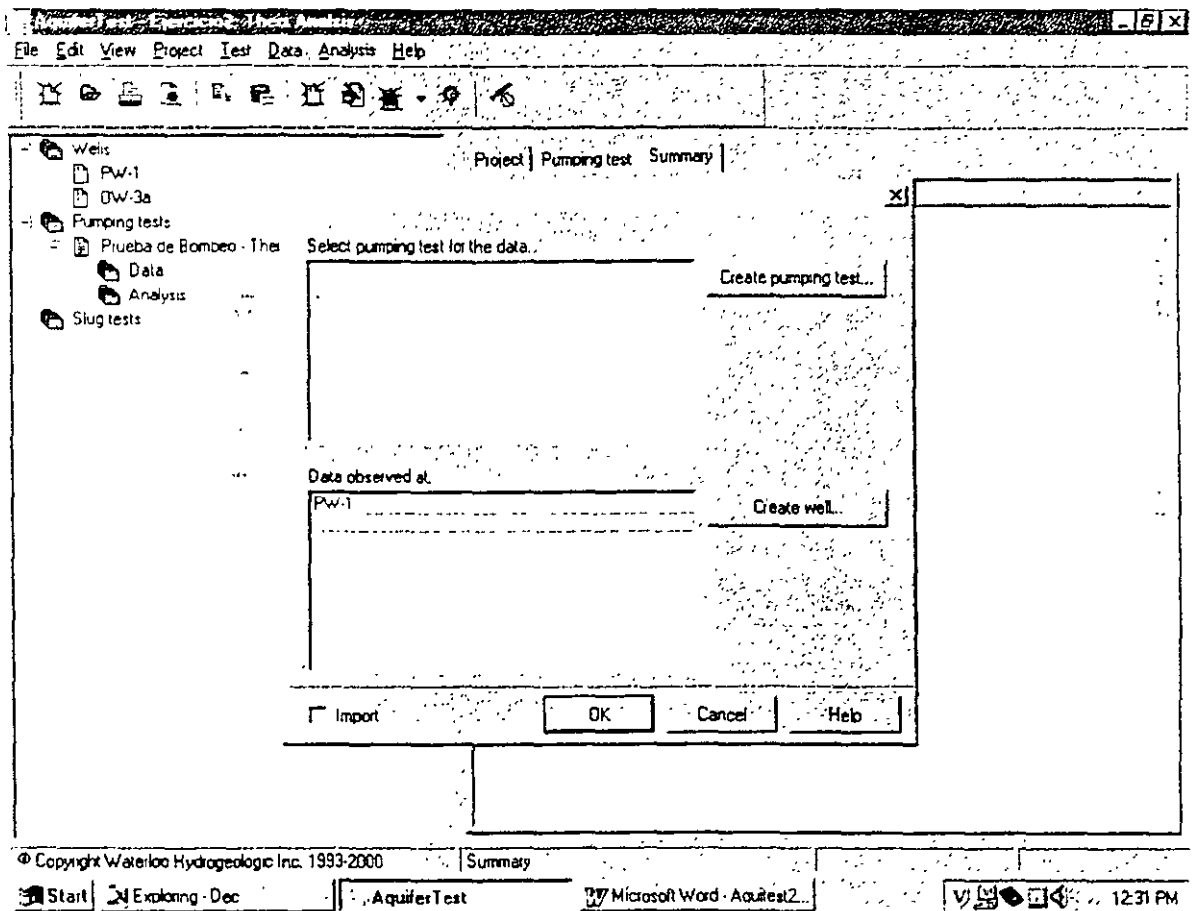
☞ data

☞ *derecho* data

☞ Create Datalist... (del menú que aparece)

☞ OW-3a (en el cuadro inferior)

☞ OK



Llenar con la información que aparece en la siguiente figura. Se puede utilizar <enter> para pasar al siguiente espacio de información.

Nótese que estos valores son profundidades al nivel estático, que es el valor que generalmente se obtiene en campo en las pruebas de bombeo.

The screenshot shows the AquiferTest software interface. The menu bar includes File, Edit, View, Project, Test, Data, Analysis, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and analysis. The left sidebar shows a project tree with folders for Wells (PW-1, DW-3a), Pumping tests (Prueba de Bombeo - Tests, Data, DW-3a, Analysis), and Slug tests.

The main window displays the 'Project | Pumping test | Data' view for 'DW-3a, Time-Water level'. It includes input fields for 'Depth to static WL' (0 m) and 'b' (0 m). A diagram of a well is shown to the right. Below the input fields is a data table with columns for Time (s), Depth to WL (m), and Drawdown (r). To the right of the table is a graph with 'Depth to WL (m)' on the y-axis and 'Time (s)' on the x-axis.

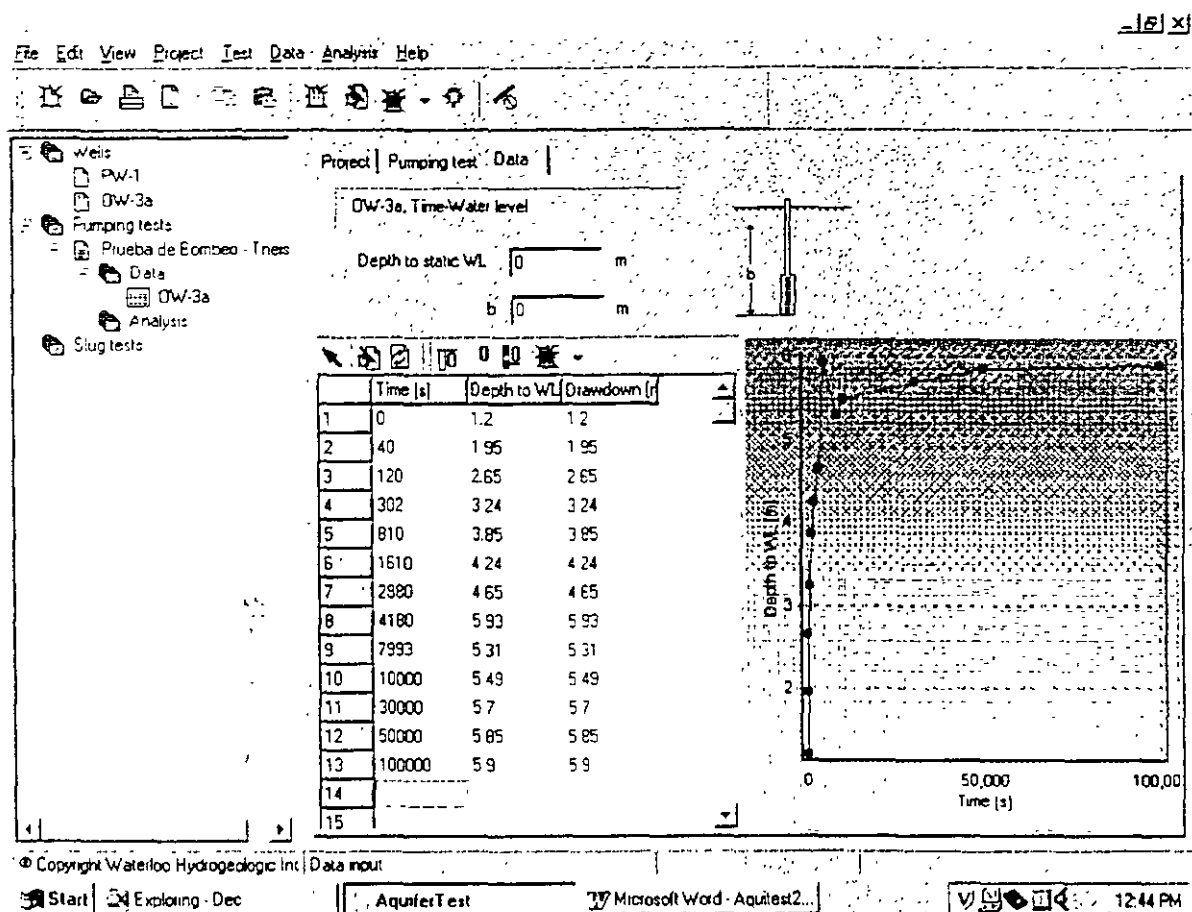
	Time (s)	Depth to WL (m)	Drawdown (r)
1	0	1.2	
2	40	1.95	
3	120	2.65	
4	302	3.24	
5	810	3.85	
6	1610	4.24	
7	2980	4.65	
8	4180	5.93	
9	7993	5.31	
10	10000	5.49	
11	30000	5.7	
12	50000	5.85	
13	100000	5.9	
14			
15			

The status bar at the bottom shows 'Copyright Waterloo Hydrogeologic Inc. 1993-2000', 'Data input', and the taskbar with 'Start', 'Exploring - Dec', 'AquiferTest', 'Microsoft Word - AquiferTest2', and the time '12:40 PM'.

☞ *derecho* en cualquier lugar de la tabla

☞ Refresh graph (hasta abajo del menú que aparece)


La siguiente gráfica aparecerá





Esto también se puede hacer presionando la tecla F5, o el icono de **Refresh graph** que está arriba de la tabla. Busque cual es el ícono moviendo el mouse por los diferentes iconos en la parte superior de la gráfica y leyendo la función que aparece, *sin presionar el mouse*.


También, para poder apreciar la gráfica mejor, se puede colocar el mouse entre el menú izquierdo y la porción de los datos y mover la separación cuando el símbolo del mouse se convierta en ☞ Asimismo se puede ampliar el tamaño de la gráfica con respecto a la tabla con el mismo procedimiento.


6. MODIFICANDO UN GRUPO DE DATOS

De la gráfica se puede apreciar que un valor parece estar mal, de los iconos que estan arriba de la tabla,  en la flecha (**select measurement values**).

En la tabla de valores,  en el valor con tiempo de 4180 segundos.

 derecho en el valor.

 Delete (del menú que aparece)

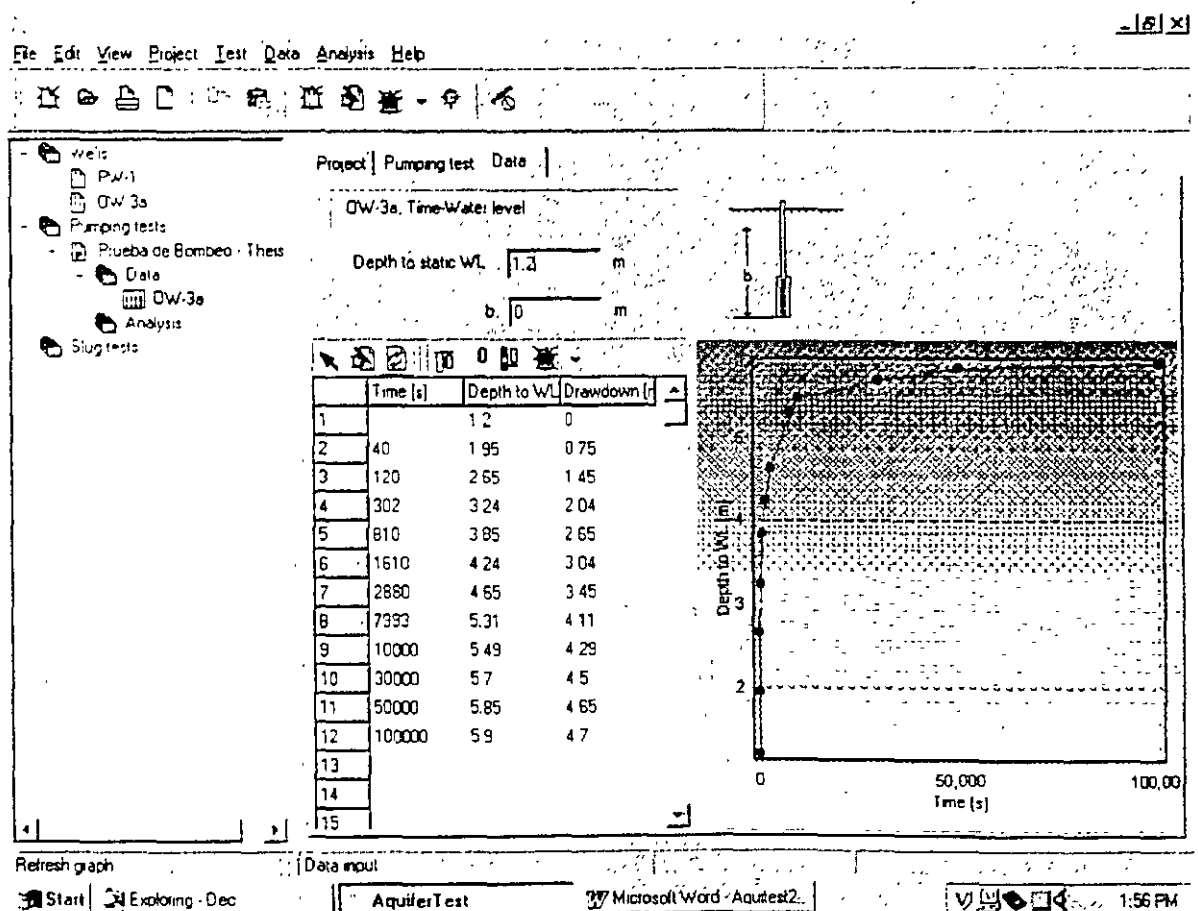
 Yes (para confirmar)

La gráfica se modificará automáticamente.

Ahora agregaremos el nivel estático al inicio de la prueba de bombeo

En **Depth to Static WL** (arriba de la tabla) escriba 1.2 (metros)

Nuevamente haga un **refresh graph** con el icono o con F5, y obtendrá una figura como la siguiente. Nótese, que los abatimientos han sido corregidos tomando en cuenta el nuevo nivel estático.



7. CREAR UN NUEVO ANALISIS

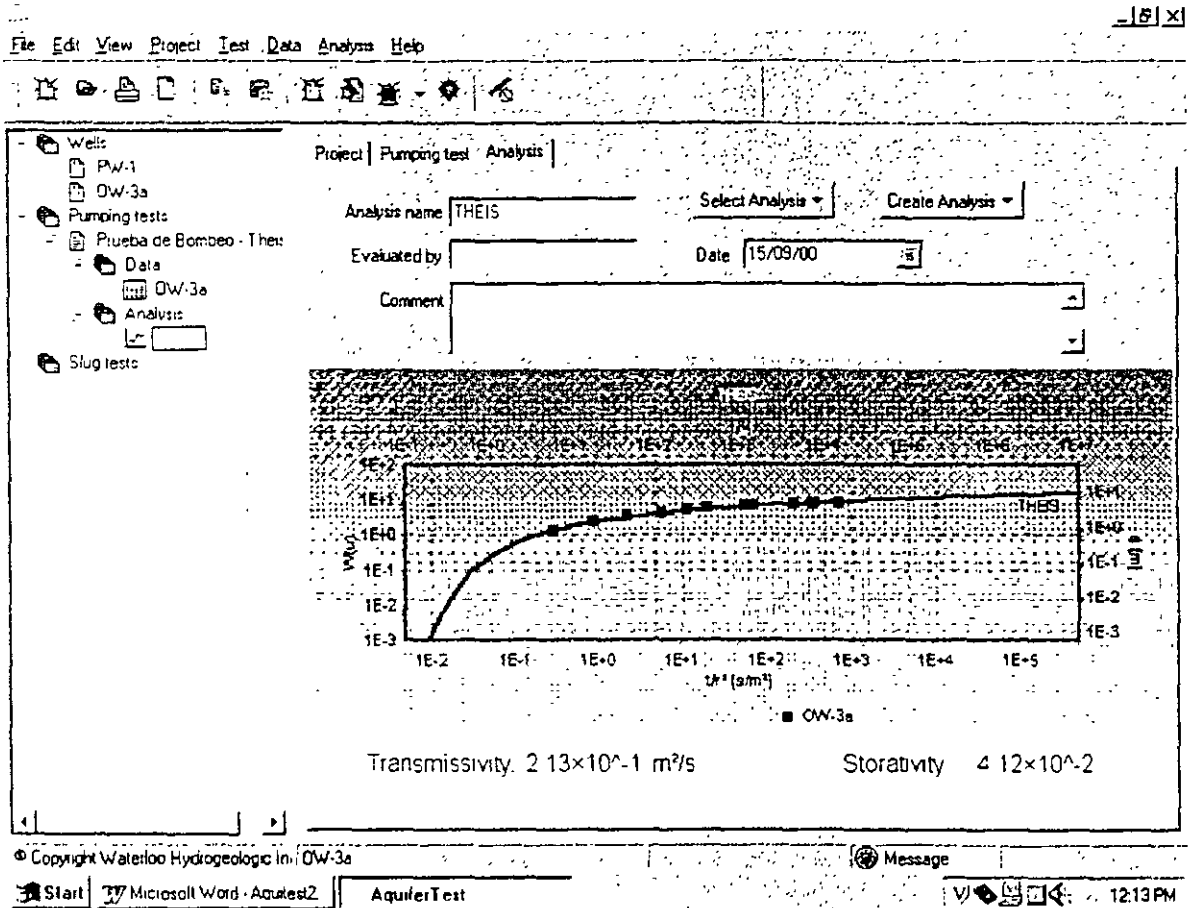
En el menú izquierdo, dentro de Prueba de bombeo – Theis, seleccionar

☞ analysis

☞ *derecho* en analysis

en Create Analysis, ☞ en Theis

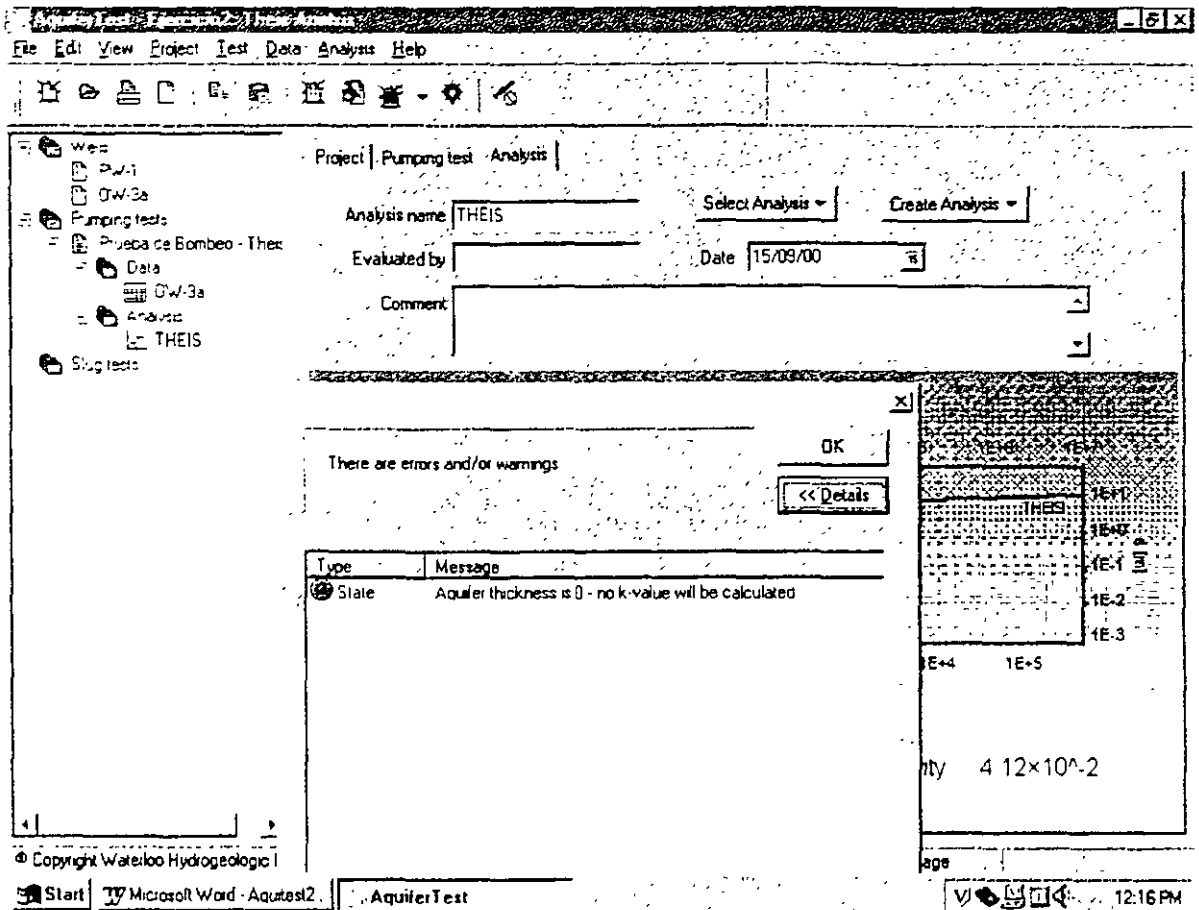
aparecera la siguiente gráfica:



Nótese que la leyenda aparece del lado dercho, para que aparezca en la parte de abajo haga un ☞ *derecho* en cualquier lugar de la gráfica, ☞ properties del menú que aparece y en Legend, seleccionar Bottom, y ☞ OK

Nótese también en la parte inferior aparece la palabra "message"

☞ en el círculo verde, y ☞ en details:



Este mensaje nos informa que no hemos dado un espesor del acuífero y por lo tanto no se calcula la conductividad hidráulica (K) sino únicamente la transmisibilidad (T).


Recuérdese que $K=T/b$, donde b es el espesor del acuífero.

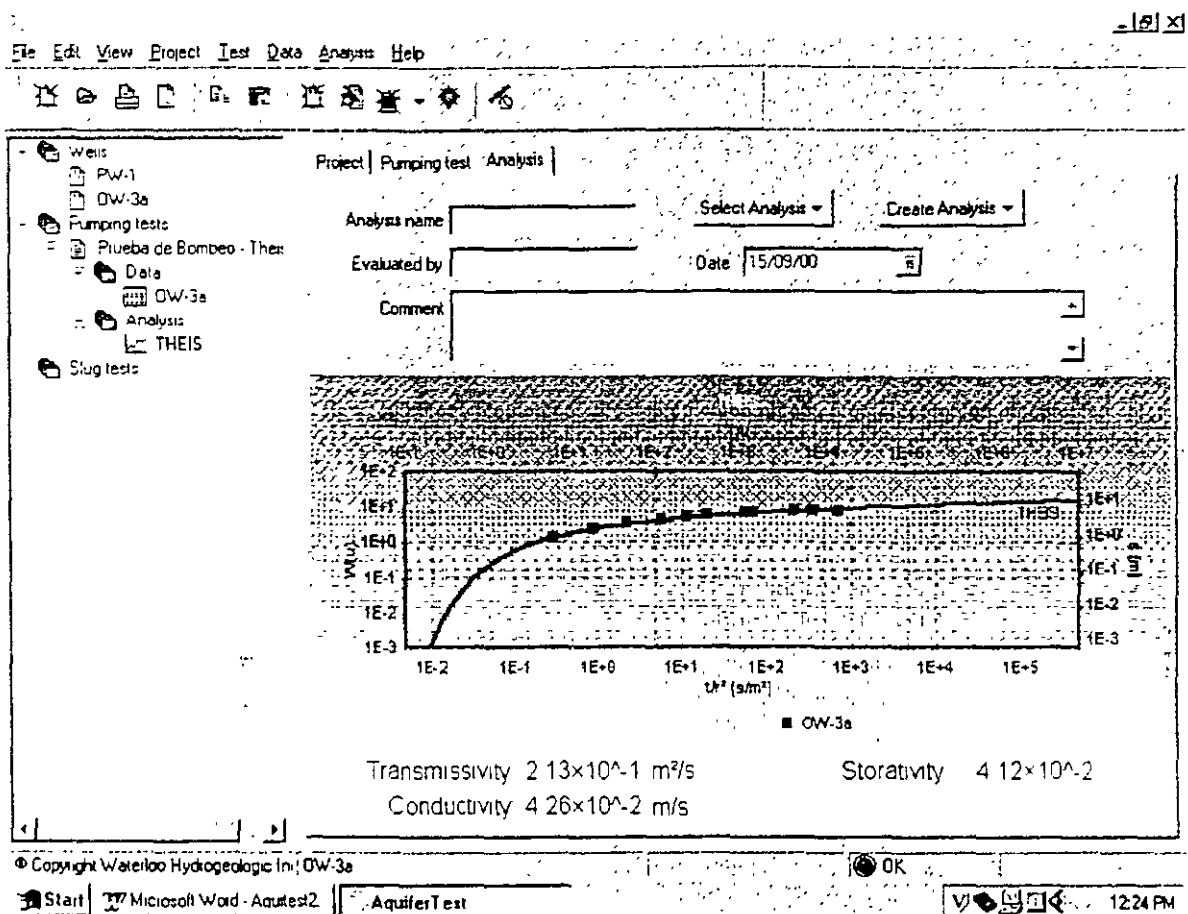
☞ OK

En las pestañas en la porción superior derecha de la pantalla seleccionar

☞ en **Pumping test**

En **Saturated aquifer thickness**, escribir: 5 (metros)

Regresar a la sección de resultados dando un  en la pestaña de **Analysis**. Esta vez verá calculada una conductividad hidráulica (approx. 4.3×10^{-2} m/s), como se ve en la siguiente gráfica:



Nótese que ahora en la sección de mensajes dice: OK Existen 4 mensajes que Aquifer Test puede dar:

Error (color rojo)

Warning (color amarillo)


Message (color verde)

O K (color verde fuerte)

Por los general los errores son producidos por falta de información en algún menú.

La gráfica puede agrandarse con <CTRL-E> o por medio del menú superior

 View


 Enlarge graph (y de la misma manera se puede regresar a la pantalla normal)

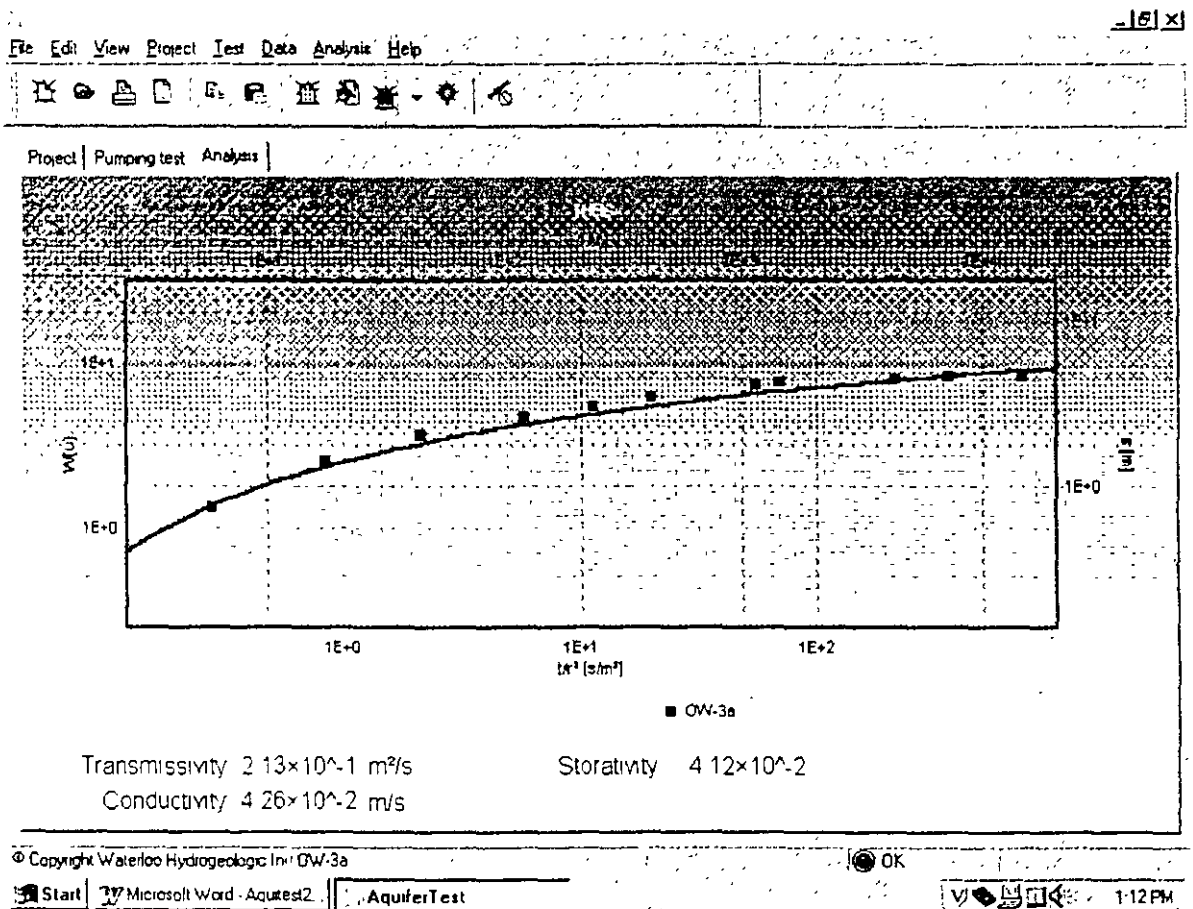
Aquifer test produce una estimación de la mejor curva de Theis para los datos basado en un método de cuadrados mínimos (least squares fit).


Los resultados obtenidos deben ser aproximadamente:

- Transmisibilidad (transmissivity): $2.13 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
- Coefficiente de almacenamiento (Storativity): 4.12×10^{-2}
- Conductividad hidráulica (Hydraulic conductivity): $4.26 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

8. ZOOM

Para hacer un zoom dentro de la gráfica se necesita posicionar el mouse en la esquina superior izquierda del area en que se quiera el zoom,  y *sin soltar el botón* colocarse en la esquina inferior derecha de la que se quiere hacer el zoom. Haga un zoom en la porción de los datos como se ve en la siguiente grafica.



Para ver nuevamente todos los datos hacer  en cualquier lugar de la gráfica, y *sin soltar el botón* moverlo tratando de hacer un recuadro hacia arriba y a la izquierda, al soltarlo, se mostrarán nuevamente la gráfica completa.

9 AJUSTE DE DATOS “A MANO”


Por lo general es necesario ajustar los datos a la curva de Theis “a mano” tomando en cuenta el juicio profesional. Ya sea por que problemas durante la prueba de bombeo hacen más o menos válida cierta porción de los datos, o por que sencillamente, la calibración automática no parece ser la mejor para los datos obtenidos

Los datos se pueden mover de arriba abajo y derecha a izquierda utilizando las flechas del teclado. Trate de mover los datos. Nótese que al mover la gráfica a la izquierda o derecha, únicamente se modifica el coeficiente de almacenamiento.

Presione <CTRL-E> para regresar a una vista normal.

10 OTROS ANALISIS

Aquífer test permite visualizar otro tipo de soluciones fácilmente.

 Select analysis (arriba de la gráfica)

Aquí aparecen otros métodos de interpretación de pruebas de bombeo. Intente algún otro método y analise los resultados.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
EJERCICIO DE MODELACIÓN DE :
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE ANÁLISIS
QUÍMICOS

EXPOSITOR: ING. DAVID GONZÁLEZ POSADAS
M. EN I. LUIS ERNESTO LESSER C.
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

EJERCICIO DE AQUACHEM VER.3.7

AquaChem es un programa de visualización gráfica de resultados geoquímicos. AquaChem también cuenta con una interface para correr el programa de especiación PHREEQC. Este programa calcula índices de saturación y modela la disolución/precipitación de minerales en agua.

Varios programas de saturación y especiación, incluyendo PHREEQC y WATEQF4 son de dominio público y pueden ser obtenidos sin costo alguno del website de la USGS (<http://water.usgs.gov/>).

- ☞ ☞ en el ícono de AquaChem
- ☞ cancel (en la ventana que aparece)
- ☞ File (del menú superior)
- ☞ New

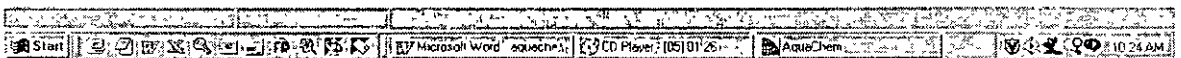
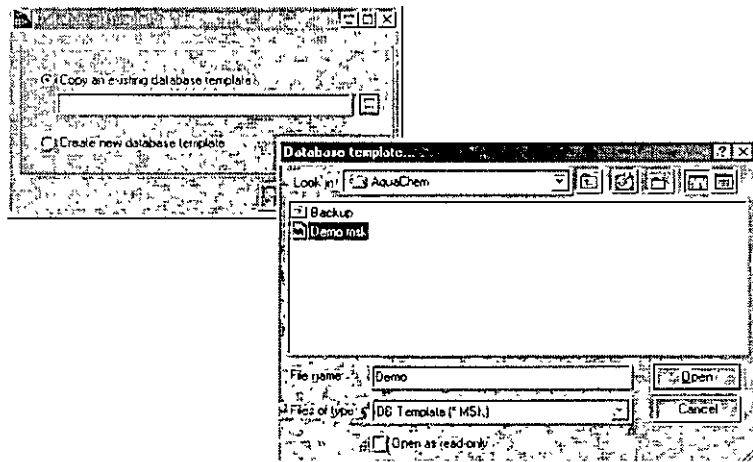
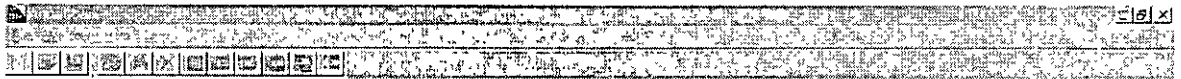
llame al nuevo trabajo: Ejercicio1

y ☞ en Save

En la ventana que aparece seleccionar la opción superior “Copy an existing data base template”, y ☞ en el ícono derecho que tiene los puntos suspensivos. Dar un ☞ en el archivo DEMO.MSK (C:\WHI\AquaChem\Demo.msk)

☞ Open

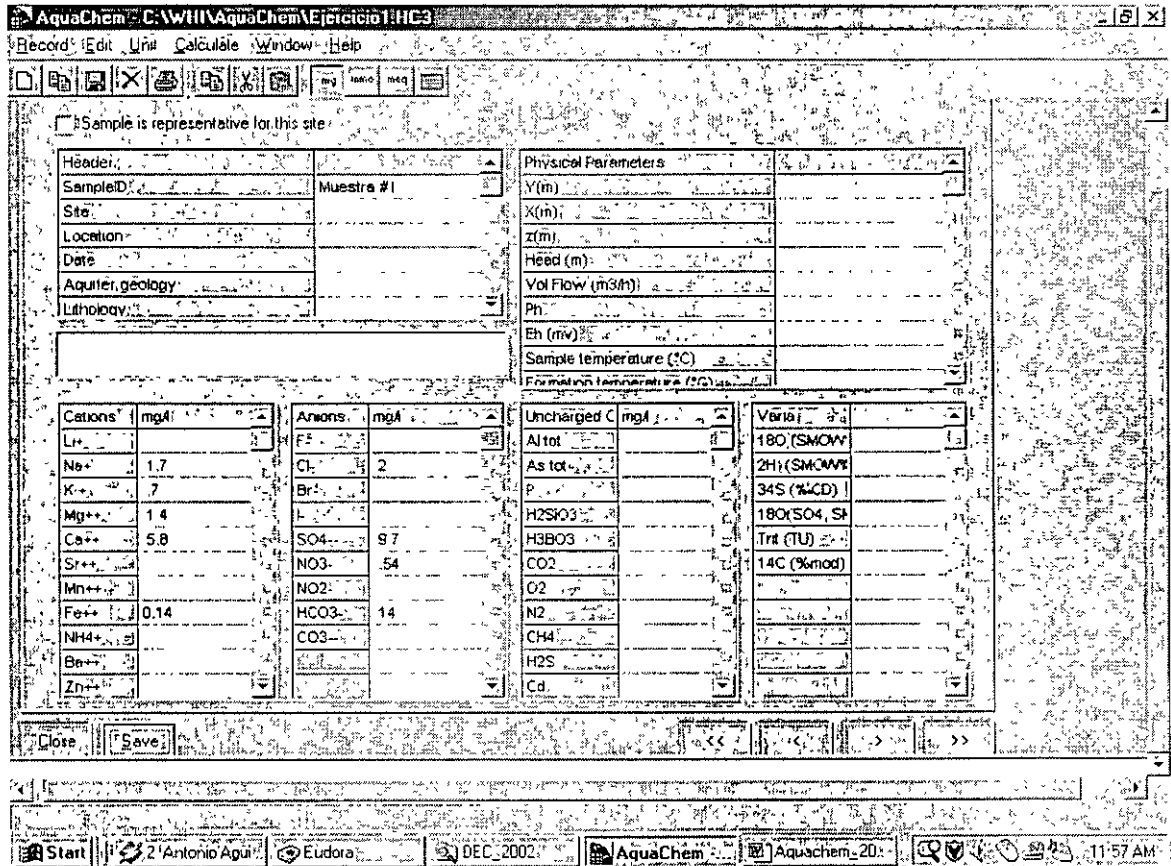
☞ OK



☞ Records (del menú superior)

☞ New

Llenar la tabla que aparece con la siguiente información:



☞ SAVE (muy importante)

☞ Close

En la pantalla azul se verá el nombre de la muestra que se acaba de almacenar, y el tipo de agua (mixta).

De la misma manera capture las muestras que aparecen en la siguiente tabla. Note que no es necesario cerrar la tabla (⌘ Close) entre muestras, pero se debe de salvar cada muestra (⌘ SAVE) y teclear nuevamente ⌘ Records y ⌘ New.

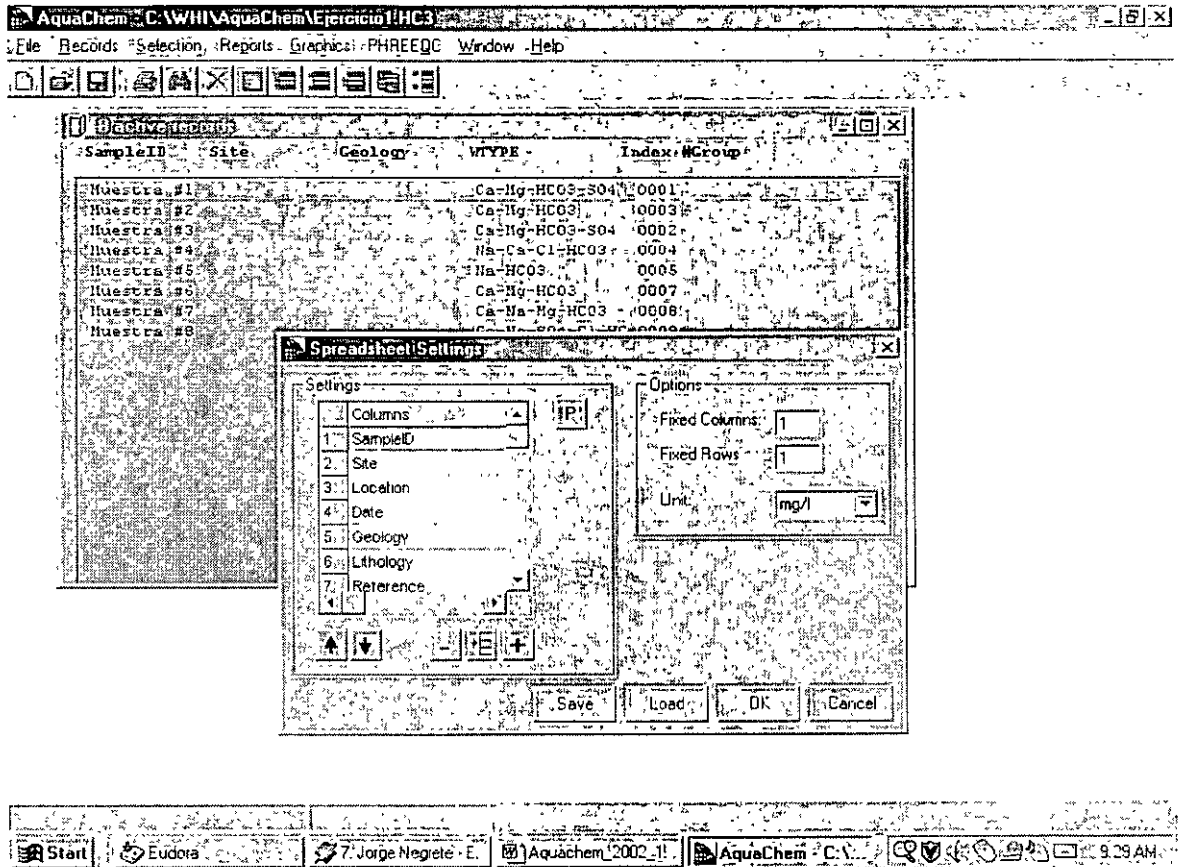
Muestra #	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Fe ⁺²
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	5.8	1.4	1.7	0.7	14	9.7	2	0.54	0.14
2	36	8.1	6.5	1.2	119	22	13	0.1	0.02
3	92	34	8.2	1.4	339	84	9.6	13	0.09
4	96	27	183	18	334	121	280	0.2	0.2
5	3	2.4	215	9.8	549	11	22	0.52	0.08
6	16	3.9	3.7	1.3	60	9.7	2.5	0.18	0.25
7	4.3	1.3	3.4	1.2	22	3	2.4	0.3	0.05
8	104	23	112	6.6	178	228	164	--	--

Debe de notarse que estos datos están en mg/L. También se pueden dar los datos en mmol/L o mEq/L, solo hay que seleccionar el ícono correspondiente en la porción superior de la pantalla. Para una muestra a la que ya se le han dado los datos, al escoger otras unidades se transformarán los datos a las unidades seleccionadas. Intente cambiar las unidades de los datos que a capturado.

Para revisar que no haya habido errors al capturar:

☑ Records (del menú superior)

☑ View as spreadsheet



Esta pantalla nos da la opción para seleccionar que parametros queremos ver en forma de tabla. Son demasiados los que estan listados, asi que seleccione los que no necesitamos y de un ☑ en el ícono que tiene el signo menos (-). Esto borrará los parametros que no capturamos. Cuando esten todos los parámetros que deseamos ver en la tabla ☑ en OK. Revise los datos para corregir algún error

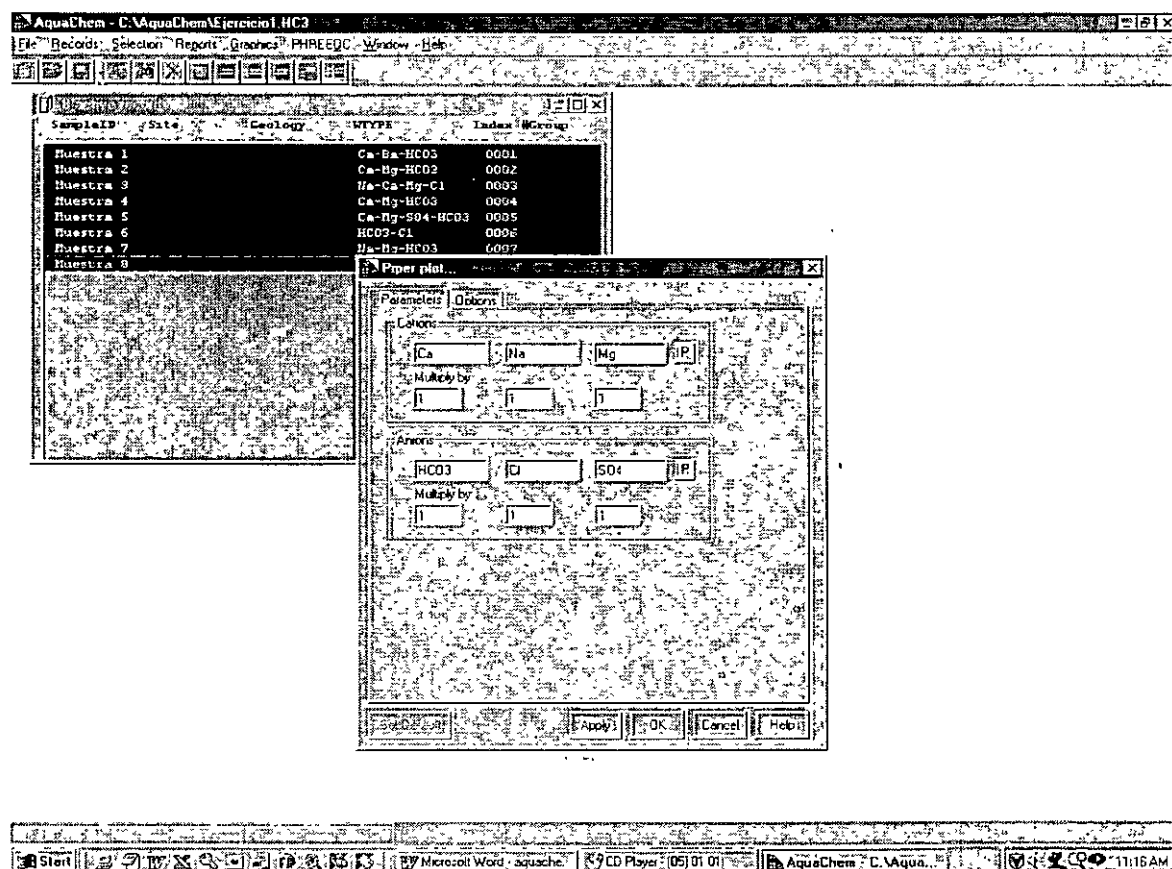
Para ver las diferentes representaciones gráficas:

☞ Graphics (del menú superior)

☞ New

aparecerán las distintas opciones gráficas con que AquaChem cuenta, incluso las que por falta de datos no puedan representarse. Trate de ver las diferentes representaciones gráficas de los datos.

Antes de ver cada gráfica aparece una ventana como la siguiente en el caso de la gráfica de Piper:



En estas ventanas se puede modificar, si se desean, los parámetros de cada gráfica, o los factores relativos para representarlos. Por lo general estas gráficas tienen por default los parámetros y valores mas comunmente usados.

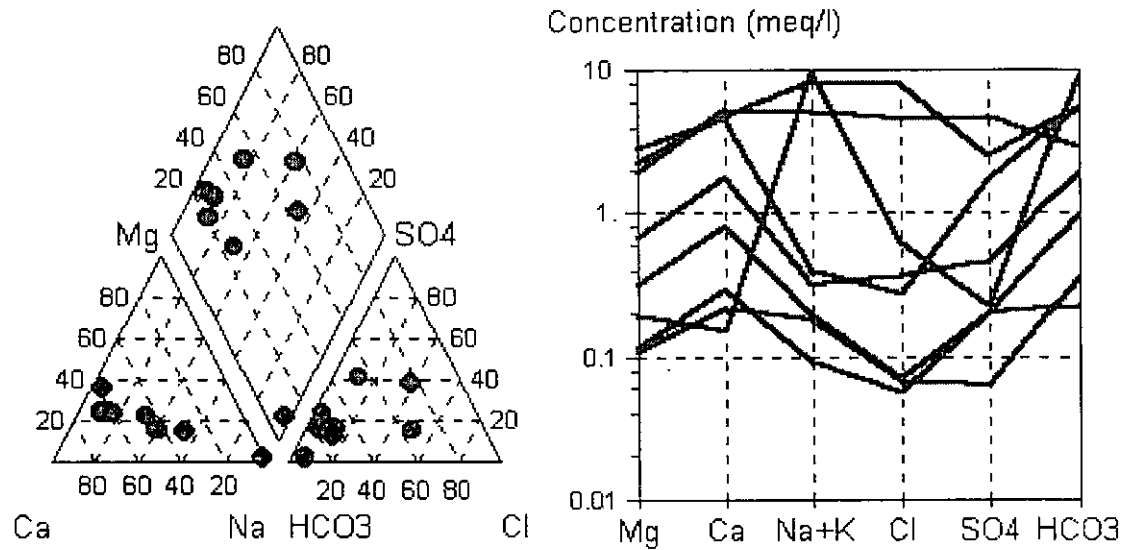
OK

para ver la gráfica, o

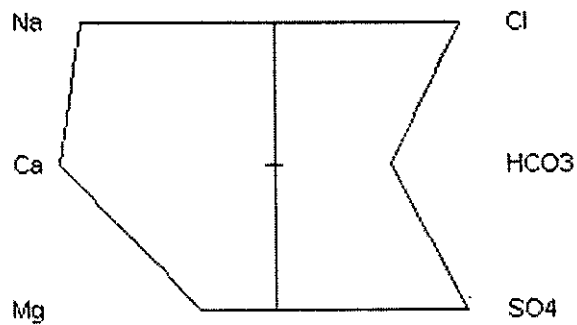
Apply

si se hicieron cambios.

Las gráficas mas comunes en geohidrología son: Piper, Stiff y Schoeller.



Muestra #8



Para seleccionar una sola muestra $\text{Ctrl} + \text{Click}$ en la muestra. Para visualizar varias muestras se pueden seleccionar utilizando Shift y Click en 2 muestras distintas, todas las muestras entre esas 2 serán seleccionadas. También se puede utilizar Ctrl y Click en varias muestras distintas, todas las muestras en que se Click serán seleccionadas.

Para distinguir las muestras podemos asignarles distintos símbolos:

Click en cualquier muestra de la ventana "active records"

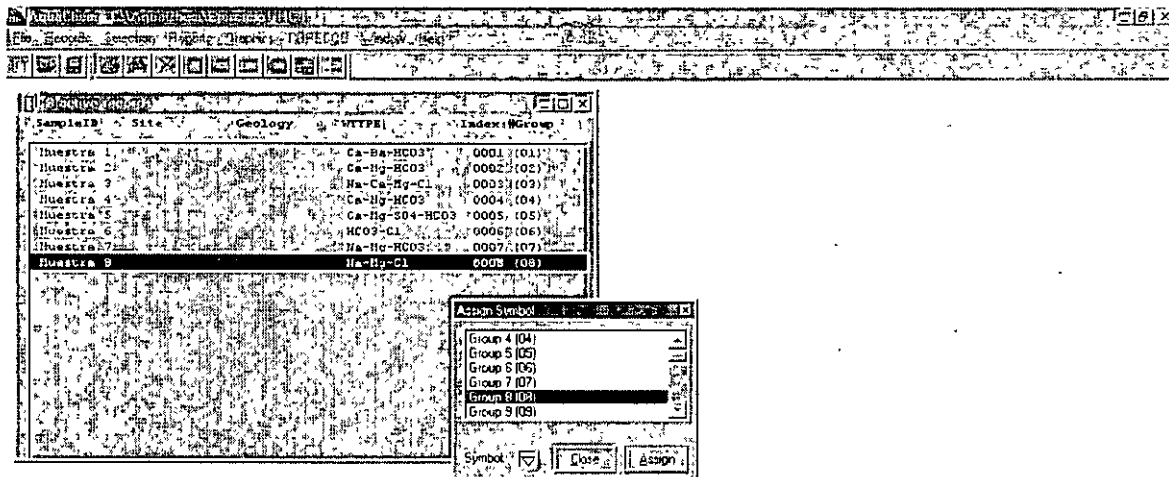
Click derecho en la muestra

Click assign to symbol

escoger algun número/símbolo dando un Click

Click assign

Click close



Hacer lo mismo con cada muestra y vuelva a ver el gráfico de Piper o el Ternary.

Para agregar una leyenda:

☞ Graphics (del menú superior)

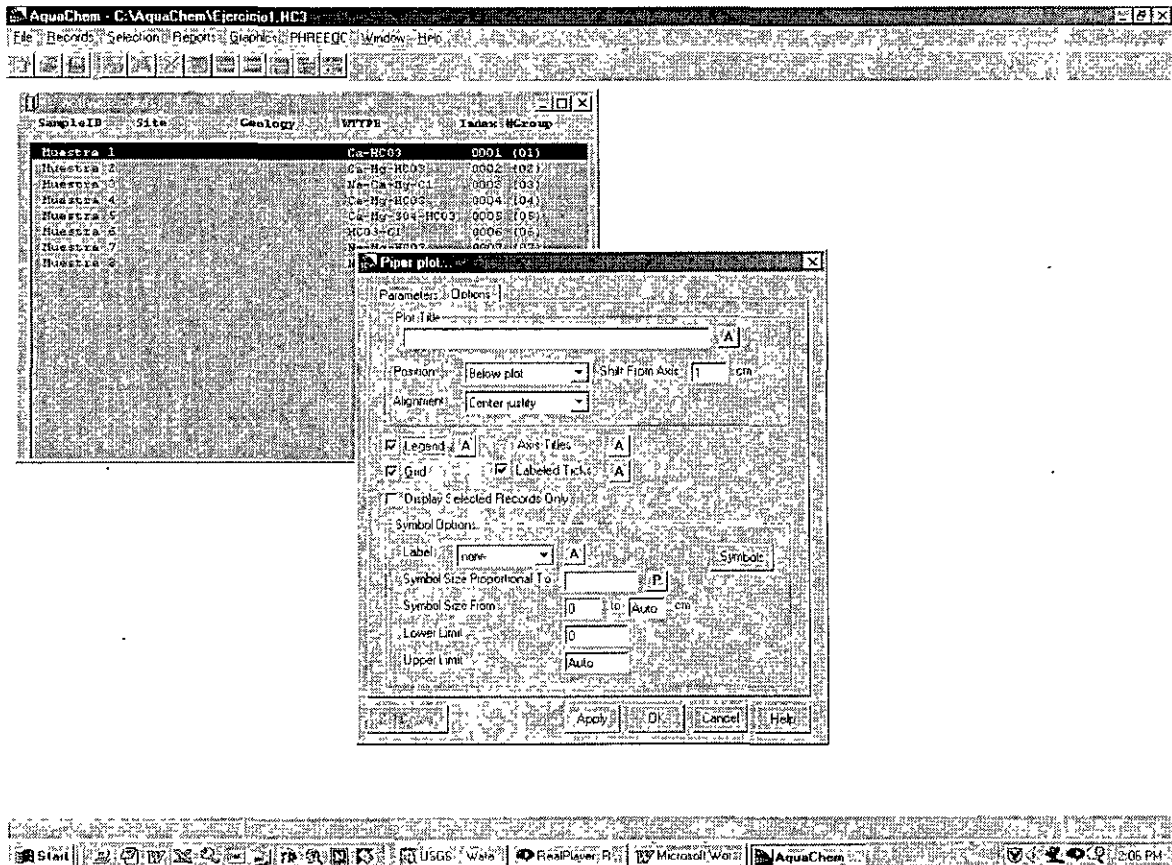
☞ New

☞ Piper

en la ventana ☞ en la pestaña de “options”.

Seleccionar “legend” haciendo un ☞ en el recuadro

☞ OK



Nótese que se pueden asignar varias muestras al mismo grupo, si el propósito es separar 2 tipos de muestras

Para cambiar el tipo de línea para otros diagramas como el de Schoeller:

☞ Graphics (del menú superior)

☞ Define symbol or line

☞ en la pestaña “conecting line”

aquí se pueden modificar los tipos de línea.

Haciendo uso de estas opciones, se pueden modificar las gráficas para darles el terminado deseado.

Para copiar las gráficas en reportes:

☞ Edit (del menú superior)

☞ Copy graph

Al hacer eso la gráfica se guarda en memoria. Si se abre Word, se puede pegar utilizando el comando ‘Paste’.

Otros resultados que nos da este programa se pueden obtener:

☞ Reports (del menú superior)

☞ General

Aparece una ventana que da información general de las muestras. Incluyendo:

- un balance de cargas, por lo general este balance debe de ser menor de 5%. Confirme que es así en todas las muestras (resultados de otras muestras pueden obtenerse presionando los íconos [$<$] y [$>$])
- cálculo de sólidos totales disueltos, dureza y alcalinidad
- un resumen de los datos geoquímicos en distintas unidades

AquaChem - C:\WHI\AquaChem\Ejercicio1\HC3

File Edit Window Help

General Information: Muestra #1

```

SampleID      : Muestra #1
Location      :
Site          :
Sampling Date : 3/17/1626
Geology       :
Watertype     : Ca-Mg-HCO3-S04

Sum of Anions (meq/l) : 0.4966
Sum of Cations (meq/l) : 0.5015
Balance:         : 0.49%

Calculated TDS(mg/l) : 28.1

Hardness      : meq/l    °f      °g      mg/l CaCO3
Total hardness : 0.4      2.02   1.13   20.2
Permanent hardness : 0.18   0.88   0.49   8.8
Temporary hardness : 0.23   1.15   0.64   11.5
Alkalinity     : 0.23   1.15   0.64   11.5
(1 °f = 10 mg/l CaCO3/l 1 °g = 10 mg/l CaO)

Major ion composition
mg/l      umol/l      meq/l      meq%
-----
Na+       1.7         0.074      0.074      7.415
K+        0.7         0.018      0.018      1.804
Ca++      5.8         0.145      0.289      28.957
Mg++      1.4         0.058      0.115      11.523

```

Close Save Print << < > >>

Start Eudora Jorge Negret AquaChem AquaChem:20 10:14 AM

Comparación de la calidad del agua con estándares de la World Health Organization (WHO) se puede obtener:

- ☞ Reports (del menú superior)
- ☞ Drinking Water Regulations

SampleID	Site	Geology	WTYPE	Index\HGroup
Muestra1			Ca-HCO3	0001 (01)
Muestra2			Ca-Hg-HCO3	0002 (02)
Muestra3			Na-Ca-Hg-Cl	0003 (03)
Muestra4			Ca-Hg-HCO3	0004 (04)
Muestra 5			Ca-Hg-SO4-HCO3	0005 (05)
Muestra6			HCO3=Cl	0006 (06)
Muestra7				
Muestra8				

Water Quality Regulations: Muestra 5

SampleID : Muestra 5
 Location :
 Site :
 Sampling Date : 3/17/1626

Drinking Water Quality Regulations:

Element	Measured	Recommended	Maximum
Na	21	< 20	< 300
Hg	43	< 30	
Ca	140	< 100	
Cl	38	< 25	
SO4	215	< 25	< 250
NO3	41	< 25	< 50

Irrigation water:
 Sodium Adsorption Ratio (SAR) : 0.40
 Exchangeable sodium ratio (ESR) : 0.09
 Magnesium hazard (M) : 33.62

Esta tabla resalta únicamente los parámetros que están fuera del rango sugerido por la (WHO). Intente cambiar los valores de las muestras para obtener algo parecido a esta tabla.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo
GROUND WATER FOR WINDOWS - PREFASE

EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER I.
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

7.1. GENERAL

In the Chemistry application you can do the following:

1. Create the chemical portion of the Ground Water Information System (GWIS).
2. Display on the screen the following diagrams: STIFF, PIPER, WILCOX and SCHOELLER.
3. Report chemical data in tables and graphs.
4. Add a location map to your reports.
5. Prepare data for contouring, create internal files with random points to be used in the Mapping application for gridding and contouring.

**7.2. MAIN MENU
BAR AND MAJOR
OPTIONS**

The main menu bar for the Chemistry application is shown in Figure 7-1. The screen is composed of three parts:

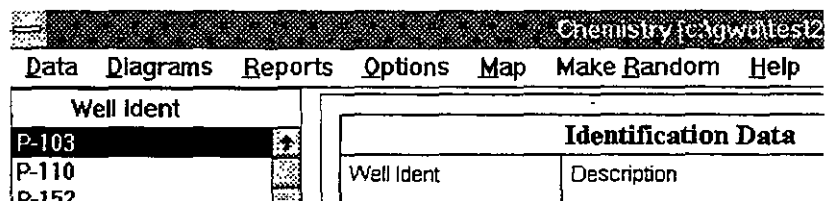


Figure 7-1

1. Menu bar with major options.
2. Well Identification window on the left, with the list of all wells/samples.

3. Entry Form for data input or editing.

The list of wells is enlarged in Figure 7-2. You may move and resize this window using Windows option for moving and resizing windows. With a large number of samples in the data base you may need to use the side slide bar to select a sample of interest.

Well Ident
P-110
P-152
P-153
P-155
P-163
P-166
P-169
P-170
P-171
P-177
P-18
P-180
P-186
P-198
P-20
P-200
P-205
P-206
P-207
P-214
P-215
P-218
P-236
P-248
P-502
P-503

Figure 7-2

The Entry Form is a default form prepared by the programmer. You may select one of your own forms with constituents other than the ones shown in

Identification Data					
Well Ident	Description				FPM
P-110	Production Well in Lot 110				
Input Data					
Ca	Mg	Na	K	Fe	
13.23	20.30	19.77	1.17		
Mn	HCO3	CO3	SO4	Cl	
	131.79	24.30	0.05	4.25	
NO3	NO2	PO4	F	B	
SiO2	TDS	Hardness	Alkalinity	Conductivity	
	218.00			270.00	
pH	Computed Data				
8.30	SAR	Carbons	Anions	Balance Error %	
	0.7968	3.22	3.09	4.09	

Figure 7-3

Figure 7-3. The Entry Form is also a window. You may move this window and resize it if you wish to place it on a more convenient place on the screen.



Note. By default, the Entry Form is set to accept data as parts per million (ppm). If you prefer to input epm go to Options first and click on Show EPM Values.

7.3. DATA SUBMENU

Selecting the option DATA from the menu bar will bring the pop-down sub-menu as shown in Figure 7-4. By now you should know the function and use of each of these commands. Most of it was explained in Chapter 5.

Data	Diagrams	Reports	Options
Make Data Group			
Select Working Set			
Select Entry Form			
Delete Record			Ctrl-D
Standard ASCII Input			
Standard ASCII Output			
Old to Std. ASCII Conversion			
Printer Setup			
Exit			Alt-F4

Figure 7-4

The only command that has not been mentioned is **Old to Std. ASCII Conversion**. This is a routine which converts the chemical data base created using the United Nations Ground Water Software package (UN/GW, or Version One of the U.N. Ground Water software). With this option, numerous chemical data bases created with Version One can easily be transferred into the GWW software.

You should be careful in selecting this option. It works in conjunction with the option Standard ASCII Input. First, you should convert from your old UN/GW data base into an ASCII file using Old to Std. ASCII Conversion,

then you should read this ASCII file using Standard ASCII Input. However, remember that chemical data may come as parts per million (ppm) or equivalents per million (epm). On the menu bar of the Chemistry application you will notice Options next to Reports. There you must select option Show EPM Values since the option Old to Std. ASCII Conversion will always create an ASCII file with constituents in epm.

7.4. DIAGRAMS

As shown in Figure 7-5, the Chemistry application currently has the following diagrams:

- Piper Diagram or trilinear diagram.
- Wilcox Diagram or irrigation quality diagram.
- STIFF Diagram.
- SCHOELLER Diagram.

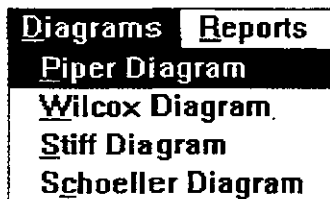


Figure 7-5

In addition to the explanation that follows in this Chapter, Chapter 16 Customization explains how to customize each of these diagrams, both for display and for print. Under the customization you will be able to select colors for each part of the diagram, select fonts (family and size), and select colors of labels. You will also have a chance to replace the words selected by the programmer with your own, in English or in any other language.

7.4.1. Stiff Diagram

The STIFF Diagram is named after H.A. Stiff, Jr. This is a single sample graph displaying graphically major cations and major anions. On the screen you will see only the graph but on the reporting form you may have all constituents (major, minor, rare, trace, contaminants, etc.) printed in a table, plus you may have a small loca-

tion map showing the relative position of the well being displayed. One example of the screen display of the STIFF diagram is shown in Figure 7-6.

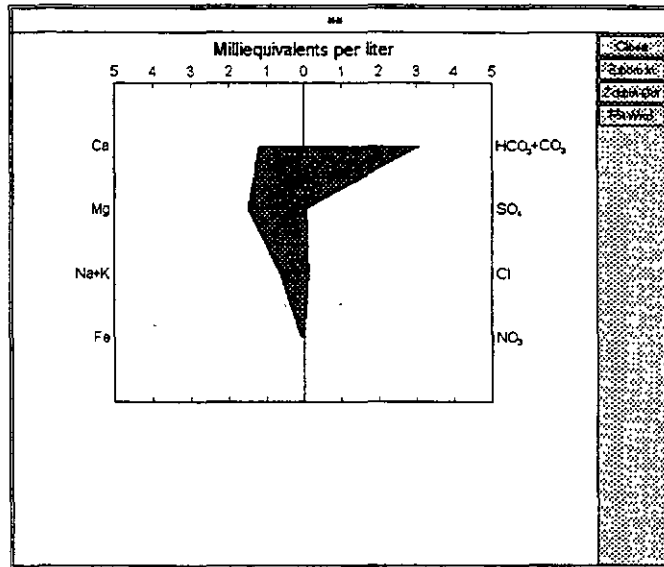


Figure 7-6

7.4.2. Piper Diagram

Named after A.M. Piper, the trilinear diagram presents graphically a group of analyses on the same plot. Figure 7-7 displays the upper part of the diagram, while Figure 7-8 displays the lower part with identification of wells/samples. The numbers on the left, 1 through 9 and letter A are codes that appear on the diagram itself. Next to these are well or sample identification names. You may display on one Piper Diagram as many samples as you wish, but the display list with sample identification may become crowded or may go beyond the page format. The number of samples you may actually display will depend on the report format you have selected, and on the font size you selected for printing the identification. With fonts as small as 8 points you may safely display and print up to 40 samples, aligned vertically in four columns containing 10 samples each. (If you select a larger font for labeling, fewer samples will be dis-

played.) Of course, you may always use larger paper or use landscape orientation.

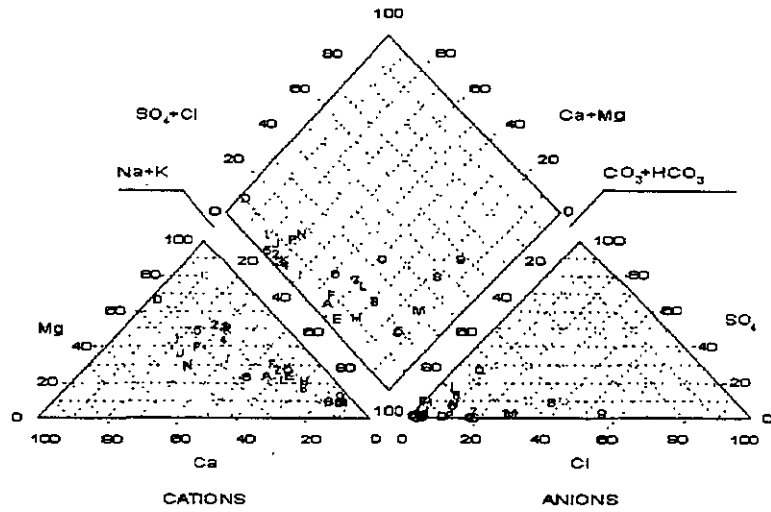


Figure 7-7

1 P-103	8 SRRG-13	F SRRG-21
2 P-110	9 SRRG-16	G SRRG-22
3 P-152	A SRRG-17	H SRRG-23
4 P-153	B SRRG-18	I SRRG-24
5 SRRG-10	C SRRG-19	J SRRG-25
6 SRRG-11	D SRRG-2	K SRRG-35
7 SRRG-12	E SRRG-20	L SRRG-36

Figure 7-8

7.4.3. Wilcox Diagram WILCOX Diagram is named after Wilcox from the U.S. Department of Agriculture. This diagram is used in studying the suitability of water for irrigation purposes. High content of exchangeable sodium is highly undesirable for agriculture, as is the high total dissolved solids content, expressed as conductivity of water. An example of a screen display of the Wilcox diagram is shown in Figure 7-9.

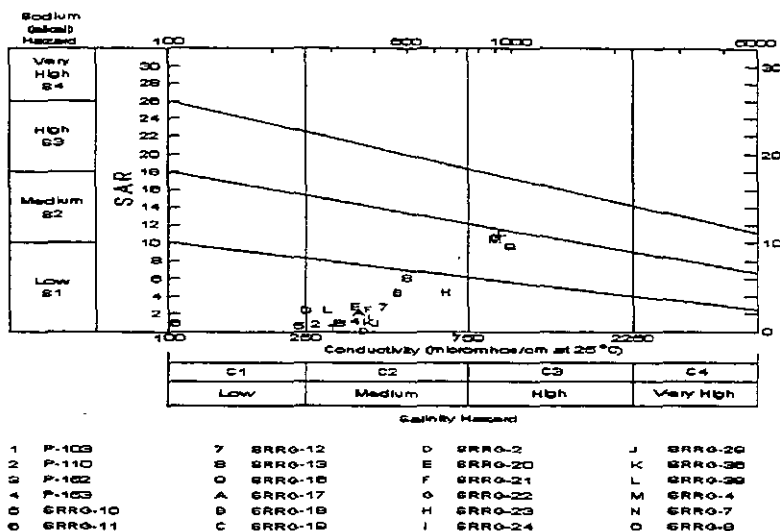


Figure 7-9

7.4.4. Schoeller Diagram

The SCHOELLER Diagram, named after professor Schoeller, is a group diagram displaying (1) the total concentrations of major cations and anions in both ppm and epm, and (2) the relative water composition for many samples. Because of the graphical limitations of lines (solid, dashed, dashed dotted, and dots on the line) it is not advisable to display more than 10 samples on one Schoeller diagram. Read also section 7.6. Options. One example is shown in Figure 7-10.

7.5. TABLES

You may report or print data from the chemical data base in tables. Two table forms are designed by the GWW programmer as defaults for reporting major cations and major anions in (1) equivalents per million (epm), (2) parts per million (ppm). Their default names are Tableepm

and Tableppm. Both are set to report in the landscape orientation.

You may also design your own table reporting forms selecting any constituent and/or parameter that you may

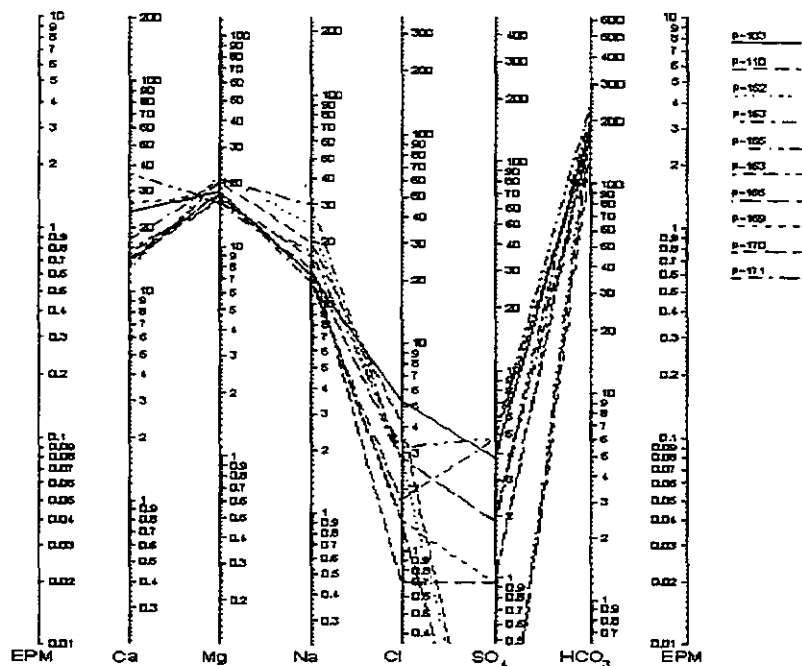


Figure 7-10

have in the data base. However, be careful in selecting the units of reporting. In the GWW system chemical constituents have simple chemical names such as Ca for calcium, NO₃ for nitrates, etc. If displayed like this they will be reported as equivalent per millions. To distinguish epm from ppm for the same constituent, the GWW system adds ppm after the parameter name. For example Ca will be calcium in epm, but Cappm will be calcium in ppm. You may place either or both on the same table form. One such reporting form is reproduced in Appendix C. For advanced users of the GWW software, additional explanation of format and attributes is given in Appendix C.

7.6. REPORTS

When activated, the report option displays a pop-down submenu as shown in Figure 7-11. There is a difference in selecting to print using one of the four commands listed in the upper rectangle. When these print commands are activated, the program will assume that you want to use standard printing or reporting forms. You will not be prompted to select a reporting form, as you will be if you select one of the lowermost four options. Also the program will print only samples in the working group in the case of group diagrams (in upper rectangle).

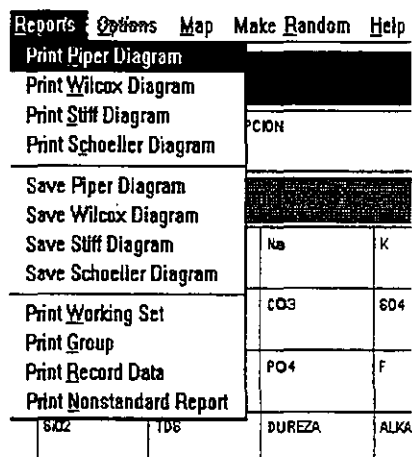


Figure 7-11

For example to print a STIFF diagram, you should select the sample you want to print by moving the cursor within the sample list on the left, or by using PageUp or PageDown if you are in the Entry Form window. Once you select the sample you have two options:

1. Select **Print Stiff Diagram** on the **Reports** menu. The standard reporting form will be used.
2. Select **Print Record Data**. The dialogue box will offer you all available reporting forms for the STIFF diagrams. Select one of these and the program will print it accordingly.

Using the commands from the lower rectangle permits you to select (a) the diagram to print, (b) the reporting form for that diagram, (c) the table form for all or a group

of constituents in the base, and (d) one of nonstandard reporting forms intended for mixing graphics using more than one application.

If you select **Print Working Set**, all forms designed by you or by the GWW programmer will be listed in a dialogue box, permitting you to choose from any of them. For example the list will include, by default, the diagrams such as Piper, Wilcox, and Schoeller, plus any other table form or alternative designs of diagrams that you may have created. You should be careful, however, not to select **Print Working Set** for a Piper diagram if you have more than 30 samples in the set. Likewise, it is recommended not to print more than 10 samples on a Schoeller diagram. In these cases, you are advised to use the command **Print Group**. The options **Print Working Set** and **Print Group** are identical except for the content of reporting.

You may also save any graphics that is currently displayed. Depending on which type of graphics is displayed you will use **Save Piper**, **Save Wilcox**, **Save Stiff**, or **Save Schoeller Diagram**. GWW will then open a dialogue box prompting you for the name of the drawing and for its dimension. You may print such a saved drawing using the **Print Nonstandard Report** option from this or another application.

7.7. OPTIONS

The GWW software uses a special external file to convert between ppm and epn values. This is a simple ASCII file, named by default PPMTOEPM.TBL, the partial content of which is shown below and its full content in Appendix D.

- Ca 0.04990
- Mg 0.08224
- Na 0.04350
- K 0.02558
- Fe 0.05372

- Mn 0.03640
- HCO₃ 0.01639
- CO₃ 0.03333
- SO₄ 0.02082
- Cl 0.02820
- NO₃ 0.01613
- PO₄ 0.03159
- SiO₂ 0.27750



Note. You may add more constituents and their conversion factors. The ppm values when multiplied by these factors convert to epm values.

Depending on what you have currently on your display, you may switch between ppm and epm at any time. The submenu with these options is shown in Figure 7-12.

Options	Map	Make Han
Show PPM Values		
Show EPM Values		
Set Max. Balance Error		
Set Schoeller Range		

Figure 7-12

Set Max. Balance Error is another option which permits you to override the default built in the program. STIFF and PIPER diagrams will not calculate and display if there is an imbalance between sum of cations and sum of anions. By default the maximum permissible "imbalance" is set at 10%, but you may assign your own criterion using this option. When invoked, the dialogue box will be displayed as shown in Figure 7-13.

Enter maximum cations-anions balance error [%]

10

OK Cancel

Figure 7-13

Set Schoeller Range is the option which permits you to change the vertical scale of the Schoeller diagram. By default, the range is set from 0.1 to 400 epm. The upper values are sufficient to display the sea water salinity, but are too high for an ordinary ground water sample. You will probably want to reduce the upper limit to some 30 epm, and also reduce the lower limit to 0.01 to display the smallest concentrations. When invoked this command first prompts you to set the minimum value for Schoeller diagram, as shown in Figure 7-14, and then to enter the maximum value for the same diagram.

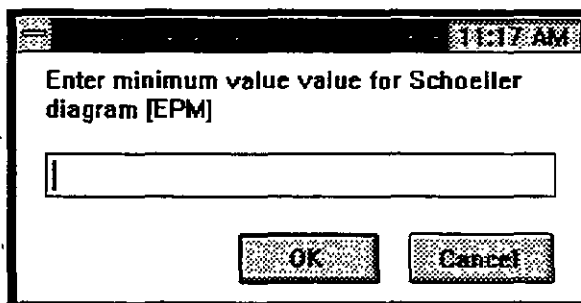


Figure 7-14

7.8. MAP

The Map option permits you to select wells or samples directly from the map. The submenu for Map is shown in Figure 7-15. You may create one or more maps showing locations of all or selected wells, water points or samples using the option **Make Random**, then the Mapping application in which you actually create a map.

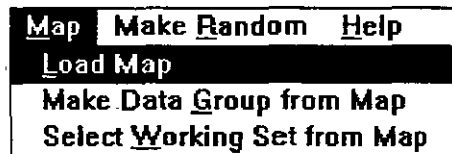


Figure 7-15

To select wells directly from a map you should follow the sequence:

1. Select **Data** on the menu bar.
2. Choose **Select Working Set**.
3. Click on **Unselect All** to remove all wells from the selection list.
4. Click on **OK**.
5. Select **Map** on the menu bar.
6. Select **Load Map** and select one of existing maps, the names of which will be listed in the dialogue box.
7. Depending on what you want to create a working group or a working set, select one of options **Make Data Group from Map** or **Make Working Set from Map**.
8. Use one of methods for selection of wells from the map: area, points, or rectangle. If you choose the option **Select Points** you must terminate the selection clicking on the button **End Points**. If you choose **select Area** you must terminate the selection clicking on **End Area**. Do not forget to close the area by selecting **End Point**. The option **Select In Rectangle** automatically closes the operation of selection. Notice that selected wells are listed in the selection window on the left side.
9. Select **Data**.
10. Select **Make Data Group** or **Select Working Set**, depending on what you have decided to create. You will notice that all the wells that were selected from the map are still displayed on the left part of the window under "Unselected Item". Confirm the selection by clicking on **Select All**.
11. Click on **OK**.

7.9. MAKE RANDOM

This option is explained in Chapter 5, section 5.6. In the chemistry application you may create random models for every chemical parameter, every constituent, for total dissolved solids, alkalinity, hardness, pH values, for to-

tal anions or cations, for sodium absorption ratio, or, in short, for every space-dependent item which has a numerical value. This in turn permits you to create a contour map for every such parameter.

When this option is invoked the dialogue box, like the one shown in Figure 7-16, will be displayed. The box lists all space-distributed parameters from the chemistry application and the master data application. When you select a parameter of which you wish to create a random point internal file, all wells or samples in the current working set will be scanned and included into the random points file, provided they have X and Y coordinates.

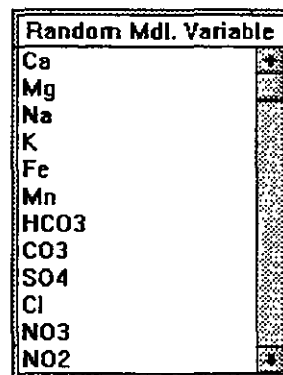


Figure 7-16

7.10. HELP

The final option on the menu bar is Help. This is a context-sensitive Windows-written help which explains almost everything explained in this manual.

7.11. EXAMPLE

EXAMPLE THREE



This is Example number three. The first task is to create a new data base with the following constituents in the base:

- TDS
- pH
- Conductivity
- Toluene
- Phenol
- Benzene
- Iron

The second task is to transfer the following data into the base:

- Well Identification - MW-1
- Description - Monitoring Well at Farmland Landfill
- TDS = 466 ppm
- pH = 8.2
- Conductivity = 412 micromhos per cm at 25°C
- Toluene = 4.5 ppm
- Phenol = 2.4 ppm
- Benzene = 2.3 ppm
- Iron = 2.4 ppm

You must follow the steps:

1. Create a new data file structure.
2. Create a new entry form.
3. Type data into the entry form and the data base.

7.11.1. Create a New Data File Structure

1. Start GWW and select **New GWW Data Base**.
2. Give the base the name **FARMLAND.GWW**.
3. Select **Tools**.
4. Select **Data Structure Design**.
5. Select **File**.
6. Select **Old**.
7. Select **Chemistry**.
8. Move the cursor to Ca and click on the button **Delete**.
9. Repeat with all constituents, deleting one by one. Retain only Well Ident, Fe (Iron), TDS (Total dissolved solids), pH, and Conductivity. What remains may look as shown in Figure 7-17.
10. Click on **New**.



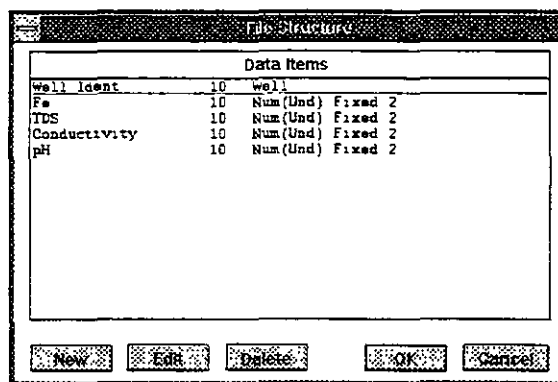


Figure 7-17

11. In the dialogue box type Toluene in **New Field**. Replace the default field length of 10 with 6. Click on **Numeric**. Replace the default number of decimal digits (2) with number 3. Click on **OK**. Notice that Toluene has been added to list of constituents on the last line.
12. Do the same for Benzene. Click on **New**, type Benzene for Field Name, 6 for Field length. Select **Numerical** for Data Type, and change 2 with 3 for Number of Decimal Digits. Click on **OK**.
13. Do the same for Phenol. The list of constituents should look as shown in Figure 7-18.
14. Click on **OK**. The changes are automatically recorded in your new data base.
15. Click on **File**, then on **Exit**.

7.11.2. Create a New Entry Form

1. Select **Tools**.
2. Select **Data Entry Forms Editor**.
3. Select **Chemistry**.
4. Select **Form**.
5. Select **New**.



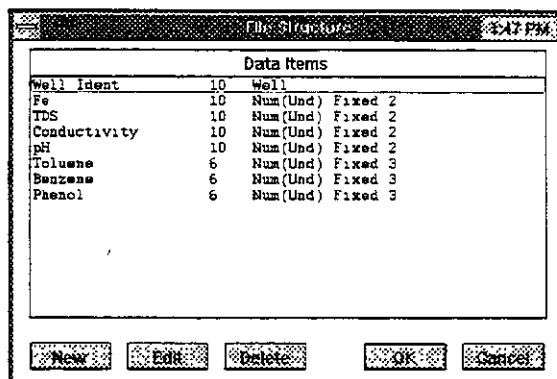


Figure 7-18

6. Select first **New Field, Header**, and type **EXAMPLE THREE ... New Chemical Data Base**. Enhance this field by adding border, changing fonts and other attributes.
7. Click on **Well Ident** from the list on the left side. See where the field is placed on the form. Move if you wish to another place. Change the default size, add border, change font to 12 or 14 points, boldface.
8. Click on **Description**. Change attributes if you wish.
9. Click on **pH**, then on **TDS**, then on **Conductivity**. Continue by selecting **Toluene**, **Benzene**, and finally **Phenol**. The form may look as shown in Figure 7-19.
10. When satisfied with the content and layout, click on **Form**, followed by **Save As ...** Confirm by double clicking on **Standard**.
11. Click on **Form**, and on **Exit**.

7.11.3. Create Data Base Entry



1. Select **Applications**.
2. Select **Chemistry**.
3. Select **Data** menu.
4. Select **New Entry Form**, and double click on **Standard**.

EXAMPLE THREE .. Farmland Facility Chemical Data Base			
Well Ident			
Description			
Fe	TDS (ppm)	Conductivity	pH
Toluene	Benzene	Phenol	

Figure 7-19

5. Start typing, MW-1 in the **Well Identification** field, followed by TAB. Continue with the description field, then with other fields. Always end a field with the TAB key. When finished, press PAGE DOWN. The cursor is now in the blank **Well Ident** field, waiting for you to continue with another sample. If you press PAGE DOWN instead, or click with the mouse on MW-1 entry in the list of wells/samples, the screen should look something like what is shown in Figure 7-20.
6. To be sure that all common data are kept also in the Master Data application, close this application by selecting Data, and Exit.

EXAMPLE THREE .. Farmland Facility Chemical Data Base			
Well Ident			
MW-1			
Description			
Monitoring Well on Farmland Facility			
Fe	TDS (ppm)	Conductivity	pH
2.40	466.00	412.00	8.20
Toluene	Benzene	Phenol	
4.500	2.300	2.4	

Figure 7-20



7. Select **Application** again, and click on **Master Data**. Notice that the display contains only one well, MW-1. The only information shared between applications is Description. The display is as shown in Figure 7-21.

This ends example number three.

Master Data			
Ident	MW-1		
Description	Monitoring Well on Farmland Facility		
Easting	Northing	Ground Surface Elev	Measur Pt Elev
District	Locality	Owner	
			Map Sheet No

Figure 7-21

This page intentionally left blank.

CHAPTER NINE PUMPING TEST APPLICATION

9.1. INTRODUCTION

9.1.1. General

Using the Pumping Test application from the main menu of the GWW software you may do the following:

1. Create a data base containing information about pumped wells, field test data (drawdowns, time, pumping rates).
2. Interpret field data by fitting one of the theoretical curves for nonleaky aquifer, leaky aquifer, under confined or unconfined conditions, with fully or partially penetrating wells.
3. Display the field data or fitted data on the screen or print them using one of three display options:
 - (a) both time and drawdown coordinate axes are at logarithmic scale;
 - (b) both time and drawdown coordinate axes are at linear scale;
 - (c) time (abscissa) is at logarithmic scale, and drawdown (ordinate) is at linear scale.
4. Print the results in one of the following forms: (a) table form with general data on wells and hydrogeologic parameters, (b) table form with measured and fitted data for one well, and (c) standard reporting forms showing the pumping test data and fitted curve.
5. Prepare the data on hydrogeological parameters for contouring. Normally you would like to produce a contour map of transmissivity, or prepare an input data file with transmissivities and hydraulic conductivities to be used for modeling.

9.1.2. Features Of The Interpretation Mode

The program permits you to specify the following:

- Aquifer may be confined or unconfined. If unconfined, the program adjusts drawdown data for decrease in the transmissivity using the formula derived by Jacob:

$$s' = s - (s^2/2m)$$

where:

s' = drawdown that would occur in an equivalent nonleaky confined aquifer;

s = observed drawdown under water-table (unconfined) conditions;

m = initial saturated thickness of aquifer.

- Wells are expected to be fully penetrating but corrections for partial penetration are included for the case of nonleaky aquifer. The program permits partial penetration of pumped or observation wells. In the case of partial penetration, you will be prompted for additional input, such as the depth to the top and bottom of a well screen from the top of aquifer in the pumped well, as well as the same for an observation well.

The program has four major curve fitting routines:

- (a) Theis, using the standard well function $[W(u)]$ curve fitting method;
- (b) Jacob's approximation of the Theis solution;
- (c) Hantush, using the standard leaky well function $[W(u,r/B)]$ curve fitting method;
- (d) Recovery method.

In all cases the program does the fitting without prompting you for initial guesses. (The initial guess is provided by first solving the Jacob's approximation equation and

producing the approximate fit, and then solving the complete well function equation.)

The Jacob's method is an approximation to the solution provided by the much more involved Theis method which is valid only when a certain condition is satisfied. This condition is contained in the size of the well function's argument. The argument u is defined as:

$$u = r^2 S / 4 T t$$

where r is the distance between pumped and observation wells, t is the time of pumping, and T and S are aquifer parameters transmissivity and storage coefficient, respectively.

This condition, expressed as the well function's argument u being less than about 0.01, implies that the distance between pumping and observation well, r , should be small or the time of pumping large. For a certain range of the aquifer parameters, namely the transmissivity T and the storage coefficient S , this condition will not be satisfied. For example, the Jacob's approximate solution will not be valid for the following set of values:

$r=500$ m; $S=0.10$; $T=500$ m²/day; t from 1 to 100 days.

The pumping test does not need to be run with a perfectly stable pumping rate. Pumping rate fluctuations are allowed and curve fitting will take them into account provided the history of pumping is known (exact rates and times of changing rates). Theoretically, the method can be used for the whole step-drawdown test as well.

You may skip any test data from curve fitting. These points will still be shown on the screen and on the printed graph but with a different symbol and color.

9.1.3. Input Data Conventions

The data for a pumping test analysis normally consist of four entries:

- time
- drawdown or depth to water from a measuring point

- pumping rate
- option to skip the point from calculation

Each data set must start with the initial line (row in the editing table) containing 0 (zero) for the time, 0 for the drawdown, and the initial pumping rate. For example, if a well was pumped at 2500 m³/day, and the drawdown after the first minute was 2.34 m, after the second minute 3.21 m, etc., the data input must look as follows:

Time	Drawdown n	Rate	Skip
0	0	2500	
1	2.34		
2	3.21		

However, you may type a positive value for the drawdown at time zero (row one) indicating that you wish the program to accept this as the initial static water level. This level is actually the depth to the water from the measuring point (top of casing, ground surface, top of concrete block, etc.). Every other value in the second column ("drawdown" column) will be interpreted as the depth to the water and the vertical axis on the pumping diagrams will be labeled accordingly.



There is no need to repeat input of pumping rates as long as the rate is constant. Only when it changes, the change should be typed.

In the case of the recovery of water levels after the pump stopped discharging, the convention is the following:

You must provide the history of pumping during the pumping stage, ending the pumping with the line containing the final time of pumping, and the final drawdown, and replacing the pumping rate with 0 at the time pump was shut off. From that time on, the time input must be in total time elapsed from the beginning of pumping, and not from the moment the recovery started. For example, if a well was pumped for 240 minutes at a constant rate of 2500 m³/day and the final drawdown was equal to 1.00 m, and then the pump was

shut off and the recovery measured, the data input must be the following:

0	0.00	2500
240	1.00	0
241	0.89	
242	0.81	
243	0.76	
245	0.68	
247	0.64	
250	0.56	
255	0.49	
260	0.45	
270	0.38	
280	0.34	
300	0.28	
320	0.24	
340	0.21	
380	0.17	
420	0.14	

(This is the example from D.K.Todd's book *Groundwater Hydrology*, 2nd edition, 1980, page 133. The manual matching produced the transmissivity equal to 1140 m²/day, and this program 1162 m²/day.)

9.1.4. Aquifer Parameters

With the Theis method for a nonleaky aquifer, the fitting method produces the values of transmissivity and storage coefficient. Using the Hantush method for a leaky aquifer, the fitting method produces the transmissivity, the storage coefficient and the leakance or leakage coefficient. While the physical meanings and interpretation of the transmissivity and storage coefficients is well known and fully explained in any basic textbook on hydrogeology, the leakage coefficient needs an explanation.

The leakance or leakage coefficient, defined as K'/b' , where K' and b' are the hydraulic conductivity and thickness, respectively, of the semiconfining layer separating two aquifers, characterizes the amount of leakage. This coefficient is defined as the quantity of water that

flows across a unit area of the boundary between the main aquifer and its semiconfining bed, if the difference between the head in the main aquifer and that of the ponded water supplying leakage is unity (De Wiest, *Geohydrology*, 1965, page 274). Usually the values of the leakage coefficient are expressed in 1/time unit, that is in day^{-1} , or sec^{-1} . Hantush reported values between $4.8 \times 10^{-8} \text{ sec}^{-1}$ to $10^{-10} \text{ sec}^{-1}$ for an artesian basin in New Mexico, while Walton reported values from $3.5 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$ to $8 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$ for glacial drift deposits in Illinois.

The recovery method will produce only the transmissivity coefficient. Although it would be relatively easy to report the storage coefficient as well, the programmers restricted the analysis to transmissivities following the classical approach to the recovery part of the test.

In general we do not know beforehand whether an aquifer is leaky or nonleaky. You should try both methods, Theis and Hantush, and accept the one which produces a better fit. The quality of fit is printed as the Estimation Error entry. This is, in essence, the standard deviation.

9.1.5. Units

Although the GWW package has its system of units in the file GWW.UNT, you may override the basic units in every part of the program. For the pumping test application this is more important than for other applications, because this application involves calculation of parameters which must be done in a consistent system of units. You should not be concerned with the consistency. The program takes care of this. But you must have control over your input data by knowing in which units you are actually transferring the data. You must also specify in which units you wish to have the results for the parameters.

As you will soon notice, the program permits you to modify general units and measurement units. The general units are the units for transmissivity and leakance, for average pumping rate to be reported on the form,

and for various geometric input parameters in the case of partial penetration and unconfined aquifer. The measurement units are the units for time, drawdown and pumping rate. The units you select for measured data will be displayed in the editing table. The general units will not be displayed on the screen, nor in reporting forms. You must be sure of which units you have selected and label them properly by modifying the default reporting forms.

9.2. MAIN MENU BAR

As shown in Figure 9-1, the major options on the application's menu bar are the following:

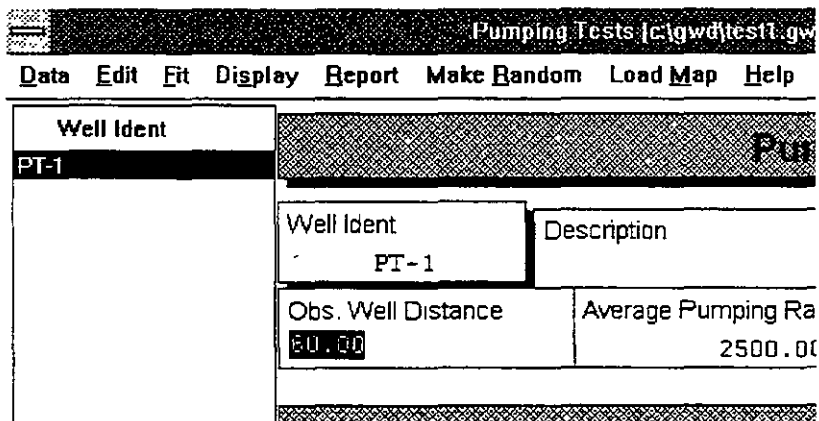


Figure 9-1

- Data
- Edit
- Fit
- Display
- Report
- Make Random
- Load Map
- Help


Each of these options, except options **Make Random** and **Load Map**, is explained in detail in this Chapter. **Make Random** is discussed in Chapter 5, Section 5.6; **Load Map** is discussed in Chapter 5, Section 5.3.2.

When the Pump Test application is selected, the display window consists of three main parts:

- Menu bar on the top.
- List of wells on the left currently comprising the working set, with two numbers at the top referring to the number of tests in the current working set and the total number of pumping tests in the data base.
- Entry form with information on the first well on the list or an empty form for a new data base.

Only certain fields on the entry form are available for input. These are Well Ident (or identification of a well), Description of the well, and Obs. Well Distance. In all but the recovery method, you will be reminded to input this parameter if you forget to do so before fitting.

Other fields on the form are reserved for reporting the results, and you will not be permitted to modify them. These are the fields reporting the transmissivity, storage coefficient, leakance, estimation error, initial saturated thickness, and the fit method.



NOTE. If you wish to keep in your data base transmissivity, storage coefficients, leakance, hydraulic conductivities, etc. which you may modify or input without accepting the results from pumping tests, you must modify the data structure internal file (see Chapter 2) and reporting forms (see Chapter 3). However, be careful not to assign to these new entries the same field name as in the default structure. Remember that the default field names are transmissivity, storage, leakance. If you wish to have double parameter for transmissivity, you may add to the data structure TRANS, place this entry on your entry and reporting form, type the value that you wish to accept as the representative value for the transmissivity into this TRANS field in the entry form, in addition to the value produced automatically by the test, and create the same field on a

new reporting form in which the transmissivity as selected by you will be reported. This may become important if you wish to create a transmissivity contour map by using pumping tests results for a certain number of wells, by using calculated transmissivities from grain size analyses, and by assigning transmissivities on the basis of well performance or merely the lithology.

9.3. DATA

The Data submenu is shown in Figure 9-2. The following options are available:

- Select Working Set.
- Delete Record.
- Select Entry Form.
- General Data Units.
- Print Setup.
- Exit.

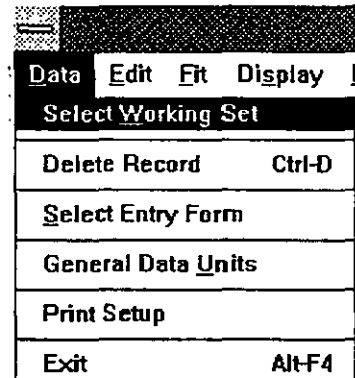


Figure 9-2

You use **Select Working Set** option in the same manner as with any other application. Its use is explained in Chapter 5, Section 5.3. Its purpose is to reduce a large set with many wells to a smaller set of wells which may be selected for whichever reason.

To delete a record, do the following:

1. Move the cursor to the well you wish to delete.
2. Select **Data** on the application's menu bar.
3. Select **Delete Record**, or hold down the CTRL key and press D key.
4. A warning will be displayed giving you a chance to reconsider.

You may use the default form as displayed in Figure 9-1, or any form that you may have created following the steps explained in Chapter 3. To change the form:

1. Select **Data** on the application's menu bar.
2. Click on **Select Entry Form**.
3. Select the form name which you wish to use as your entry form from the list displayed in the dialogue box.
4. Click on **OK**.

As explained in Section 9.2., in the pumping test application it may be important to design another entry form which would give you an opportunity to type some additional values, such as for transmissivity, hydraulic conductivity, storage coefficient, leakance, conductivity of semi-confining bed, thickness of semiconfining bed, etc. These values may then be contoured or reported in a table.

When activated, the option General Data Units displays a dialogue box such as shown in Figure 9-3. You may change units for every parameter that may appear in the calculation or on the entry or reporting form. Remember that the slide bar on the right indicates that there are more entries than what is displayed. Most of these parameters will appear on the entry and reporting forms. When you select any of these parameters, you will be offered the full choice of units, all units that are specified in the GWW.UNT file for a particular type of units.

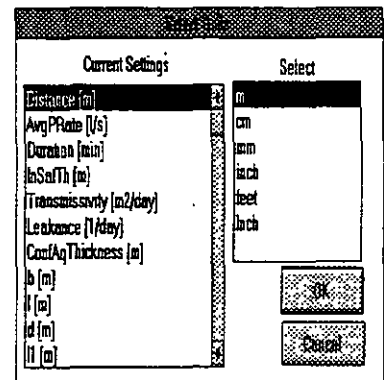


Figure 9-3

The **Print Setup** option is explained in Chapter 5, Section 5.4.

9.4. EDITING PUMP TEST DATA

9.4.1. Measurements Units

The submenu **Edit** looks as shown in Figure 9-4. To start, you should select or confirm the units of measurements

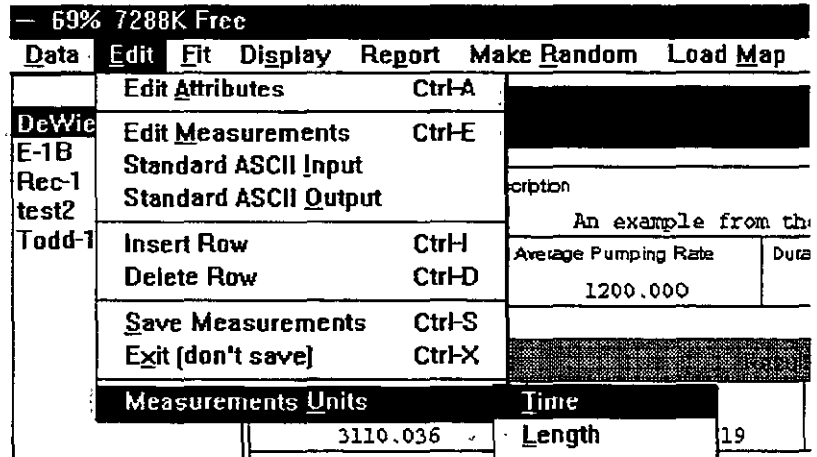


Figure 9-4

for a particular test. When you click on **Measurements Units**, the menu extends to three options: **Time**, **Length**, and **Pumping Rate**. The selection of units is the same as for the general data. When you select the option **Edit Measurements** the units that you have selected will be displayed in the editing table. This is shown in Figure 9-6.

9.4.2. Edit Attributes

Using the option **Edit Attributes** you may define your pumping test and aquifer scenario. The display as shown in Figure 9-5 looks like this only if you click on **Partial Penetration** box and declare the test as a partial penetration setup. If you do not select **Partial Penetration**

box, the display will offer only the Confined box. Actually, the following combinations are possible:

- (a) Confined aquifer box clicked. The box is "crossed". Partial penetration box is not clicked (it is empty). No other input is required.
- (b) Both the confined aquifer box and partial penetration boxes are empty. The case is of an unconfined aquifer. You must type the value for Initial Saturated Thickness.
- (c) Both confined aquifer box and partial penetration boxes are clicked. The display is as shown in Figure 9-5. You do not fill the box for Initial Sat. Thickness, but you must fill in all boxes underneath, depending on whether you have measured data from the pumping well or from observation well.
- (d) Confined aquifer box is not clicked (the case is of a unconfined aquifer). Partial penetration box is clicked. You must type the value for initial saturated thickness and all required information for partial penetration.

The screenshot shows a dialog box titled "PT-1". At the top, there are two checked checkboxes: "Confined" and "Partial Penetration". Below "Confined" is a text field labeled "Initial Sat. Thickness" followed by "m". To the right of this field are "OK" and "Cancel" buttons. Below these are two sections: "Pumping Well Data, from Top of Aquifer ..." and "Observation Well Data, from Top of Aquifer ...". Each section has two text fields: "... to Top of Screen" and "... to Bottom of Screen", each followed by "m". At the bottom of the "Observation Well Data" section is a text field labeled "Aquifer Thickness" followed by "m".

Figure 9-5

9.4.3. Edit Measurements

When you select the **Edit Measurements** option, the edit table is displayed. It may contain data as shown in Figure 9-6, or it may be empty prompting you for input. Notice the units displayed in the header. These are the units you have selected using the option **Measurements Units** on the same menu. Notice also the first row of the data,

with 0 for time and drawdown, and a value for pumping rate. You enter or edit data using the TAB key, ENTER, or mouse.

NOTE. Remember that you must not press TAB or ENTER when you finish typing of the last data input. If you do a new line will automatically be opened. Since it would be blank the fitting would fail. For this not to hap-

pen the program will warn you to delete the line. To delete any line, including the last blank line, you hold down the CTRL key and simultaneously press D.

You do not need to keep repeating the pumping rate value. Only if it changes should you type the new value. The "Skip" column allows you to eliminate some points from the calculation of the fit. Type * on the row you wish to eliminate.

PT-1			
Time (min)	Depth (in)	Flow (gpm)	Skip
0	0	2500	
1	0.2		
1.5	0.27		
2	0.3		
2.5	0.34		
3	0.37		
4	0.41		
5	0.45		
6	0.48		
8	0.53		
10	0.57		
12	0.6		
14	0.63		
18	0.67		
24	0.72		
30	0.76		
40	0.81		
50	0.85		
60	0.9		
80	0.93		
100	0.96		
120	1		
150	1.04		
180	1.07		
210	1.1		
240	1.12		

Figure 9-6

9.4.4. Standard ASCII Input

You may input pumping test data from an ASCII file. This should be a standard ASCII file, with time, drawdown, and pumping rate values separated by a comma or one or more spaces. The order of input is important: time, drawdown, pumping rate. When you choose the option Standard ASCII File the box prompting you to select a file will be displayed as shown in Figure 9-7. The program assumes that the extension of such files is .pmp,

but you may change this by typing your own wildcard combination.

The normal procedure in creating a test set would be to:

1. Create a test well entry by assigning well identification, typing in description, and typing the distance to observation well.
2. Select Measurements Units for time, drawdown, and pumping rate.
3. Select General Data Units.
4. Set Edit Attributes for the test.
5. Input standard ASCII file.

9.4.5. Standard ASCII Output

This option provides for saving test data that you have entered from the keyboard or that you may have edited. When used, you will be prompted for an ASCII file name. The data are saved in a format which may look as follows:

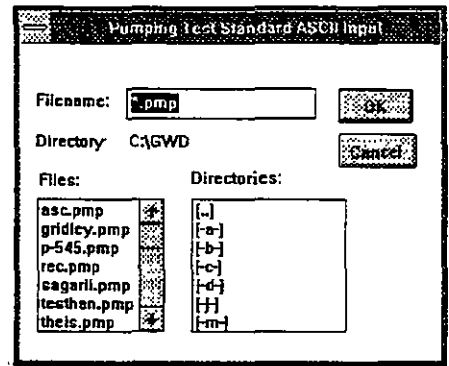


Figure 9-7

1.000	0.280	500
2.000	1.040	
3.000	1.775	
5.000	2.956	
10.000	4.894	
15.000	6.142	
20.000	7.059	
25.000	8.158	
30.000	8.720	
45.000	9.346	
50.000	9.674	
55.000	9.967	
60.000	10.230	400
62.000	10.119	
64.000	9.940	
66.000	9.826	
68.000	9.754	
70.000	9.707	
75.000	9.657	
80.000	9.658	
90.000	9.652	
120.000	12.151	

The results of this test are interpreted in the following way. The well was pumped at a constant rate of 500 m³/day in the first 60 minutes. In the second hour the pumping was at a reduced rate of 400 m³/day. The test terminated after two hours of pumping.

9.5. FITTING

The GWW package contains four methods of fitting data: Theis, Jacob, Hantush, and Recovery. This is shown in Figure 9-8. You must not use the recovery method if the data are not prepared for the recovery. You may use either Theis or Hantush on the same set of data and see the difference in fitting.

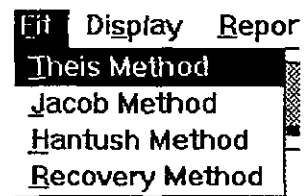


Figure 9-8

Each of the methods works in iterations. The fitting starts with values of transmissivity and storage coefficient as initial guesses calculated using the Jacob's approximation. Since the fit for the Theis method is a two-parameter iterative algorithm (transmissivity and storage coefficient), it is much faster than the Hantush method which is a three-parameter algorithm (transmissivity, storage coefficient, leakance). If, on top of this, you select a partial penetration case, the processing may take several minutes on relatively fast computers (82486 running at 33 MHz).

In rare cases it may happen that there will be no fit in a pre-specified number of iterations (set at 100). This will be the case when test data do not come close to theoretical expectations of a normal leaky or nonleaky aquifer. However, if you notice at the first iteration that the estimation error is labeled with five or more asterisks, your data file is not correct. This will be the case if you have not followed conventions as specified before, you have a blank line in the data file, or, in the case of the recovery method, you have not typed cumulative time.

If the fitting was OK, the results will be typed into the entry form.

9.6. DISPLAY

The display is used for (a) viewing field data before fitting, and (b) displaying the fit.

You may wish to view the test data to check for errors in typing or measurements. Time data will be OK since the editor will warn if some input data lines are out of time sequence. But the drawdown data may be mistyped or behave erratically. In that case the fit will not make sense unless you modify the data. One of displays of field data is shown in Figure 9-9 before the fit.

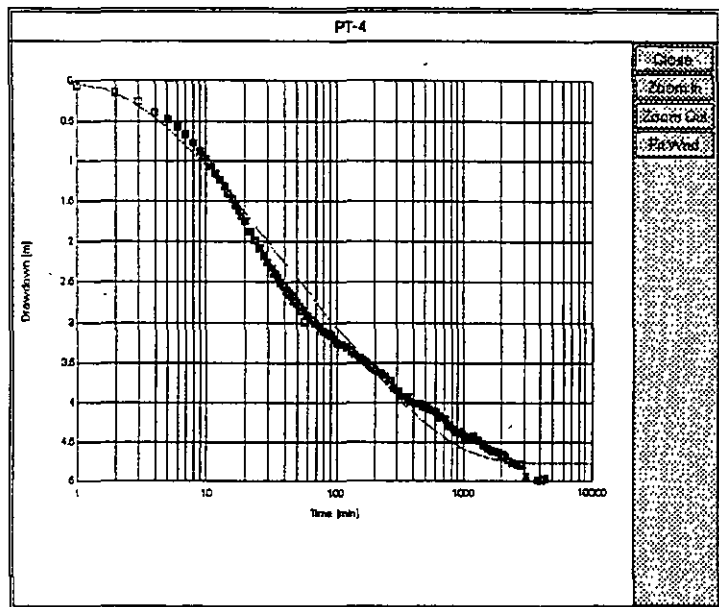


Figure 9-11

9.7. REPORTING

By selecting the **Report** option from the menu bar you may print the following:

- Fit graph showing field or measured data and the fitted curve, along with results and other information that you selected to put on the report form.
- A table for a single well displaying measured data, fitted data, the difference between the two, time, pumping rates, and any other parameter that you decided to put on the reporting form.
- A table for all wells making the data base or working set displaying some general data such as wells' identifications, descriptions, coordinates, elevations, transmissivities, storage coefficients, leakance, etc.

The submenu for reporting is as shown in Figure 9-12. If you select the upper option, **Print Fit**, the standard reporting form will be used including some general information about the well, test results, methods of fitting, and the diagram. This standard form, which is a part of

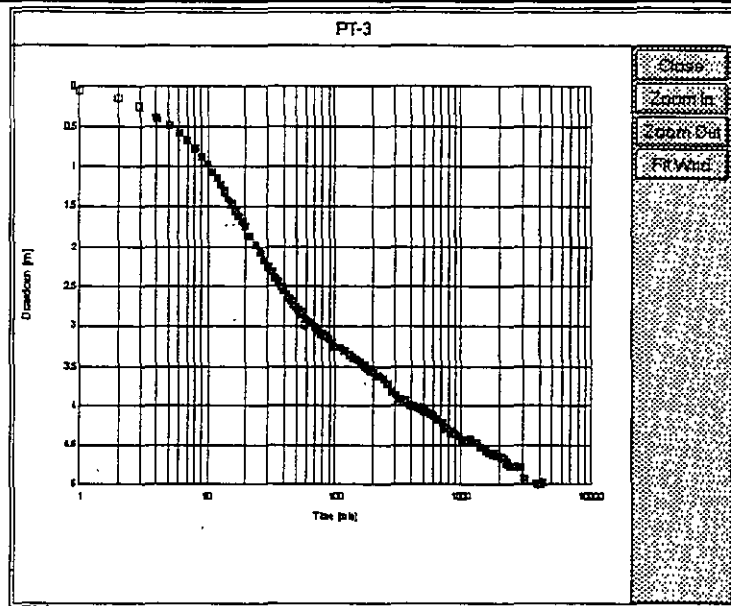


Figure 9-9

Before accepting the results, you will want to see how data are fitted. After you select the option Display you are asked to select one of three patterns (see Figure 9-10):

- time at logarithmic scale, draw-down at linear scale;
- time and draw-down at logarithmic scale;
- time and drawdown at linear scale.

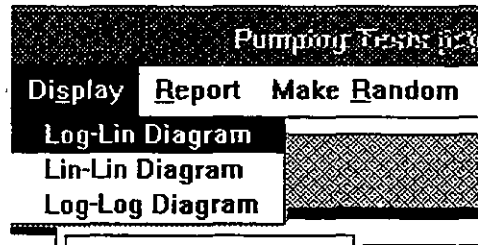


Figure 9-10

Notice that the printout will always be in semilogarithmic scale. One of fitted semilogarithmic displays is shown in Figure 9-11 for the Hantush fitting method. Notice the difference of display for points that have been skipped. On the color screen this is even more obvious.

the data base template GWW.000, is prepared for the following units:

- Transmissivity in m^2/day .
- Drawdowns, aquifer thickness, distances and geometry of test wellfield setup in meters.
- Time in minutes.
- Leakance in day^{-1} .
- Pumping rate in m^3/day .

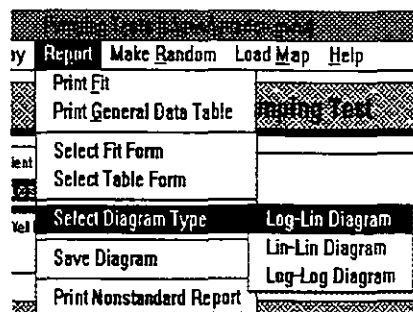


Figure 9-12

You may need to modify this form for another set of units. [The modification is done using **Tools** from the main menu, followed by **Report Forms Editor**, then **Pumping Tests**, and **Single Record Form, File, Old, Standard form.**]

If you select the option **Print Fit**, you will not be prompted to select a reporting form.

Similarly, using the option **Print General Data Table** the standard report form will be assumed, and you will not be given the chance to replace it with another form that you may have created.

The middle two options are used to first select a reporting form, and second to print the form. **Select Fit Form** is intended to print a report that is prepared for a single well, and **Select Table Form** is intended to print a report that is prepared for all wells in the working set.

In the GWW.000 template data base, three reporting forms have been prepared by programmers to report fitted data. When you select the option **Select Fit Form** you will be asked to choose from the list of forms as shown in Figure 9-13. The 'PartialPenetration' form refers to a

pre-designed form which reports all information about the test setup. The Standard form should be used for fully penetrating wells. It will report either Theis, Hantush, or recovery methods depending on the fitting method selected. This form is prepared with metric units. Modify it if you wish to use another system of units.

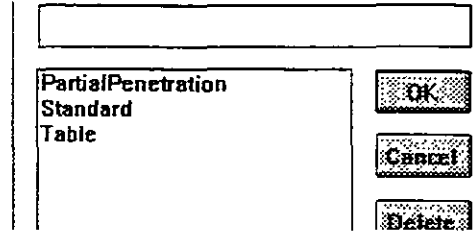


Figure 9-13

The **Table form** will report the single well test data in columns with time intervals, measured and fitted drawdowns, drawdown differences, pumping rates etc. One column will also show whether a point was skipped or included into the fit.

For each type of reporting, whether for single test or for all tested wells, you may create more than one reporting form. When you create such forms using Report Form Editor from the Tools menu, you should save them using Save As .. option, and assign an internal file name. When the Select Fit Form or Select Table Form option is invoked, all these forms will be listed for you to choose from.

You may use the option **Select Diagram Type** to print the test data using one of three types, as shown in Figure 9-12.

Save Diagram is used to save the currently displayed diagram for printing using the **Nonstandard Report** option. As in other applications, you will be prompted to save the graph under a name, and to decide on the diagram size.

9.8. MAKE RANDOM

This routine is explained in more details in Chapter 5, Section 5.6. The program will allow you to select any one

of space distributed numeric parameters available for this application, including some that may have no meaning for contouring (such as e.g. average pumping rate, geometrical parameters referring to the position of pumping and observation well screens, etc.). Normally what you will want to prepare for contouring will include transmissivity, hydraulic conductivity (if you decide to keep this parameter in data base), saturated thickness of aquifer, etc. You should exercise caution in what to contour. Hydrogeological parameters such as storage coefficient, specific yield, and leakance are usually known at occasional points within a large ground water system. It would make more sense to assign different zones with distinct values of such parameters, rather than smoothly changing contour lines implying changes at every point. The random variable offering may look as shown in Figure 9-14.

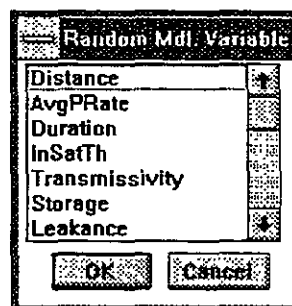


Figure 9-14

9.9. LOAD MAP

This option is explained in details in Chapter 5, subsection 5.3.2. It is used to select a working set, or individual wells to work with, directly from a map.

9.10. HELP

This is context-sensitive on-line help which guides you through various options and procedures.

9.11. EXAMPLE

EXAMPLE FIVE

In this example you will create a pumping test entry, use the editor, fit the Theis curve to data, display the test and print results. The test data are taken from DeWiest's book *Geohydrology*, 1965, page 264-266. The author assumes that this test is a good example of a nonleaky aquifer. The example is as follows:

A completely penetrating well is pumped at a constant rate of 500 gpm. Drawdowns during the pumping period are measured in an observation well 150 ft from the pumped well, at times varying from 2 min to 6 hr. They are recorded in the table below.

Time (min)	Drawdown (ft)	Pumping Rate (gpm)
0	0	500
2	1.2	
3	1.9	
4	2.45	
5	2.9	
6	3.35	
7	3.65	
8	4.1	
10	4.6	
14	5.5	
18	6.15	
24	7	
30	7.75	
40	8.5	
50	9	
60	9.5	
80	10.05	
120	10.3	
180	10.5	
240	10.65	
360	10.8	

The procedure is as follows.

1. From the main menu bar in the GWW select **Applications**.
2. Select **Pumping Tests**.
3. Select **Data**, and click on **General Data Units**. When the window Change Units for ... is displayed click on **Distance**, confirm with **OK** and select feet, then click on **AvgPRate**, again **OK** and select gpm, then click on **Duration** and select minutes. Click on **Transmissivity** and select gpd/ft. Select **StandardError** and select feet. Click on **OK** to return to the Data menu.
4. Type DW-1 in the Well Ident field, press TAB; type Example from DeWiest's book, 1965, p.264-266 in the Description field, press TAB; type 150 in the Distance field; press TAB.
5. Notice that the well list contains the well number DW-1. Click with mouse on DW-1 in the well list window.
6. Select **Edit**, followed by **Measurements Units**. Click on **Time** and select minutes. Repeat the procedure (Edit, Measurements Units) and select **Drawdown**. Click on feet. Repeat once again, select **Pumping rate** and select gpm.
7. Go once again to **Edit** and select **Edit Attributes** to confirm that the Confined Aquifer box is crossed (if not click inside the box), and that Partial Penetration box is empty.
8. From Edit menu select **Edit Measurements**. Check that the time is in min, drawdown in ft, and pumping rate in gpm.
9. Start typing. Type 0 in Time column, press TAB, type 0 in Drawdown column, press TAB; type 500 in Pumping Rate column, press TAB twice. The cursor should be in first column of the line two.
10. Type 2 in Time column, press TAB; type 1.2 in Drawdown column, press TAB; press TAB twice to move to the line 3. Type 3, press TAB; type 1.9, press TAB; press TAB twice more to move to the next time interval.



11. Type 4, press TAB; type 2.45; press TAB three times.

12. Keep typing until the last line, type 360 in Time column, press TAB; type 10.8 in Drawdown column. Stop here. The screen should display as shown in Figure 9-15. Instead of pressing TAB save the table by holding down the CTRL key and pressing S (for save).

13. You are back in the application's main menu. Select Display to look at what you just typed. Select Log-Lin Diagram. The screen's display should look as shown in Figure 9-16.

DW-1			
Time(min)	Depth (feet)	Q (gpm)	Skip
0	0	500	
2	1.2		
3	1.9		
4	2.45		
5	2.9		
6	3.35		
7	3.65		
8	4.1		
10	4.6		
14	5.5		
18	6.15		
24	7		
30	7.75		
40	8.5		
50	9		
60	9.5		
80	10.05		
120	10.3		
180	10.5		
240	10.65		
360	10.8		

Figure 9-15

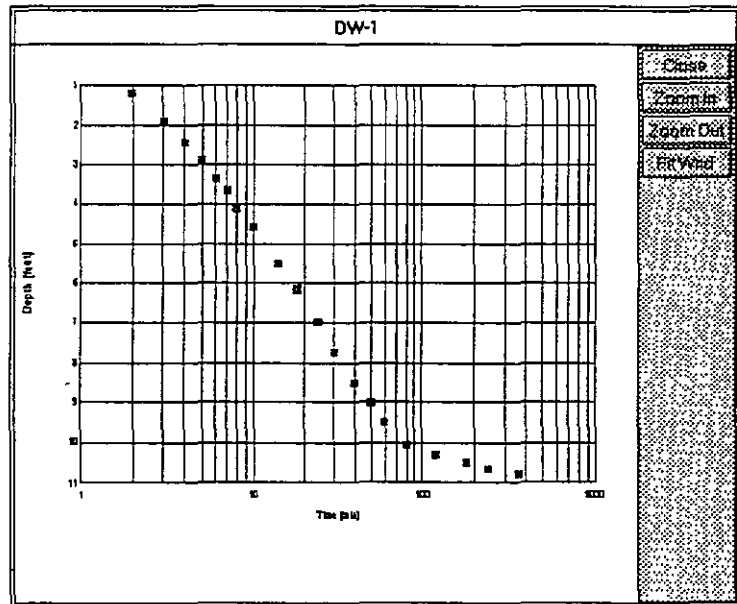


Figure 9-16



14. Click on **Close** on the right side to remove the display.
15. Select **Fit**, followed by **Theis Method**. Wait until the results are displayed. The screen should look as shown in Figure 9-17. Notice the results:

Pumping Test			
Well Ident 14-2	Description Example from DeWiest's book, 1965, p.264-266		
Obs. Well Distance 150.00	Average Pumping Rate 500.0000	Duration 360.0000	Initial Saturated
Results			
Transmissivity 27175.77	Storage Coefficient 0.0002952360	Leakance	Estimate Error
Fit Method		Theis Method	

Figure 9-17

- Transmissivity = 27,175.74 gpd/ft
 - Storage coefficient = 0.000295
 - Estimate Error = 0.67 ft.
16. Select **Display**. Select **Log-Lin Diagram**. The fitted curve is as shown in Figure 9-18. Not too good!
 17. Print results by selecting **Report** and **Print Fit**.
 18. Check whether this may be a leaky aquifer case. First remove the diagram from the display by clicking on **Close**.
 19. Select **Fit** followed by **Hantush method**. Wait until the processing is finished and notice the results:
 - Transmissivity: 16,177.67 gpd/ft
 - Storage coefficient = 0.00043
 - Leakance = 0.00616 1/day



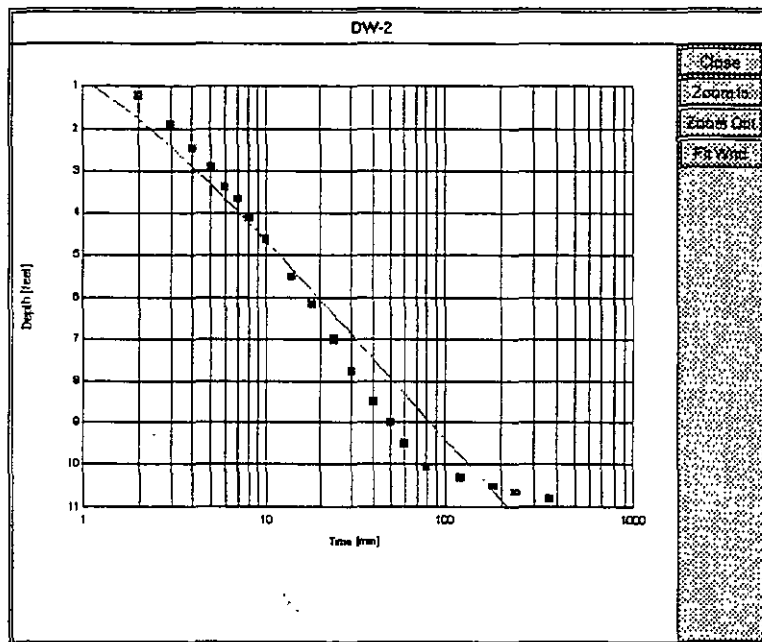


Figure 9-18

- Error estimate = 0.14 ft.
20. Look at the fit. Select Display, followed by Log-Lin Diagram. The display is as shown in Figure 9-19. Notice that the fit is much better. You do not need to look at the display. The comparison of Error estimates is sufficient to tell you which method fits better.

Finally compare the results from the book with these results. Transmissivity in the book is equal to 20,500 gpd/ft, storage coefficient is equal to 0.000315. While storage coefficients are of about the same order of magnitude, the "nonleaky" transmissivity is overestimated for about 26%. It appears that the aquifer is less transmissive, but a portion of pumped water is supplied from leakage.

This ends the example.



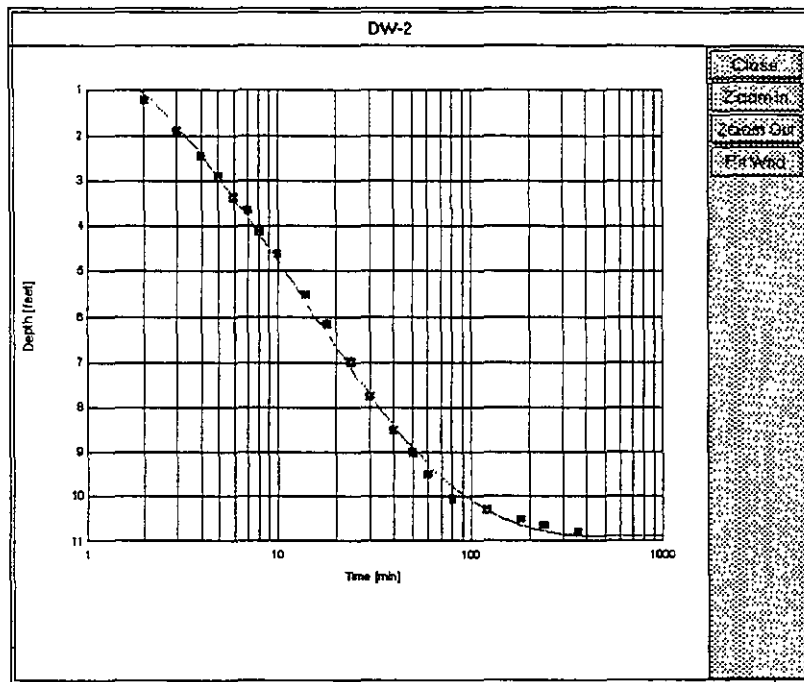


Figure 9-19

This page intentionally left blank.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

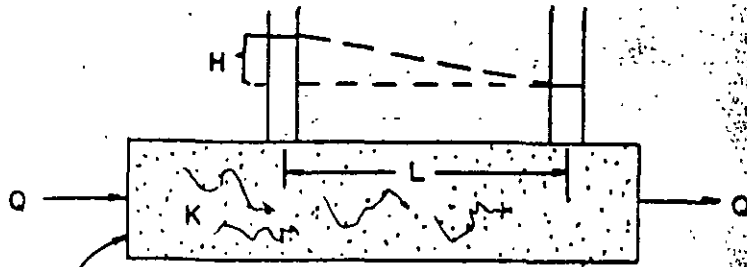
**DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS**

**MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS
CA 166**

Del 18 al 22 de octubre del 2004

**Tema Anexo
MODELOS DE TRANSPORTE**

**EXPOSITOR: M. EN C. FERNANDO LARA GUERRRO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004**



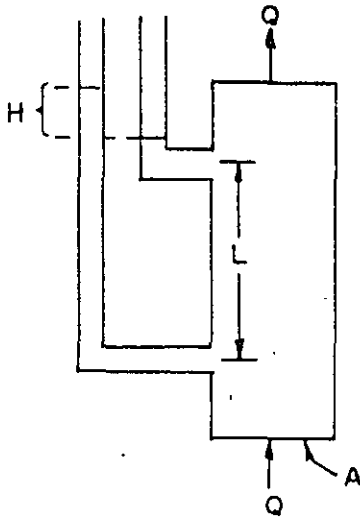
Gradiente = $H/L = i$, la energía requerida para mover el agua L .

Q = Flujo (gpd).

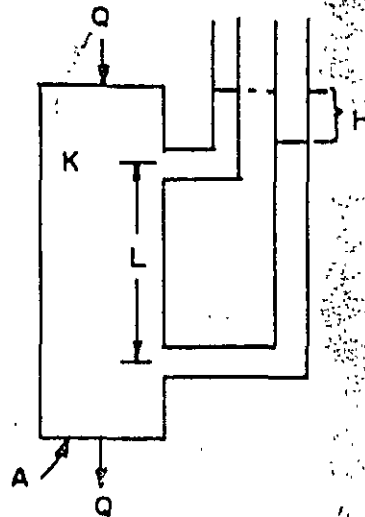
A = Área transversal (ft^2).

K = Conductividad hidráulica = gpd ft

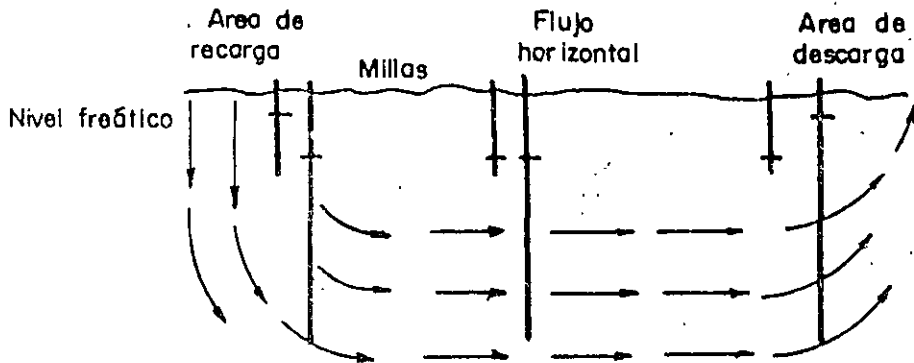
Tubo vertical con flujo ascendente



Tubo vertical con flujo descendente



Condiciones de campo



Explicación gráfica de la ley de Darcy.

Modelación Numérica del Flujo y Transporte de Contaminantes

Ing. Fernando Lara
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Problemas Asociados a la Contaminación de Acuíferos

En general, se deben responder tres preguntas básicas relacionadas con los contaminantes en el subsuelo:

En qué dirección se mueven ?

Con qué velocidad se mueven ?

Cuál será su concentración en el tiempo y el espacio?

Objetivos de la Modelación de Transporte de Contaminantes

- Análisis de la trayectoria y tiempo de arribo de los contaminantes
- Evaluación de la pluma contaminante en el espacio y el tiempo
- Estimación de la concentración y curvas de concentración
- Evaluación del riesgo a la contaminación
- Evaluación de medidas de saneamiento y protección de acuíferos

Transporte de Solutos en un Sistema de Flujo Subterráneo

Transporte de masa

Advección

Dispersión

Difusión

Transferencia de masa

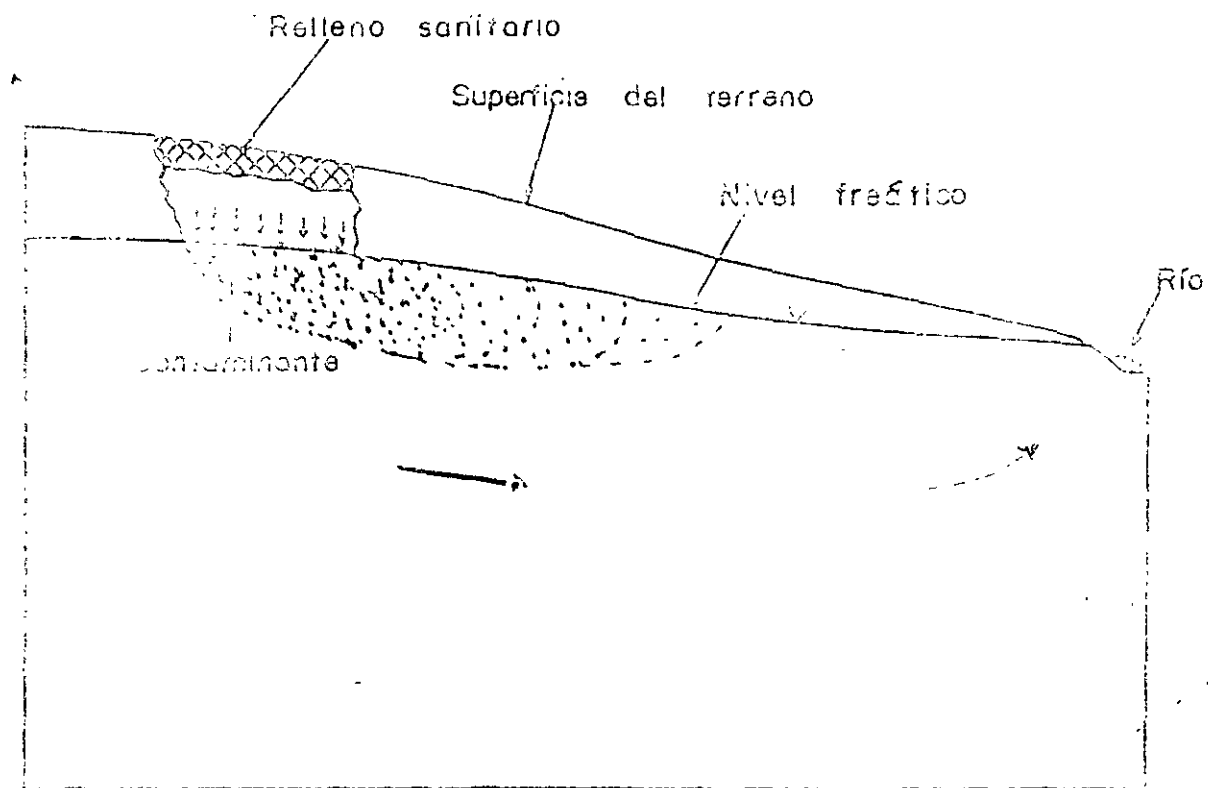
Filtración

Adsorción-absorción

Intercambio iónico

Precipitación

Biodegradación



Representación esquemática de la contaminación del agua subterránea en una sección transversal de un sistema acuífero (*Pickens y Leno*).⁶

ADVECTION AND DISPERSION OF A CONTAMINANT SLUG

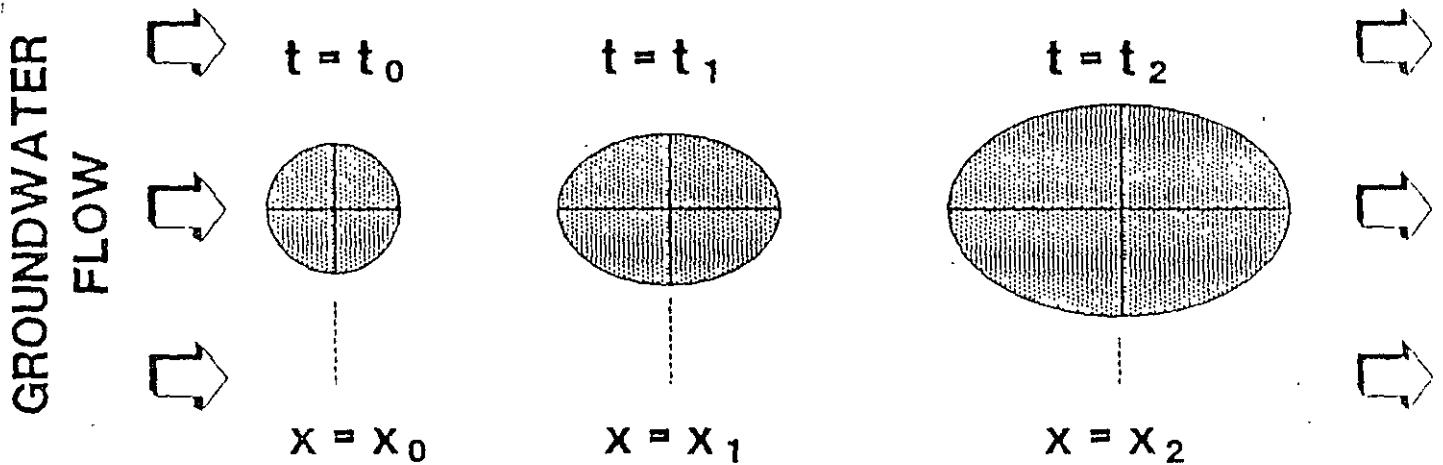


Figure 11. Transport of a contaminant slug through a porous aquifer.

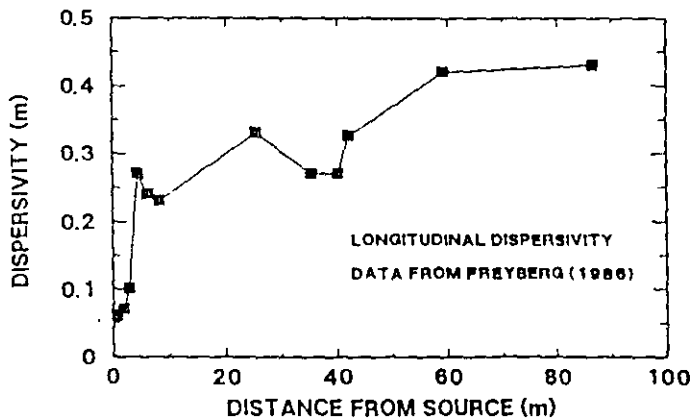


Figure 12. Increase in longitudinal dispersivity with transport distance.

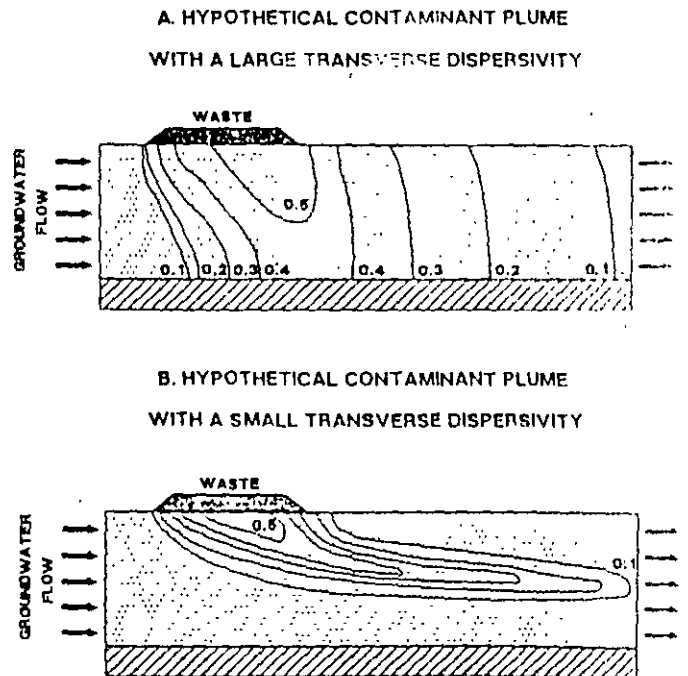
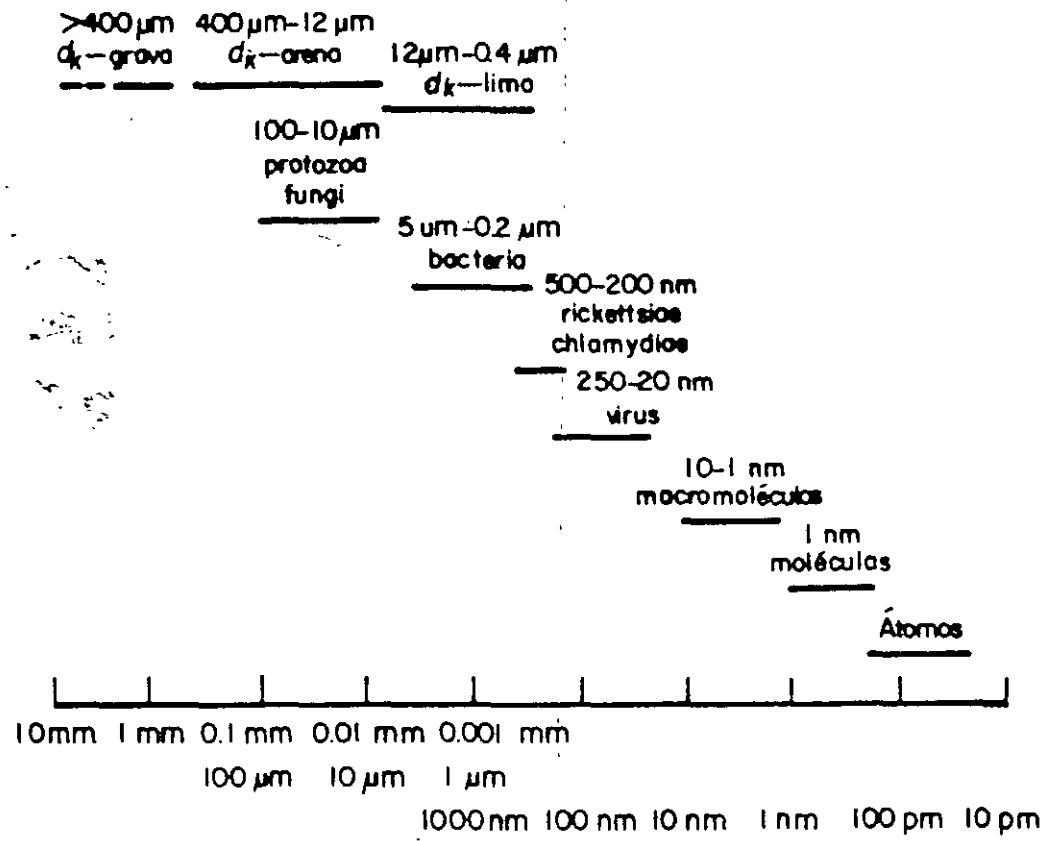
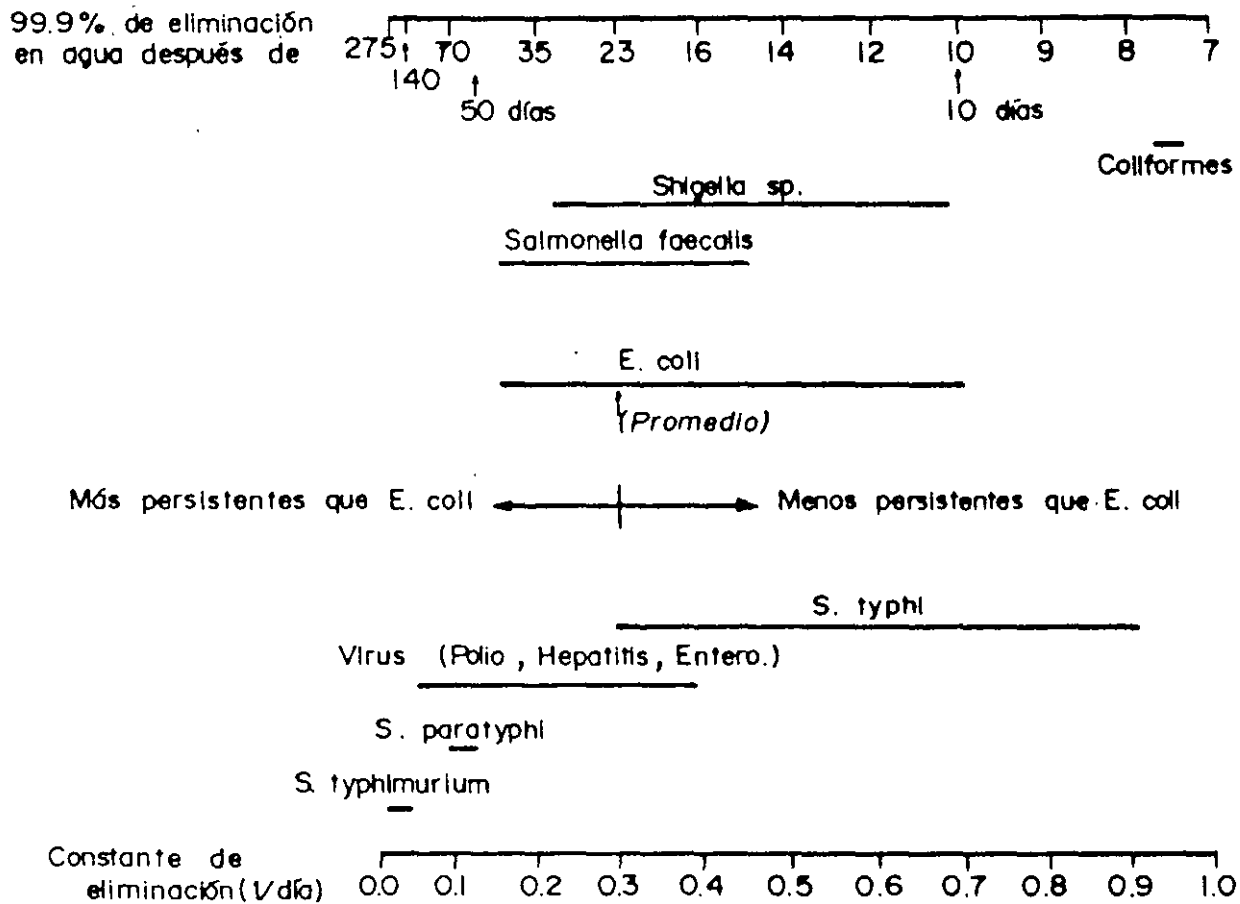


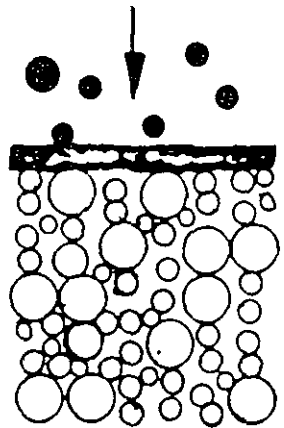
Figure 13. Hypothetical contaminant plumes for large (A) and small (B) dispersivities.



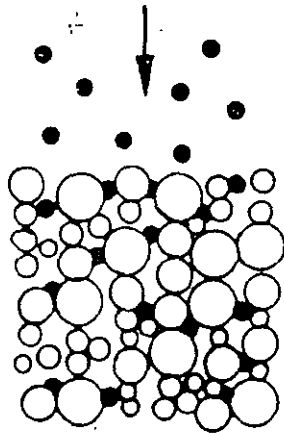
Comparación de los tamaños de los organismos con respecto al tamaño de los granos de sedimento, moléculas y átomos. (Modificado de Matthes y Pekdeger, 1985).

Constante de eliminación del 99.9% de algunas bacterias y virus en el agua subterránea.

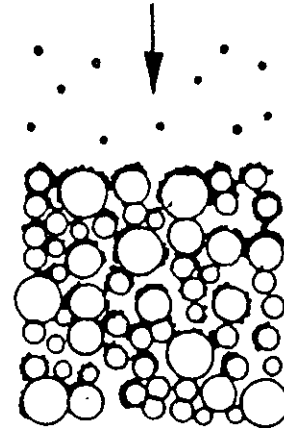




LODO SUPERFICIAL



FILTRACION



FISICO - QUIMICO

Mecanismos de filtración que limitan el movimiento de partículas a través del medio poroso (*Mc Dowell-Boyer et al., 1986*)

Procesos que controlan el transporte de masa

<i>Proceso</i>	<i>Definición</i>	<i>Impacto en el transporte</i>
<u>Advección</u>	Movimiento de masa como resultado del flujo subterráneo	Uno de los procesos más importantes de transporte.
<u>Dispersión</u>	Mezcla de fluidos debido al efecto de la heterogeneidad en el subsuelo.	Mecanismo de atenuación. Reduce y dispersa la concentración del contaminante.
<u>Difusión</u>	Movimiento de concentración en respuesta a un gradiente de concentración	Mecanismo de atenuación. Reduce la concentración

(Adaptado de NCR, 1991)

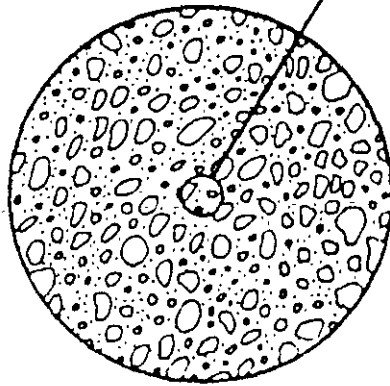
ESCALAS DE HETEROGENEIDAD EN LOS ACUÍFERO

(ADAPTADO DE SPITZ Y MORENO, 1996)

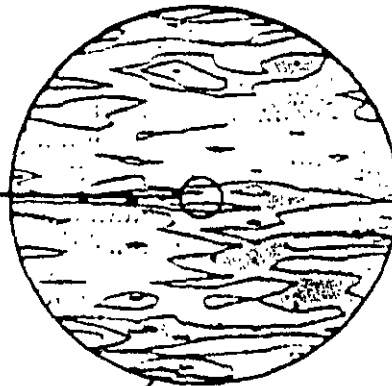
ESCALA DE PORO



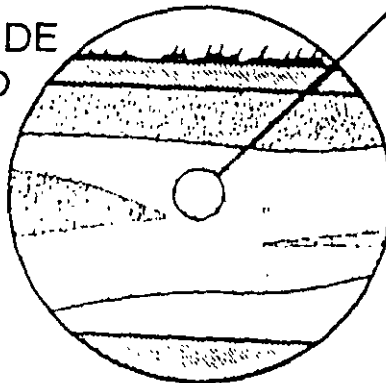
ESCALA DE PORO-GRANO



ESCALA DE PORO-MATRIZ



ESCALA DE CAMPO



Introducción

Los modelos de computo son herramientas esenciales para analizar problemas complejos de flujo y transporte en el subsuelo.

Los modelos se refieren a la aplicación de programas de computo que resuelven un conjunto de ecuaciones, que representan el modelo matemático de un proceso físico o químico que ocurre en el subsuelo

Su aplicación permite estimar la respuesta de la carga hidráulica y la concentración cuando hay variaciones en las propiedades hidráulicas y en la recarga o extracción de un acuífero.

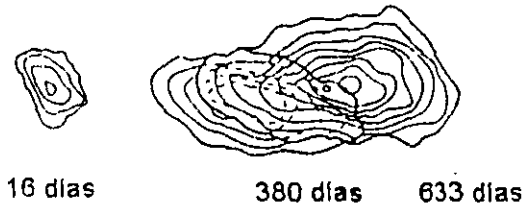
Ecuación de flujo en tres dimensiones:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

Cloruro,
(Advección y dispersión)



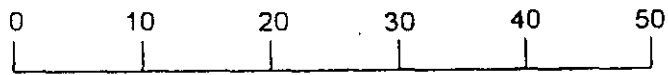
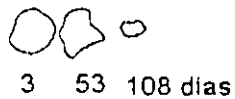
Tetraclo,
(Advección, dispersión y sorpción)



Tetracloroetileno,
(Advección, dispersión y sorpción)



Tolueno
(Advección, dispersión, sorpción y biodegradación)



Distancia en m

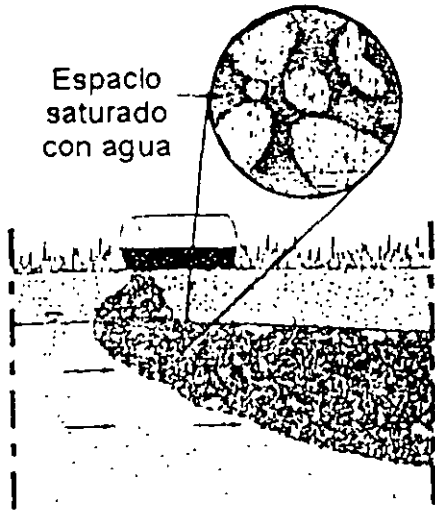
➔ Distancia del flujo

EFFECTO COMBINADO DE LOS FENÓMENOS DE ADVECCIÓN, DISPERSIÓN, SORPCIÓN Y BIODEGRADACIÓN EN UN ACUIFERO DE ARENA EN BORDER, ONTARIO. (ADAPTADO DE SPITZ Y MORENO, 1996)

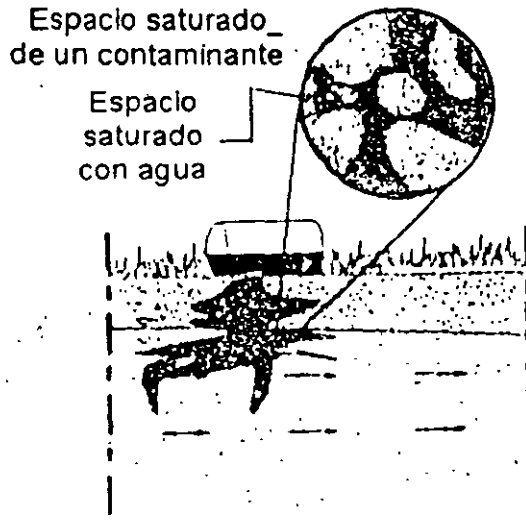
Características de los Modelos de Transporte de Contaminantes

- Los modelos de transporte son una valiosa herramienta para el análisis y la solución de problemas de contaminación en el subsuelo.
- Su aplicación más útil radica en simular escenarios y evaluar métodos para el saneamiento de los acuíferos.
- Es poco probable que las capacidades predictivas de los modelos mejoren en el futuro. El desarrollo de los modelos se dirige a modelos de tipo estocástico.

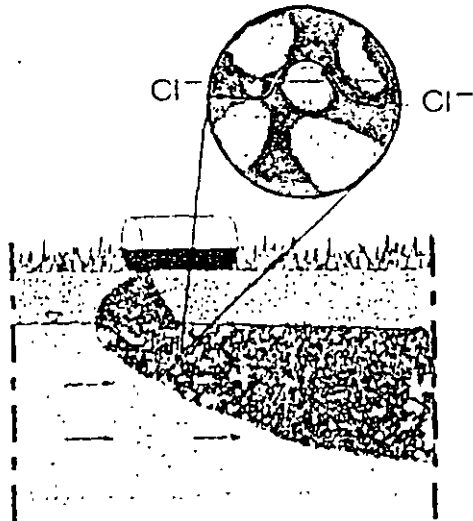
Saturación en una fase (miscible)



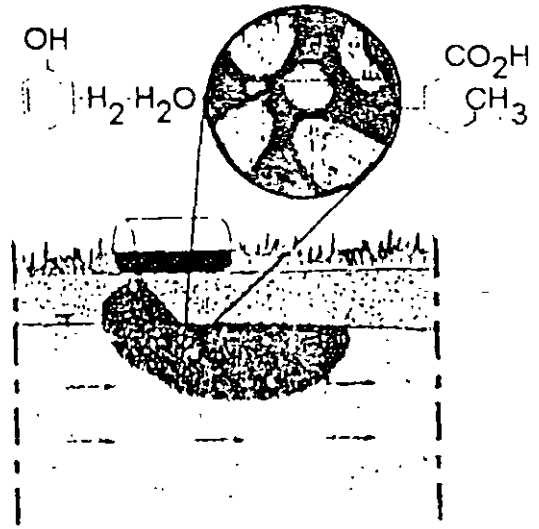
Saturación en varias fases (Inmiscibles)



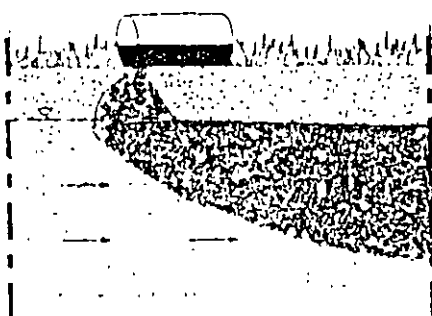
Elemento conservativo



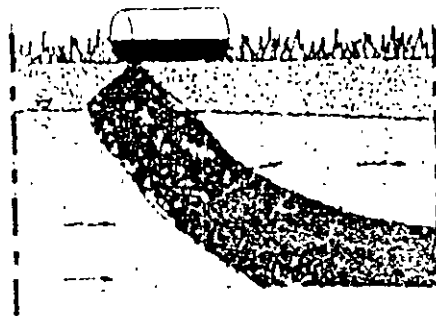
Elemento no conservativo



Igual densidad



Diferencia de densidades



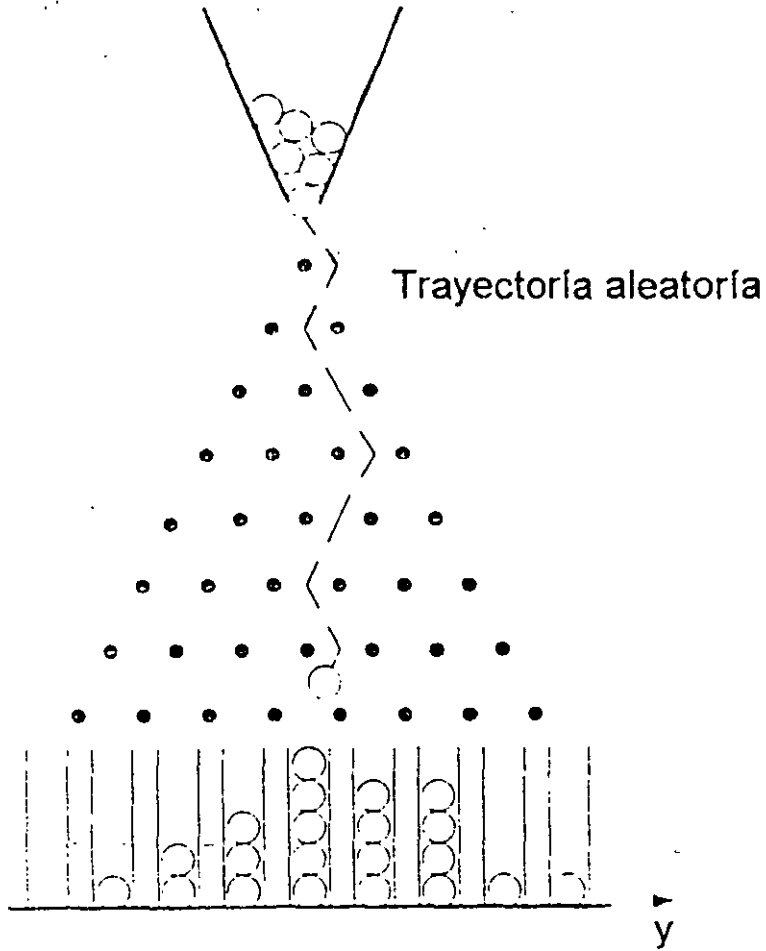
TIPOS DE CONTAMINANTES Y SU EFECTO SOBRE EL FLUJO Y TRANSPORTE EN EL SUBSUELO

(ADAPTADO DE SPITZ Y MORENO, 1996)

Características de los Modelos de Transporte de Contaminantes.

- En un modelo de transporte existe una gran diferencia si los solutos están presentes en una capa de baja o alta velocidad.
- Una parte fundamental del modelo de transporte de contaminantes es la construcción del modelo de flujo. Este debe satisfacer un alto grado de exactitud.
- Los modelos de transporte poseen menor poder predictivo que los modelos de flujo.

Modelo Físico



Aproximación analítica

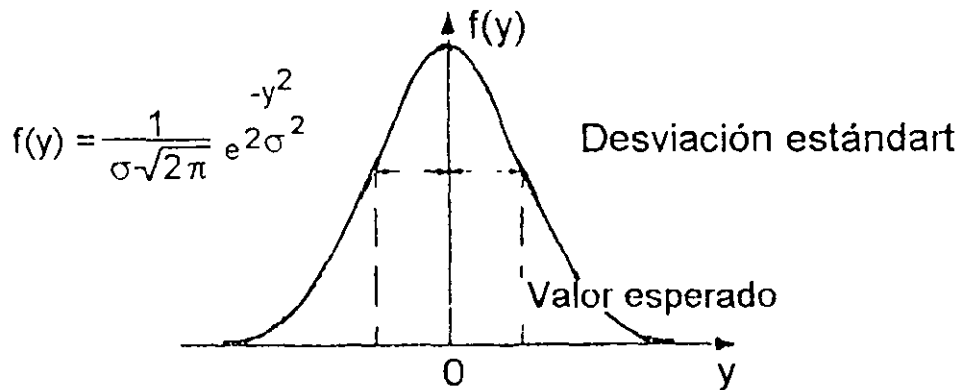
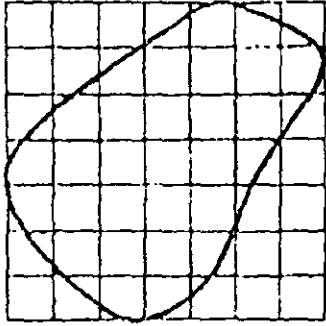


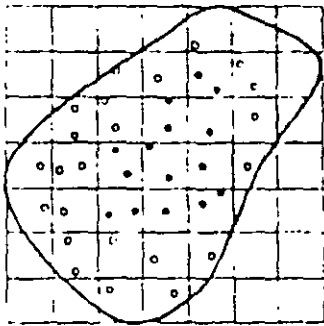
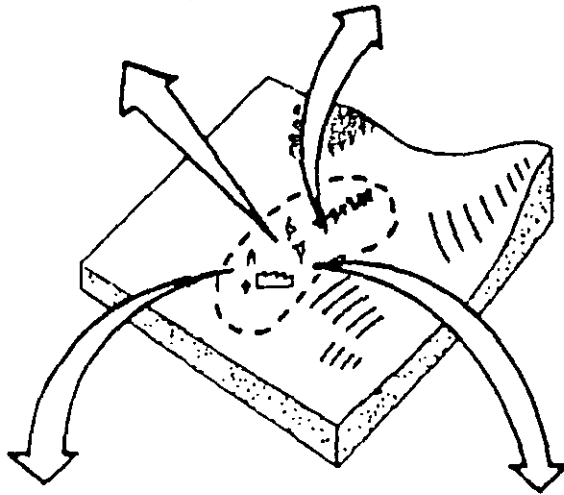
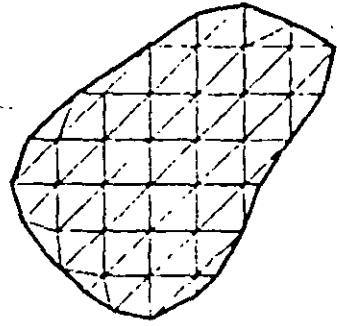
ILUSTRACIÓN DEL FENÓMENO DE DISPERSIÓN LATERAL

(ADAPTADO DE SPITZ Y MORENO, 1996)

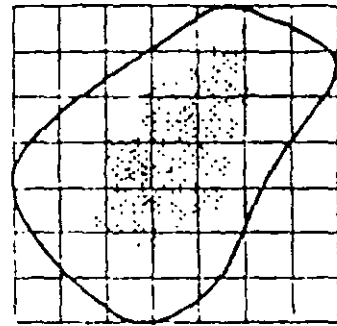
DIFERENCIAS FINITAS



ELEMENTOS FINITOS



METODO DE LAS CARACTERISTICAS



TRAYECTORIA ALEATORIA ("RANDOM WALK")

TIPOS DE MODELOS DE TRANSPORTE

Solución Numérica de la Ecuación de Transporte

La ecuación de transporte en una dimensión en un medio poroso homogéneo e isotrópico que incluye sorpción y decaimiento, se puede expresar como (Fetter, 1990):

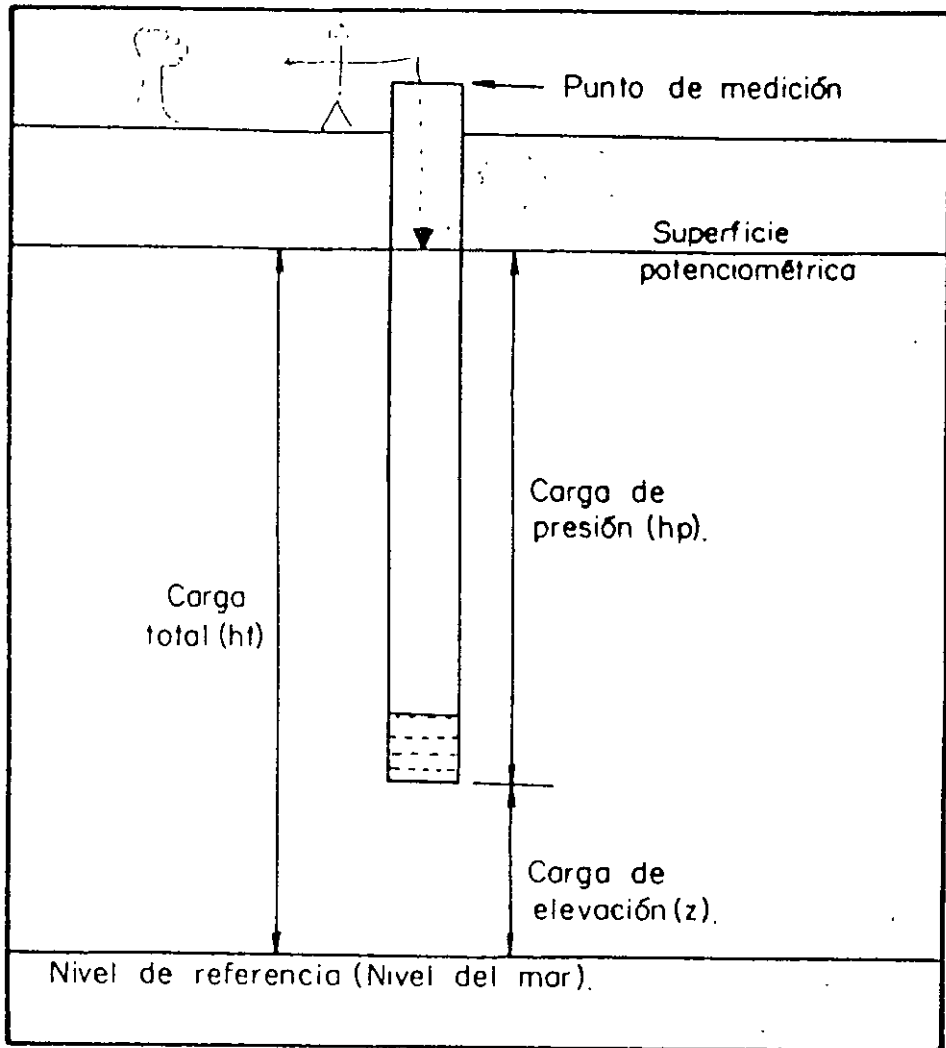
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{Bd}{\phi} \frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{\text{reac}}$$

dispersión

advección

sorpción

reacción



Relación entre carga hidráulica total, carga de presión y carga de elevación.

Tipos de Modelos Numéricos

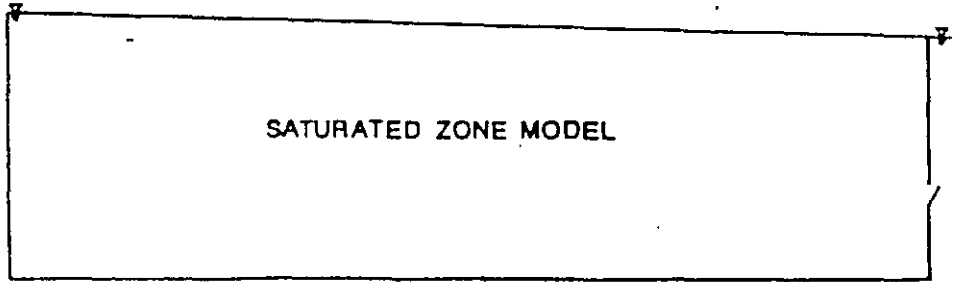
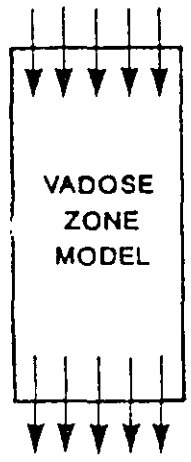
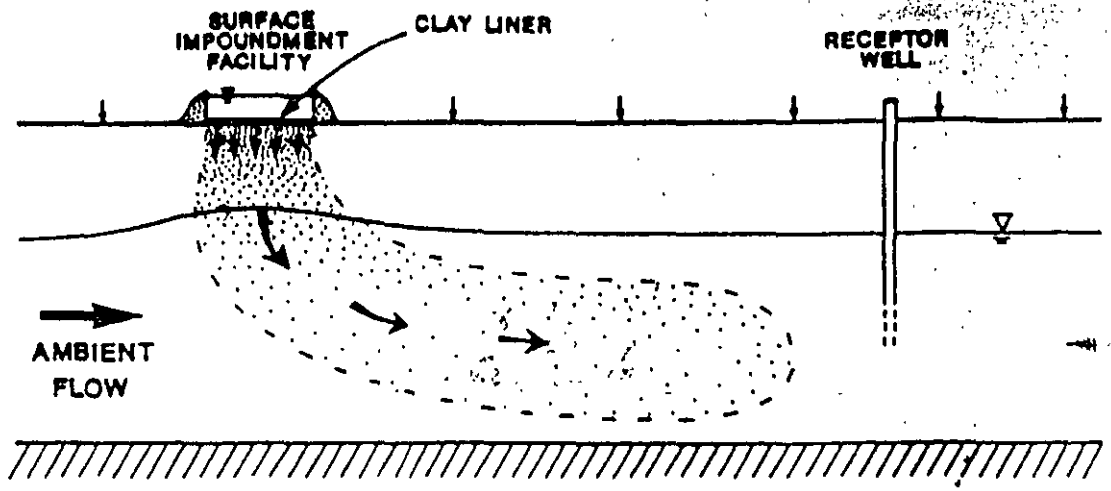
(Anderson, MP. Prickett, T., A, 1994)

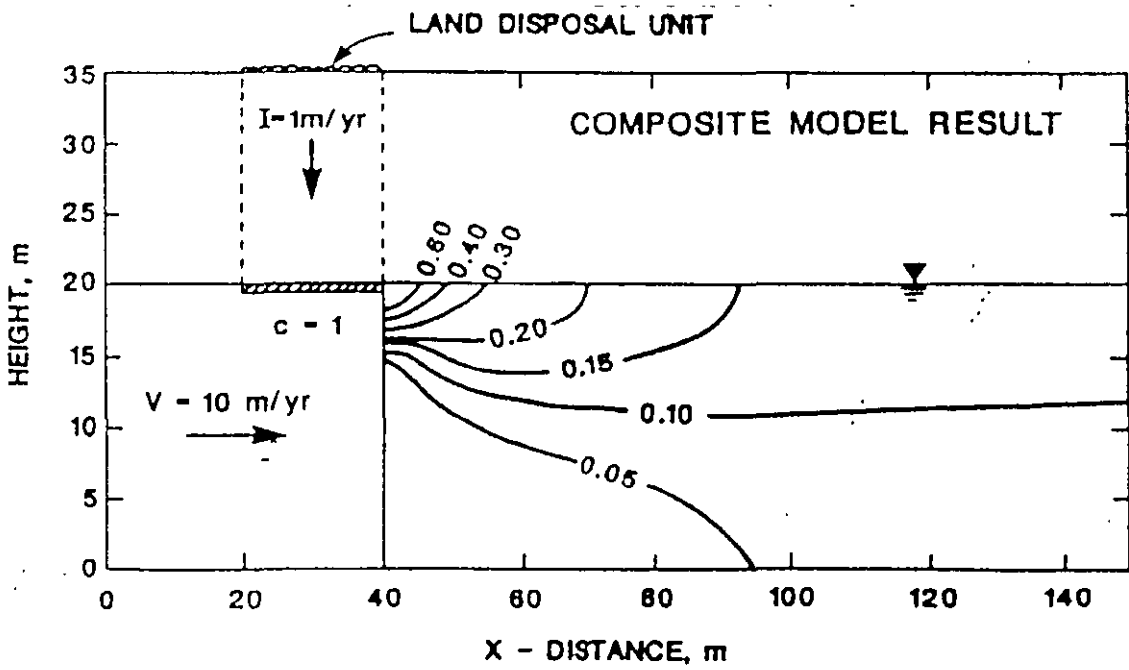
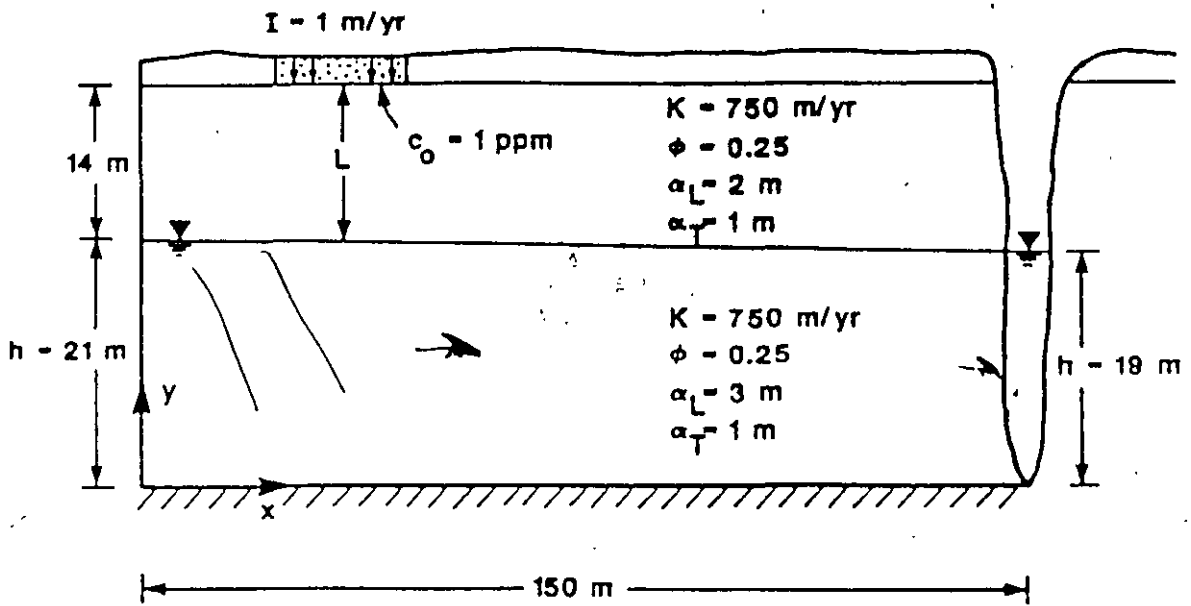
Familias de Programas

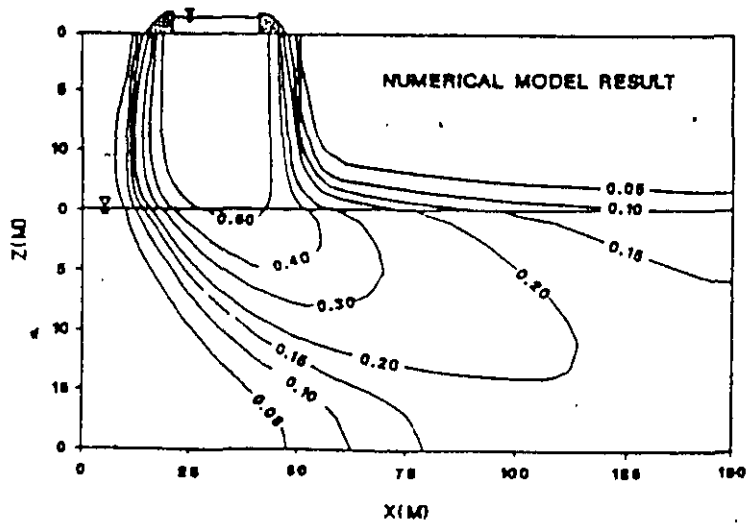
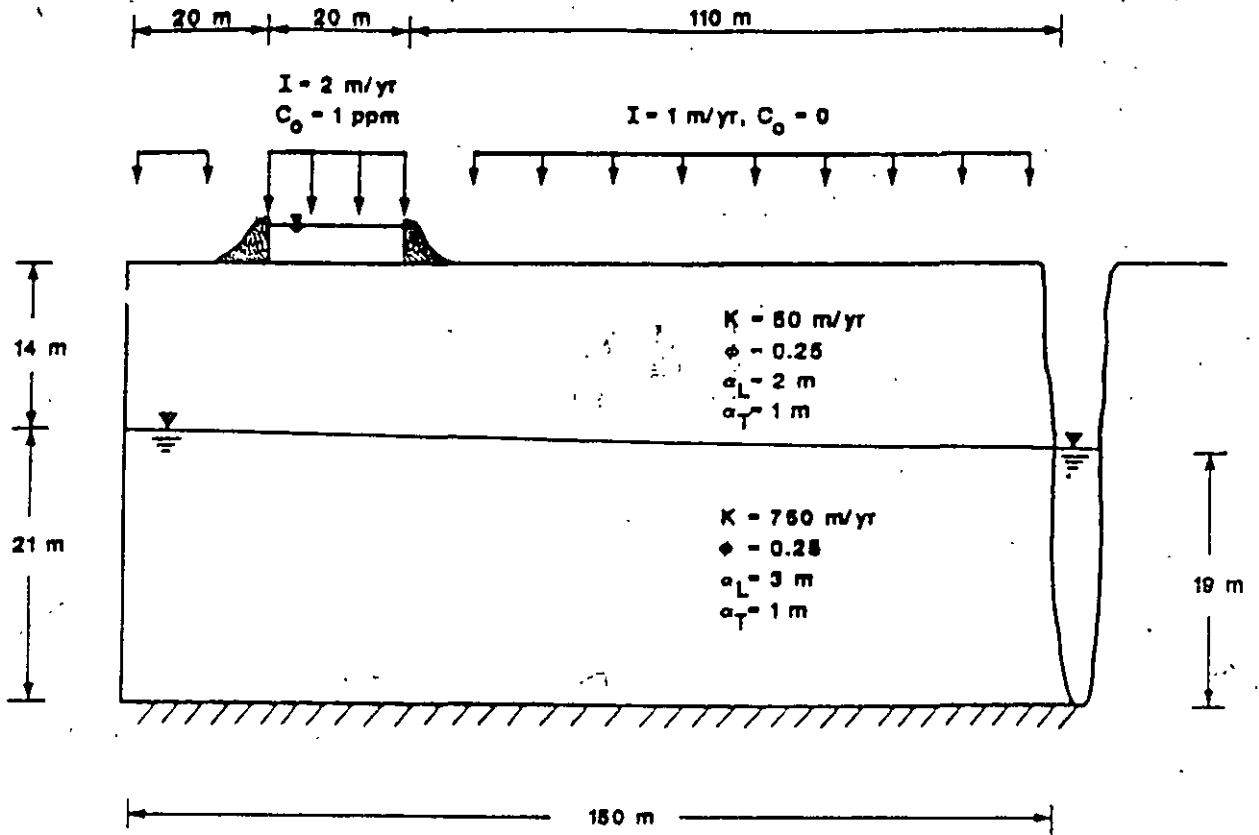
Flujo subterráneo	PLASM	MODFLOW	AQUIFEM
Transporte	RNDWALK	MT3D	
Trayectoria de partículas	FLOWPATH	PATH3D	MODPATH
Flujo saturado variable		FEMWATER	VS2D
Transporte saturado variable		FEMWASTE	VS2DT

Programas únicos

Flujo subterráneo	AQUIFEM-1
Transporte	BIO1D, USGS MOC, SWIFT/389
Flujo saturado variable	UNSAT2
Transporte en un medio variable saturado	SUTRA







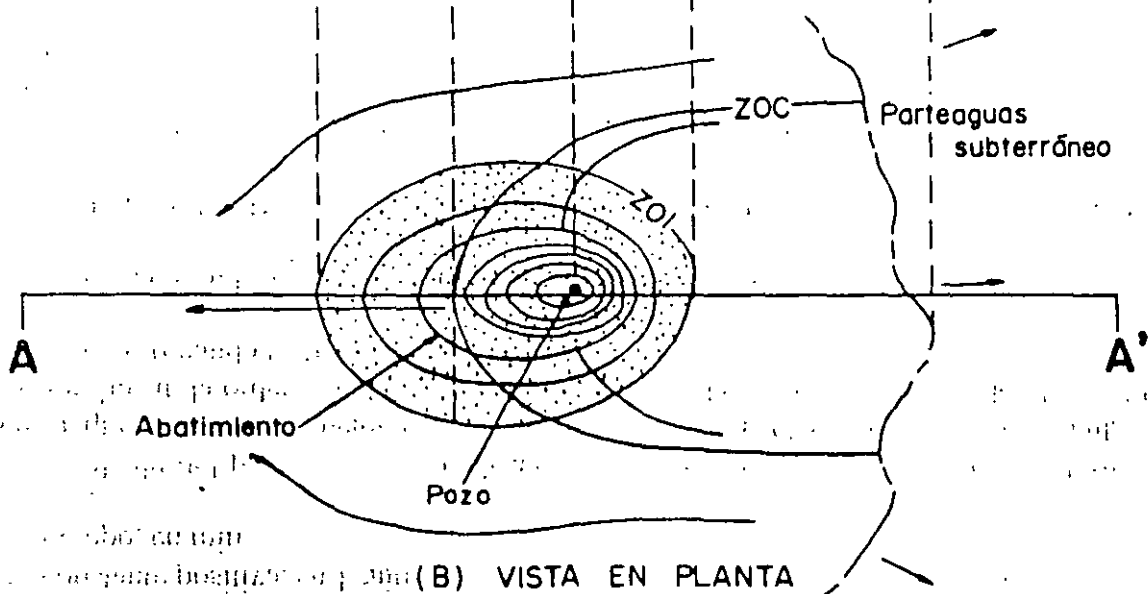
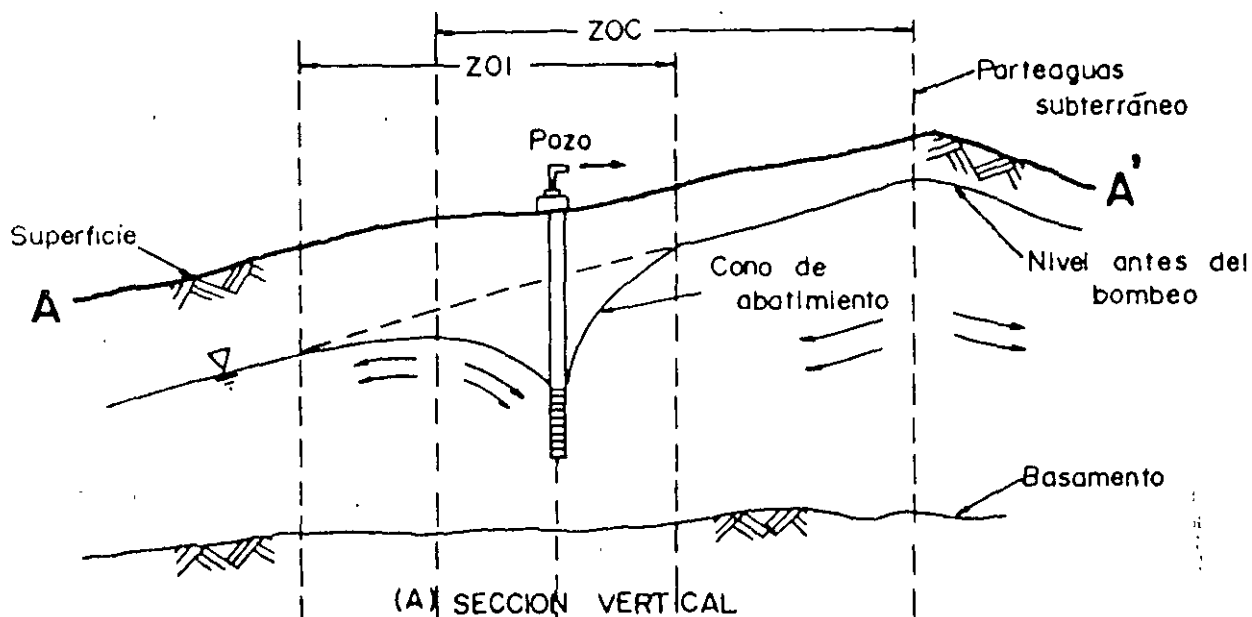
Modelos de Trayectoria de Partículas

Los programas que simulan el movimiento de los solutos únicamente por advección se conocen como modelos de trayectoria de partículas ("Particle tracking"). No calculan la concentración de solutos.

Debido a su fácil aplicación son más populares que los programas de transporte de solutos. Las simulaciones permiten calcular la trayectoria de las partículas y el tiempo de tránsito.

Los modelos de trayectoria de partículas son una alternativa para simular el transporte de solutos cuando el grado de incertidumbre, asociado con los parámetros de dispersión y de retardación es muy grande.

Área de protección de fuentes subterráneas de abastecimiento de agua potable.



SIMBOLOGIA



Nivel estático



Dirección de flujo



Pozo de bombeo

ZOI Zona de influencia

ZOC Zona de contribución

Datos Requeridos por un Modelo de Transporte

I. Modelo de Flujo

- Mapa hidrogeológico
- Continuidad y espesor de capas permeables y confinantes
- Distribución de T y S
- Mapa de elevación del nivel estático y sus variaciones en el tiempo
- Distribución del bombeo en el tiempo y el espacio
- Estimación y distribución de la recarga
- Interacción agua superficial y agua subterránea

2. Modelo de Transporte de Solutos

- Distribución de las cargas hidráulicas calculadas en el modelo de flujo
- Estimación de parámetros: coef. de dispersión (long. y trans).; porosidad efectiva : factores de retardación
- Concentración de la calidad natural del agua
- Tipo y distribución del contaminante en el tiempo y el espacio



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo

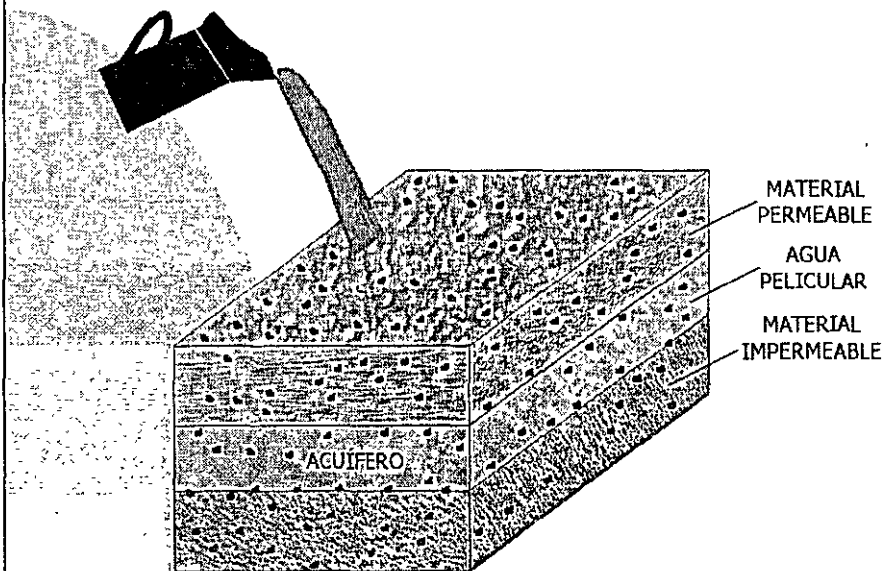
EXPOSITOR: M. EN C. FERNANDO LARA GUERRO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

ASPECTOS GEOHIDROLÓGICOS EN LA
APLICACIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN
DE CONTAMINANTES EN LA ZONA
VADOSA

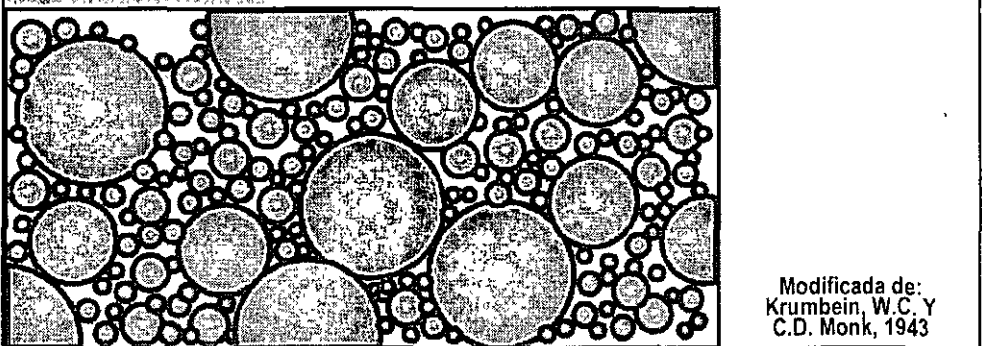
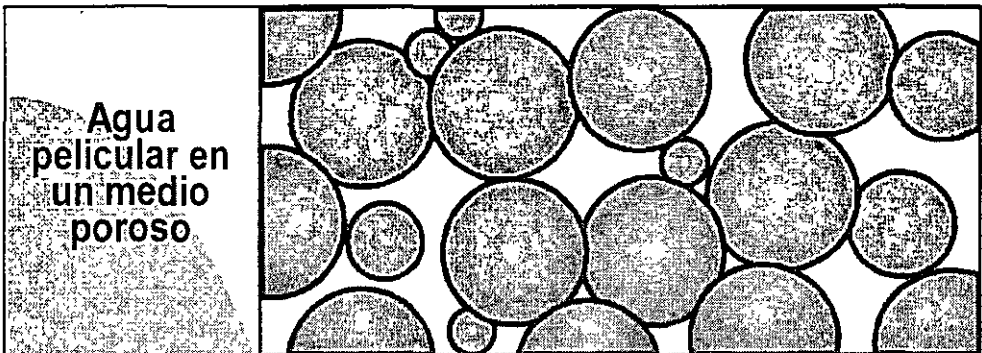
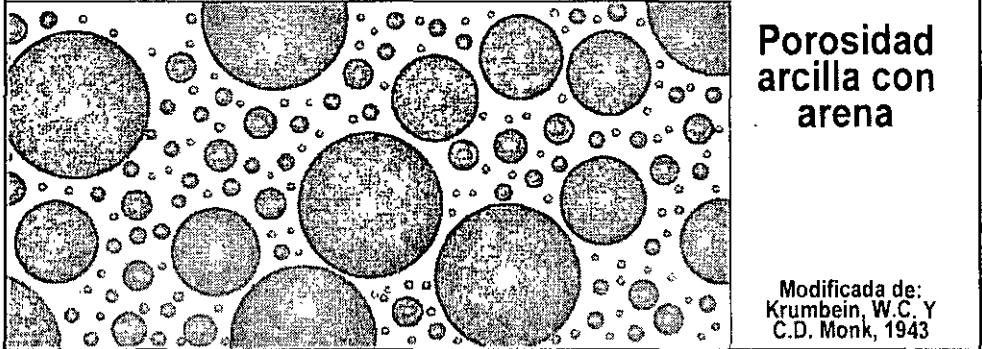
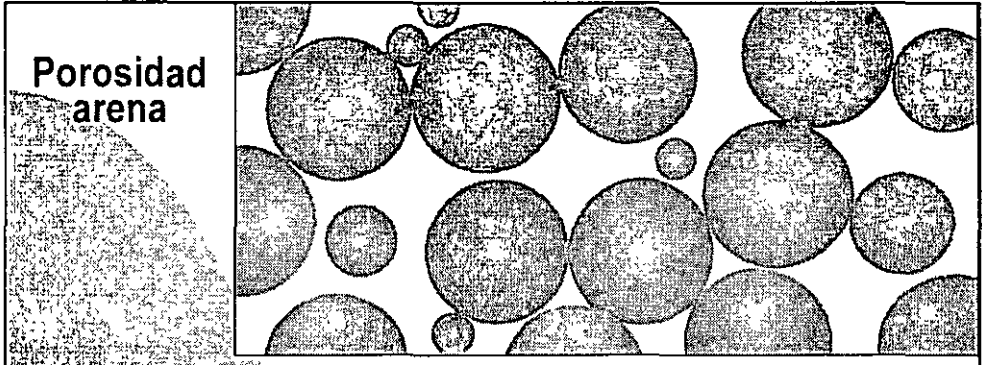
LESSLER, 2003



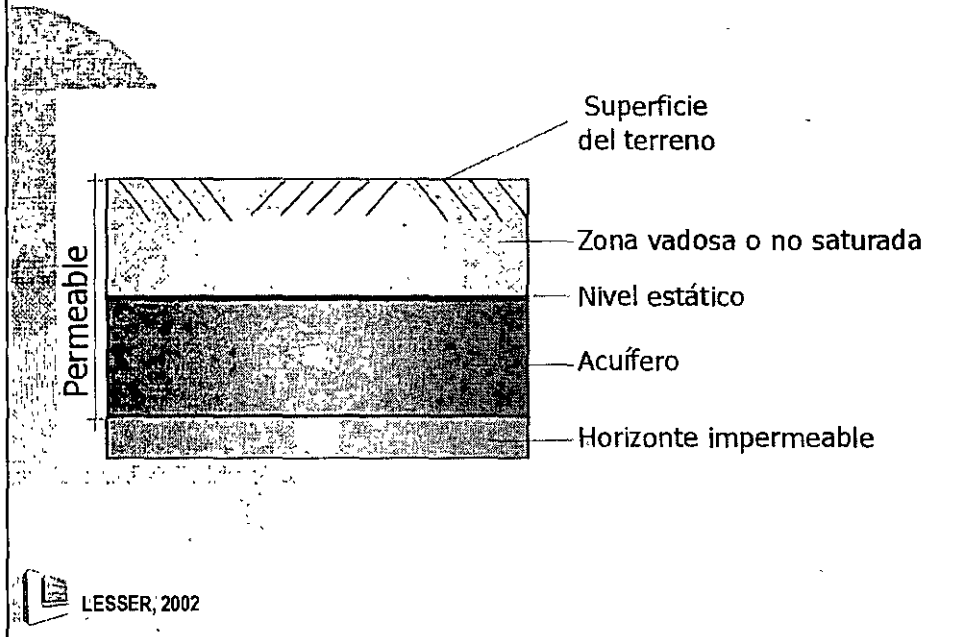
Acuífero



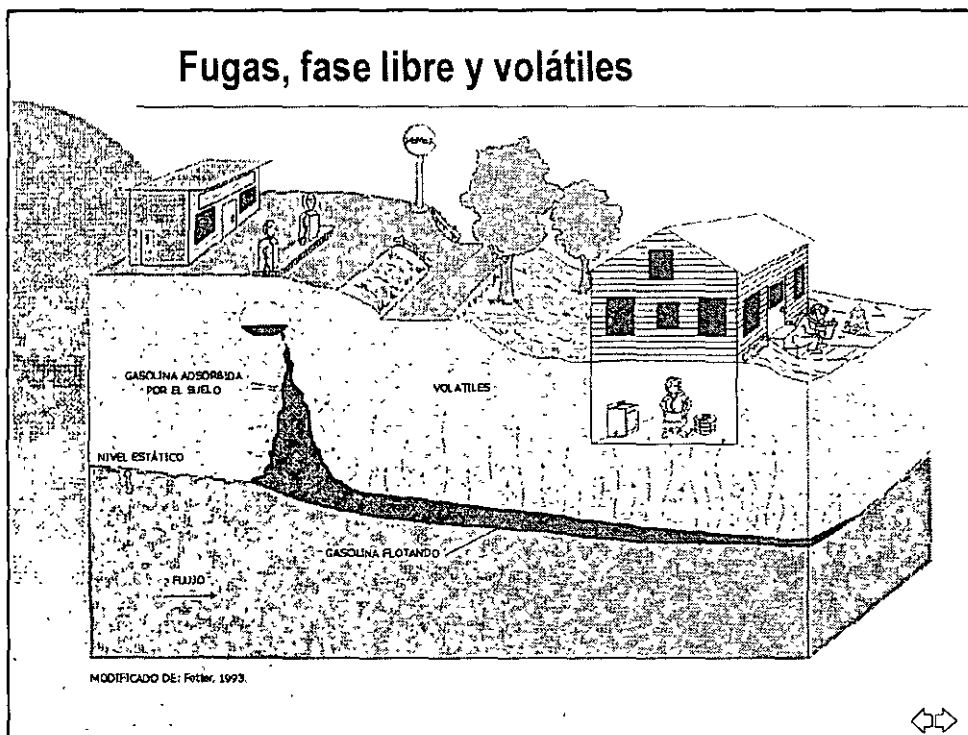
LESSLER, 2002



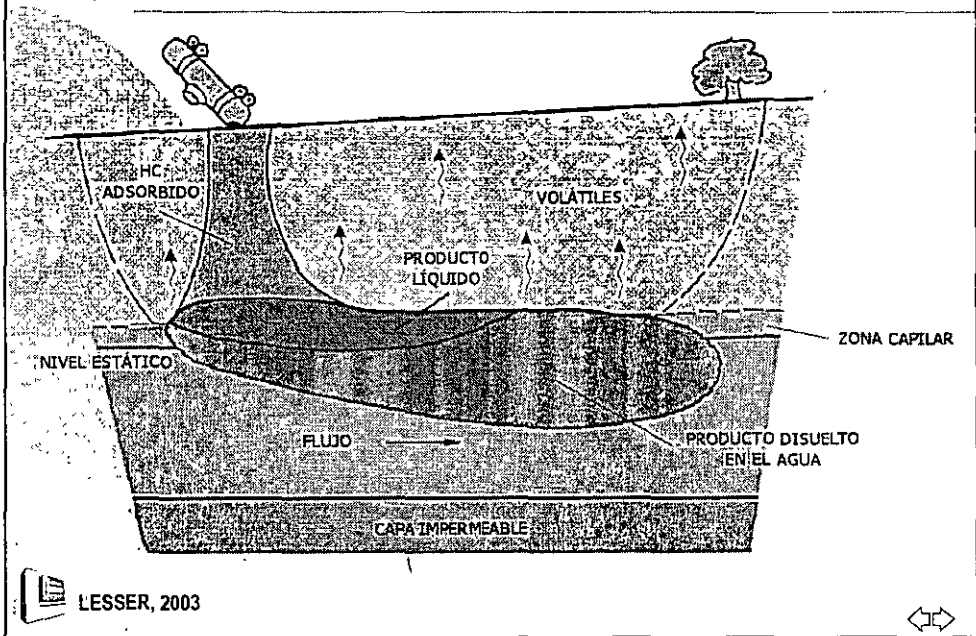
Acuífero



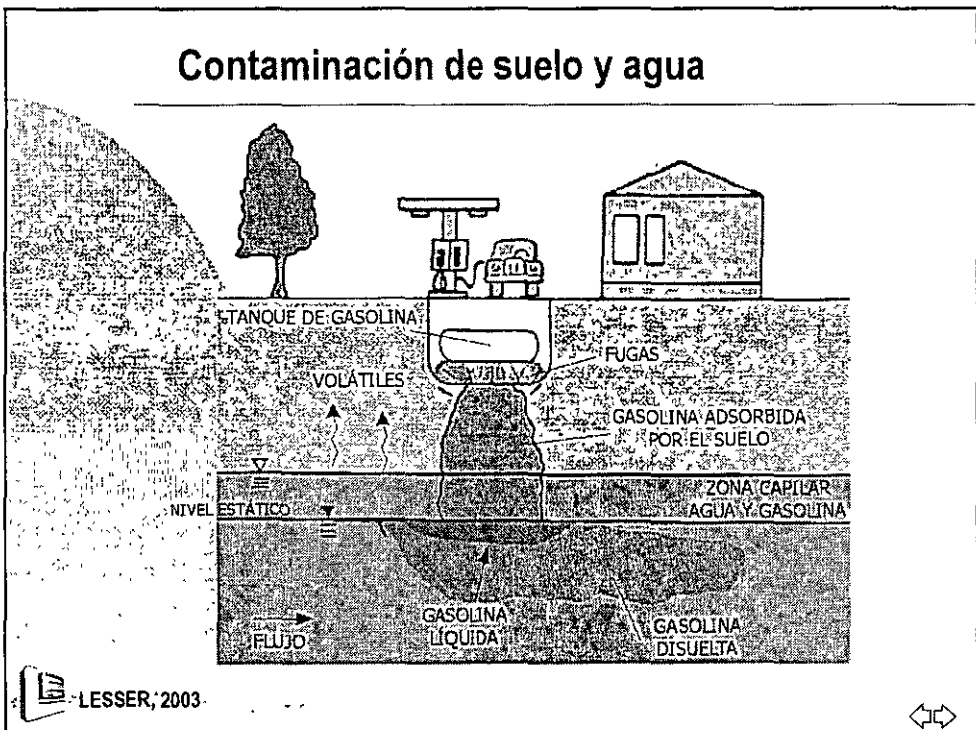
Fugas, fase libre y volátiles



HC libre, adsorbido, volátil y en solución



Contaminación de suelo y agua





FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS

MODULO III
MODELOS MATEMÁTICOS EN
GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS

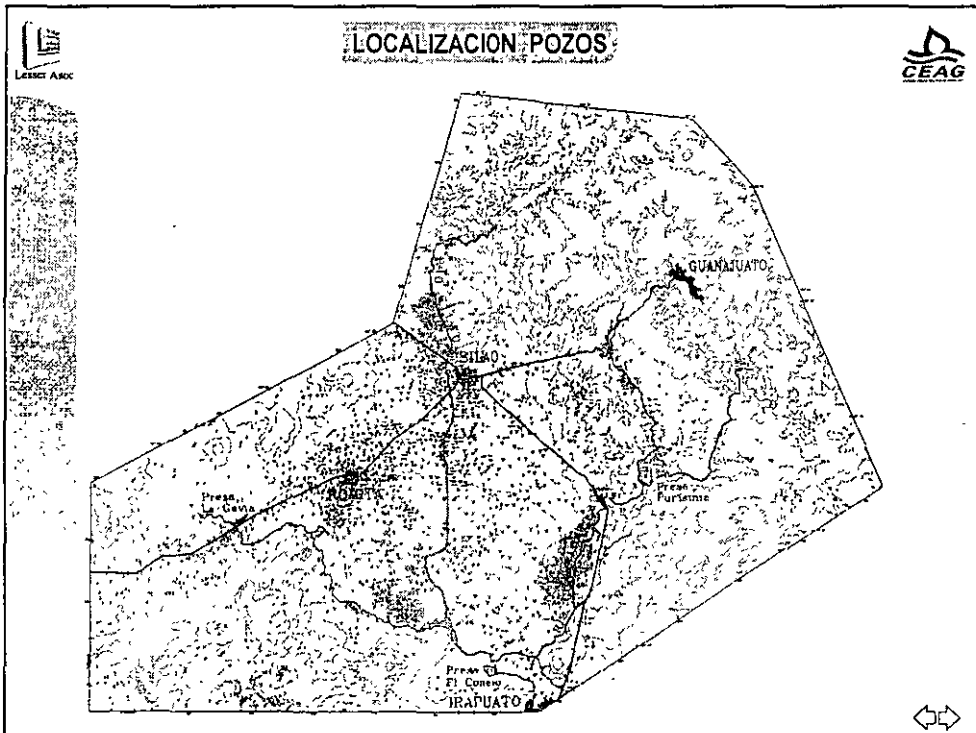
CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

Tema Anexo

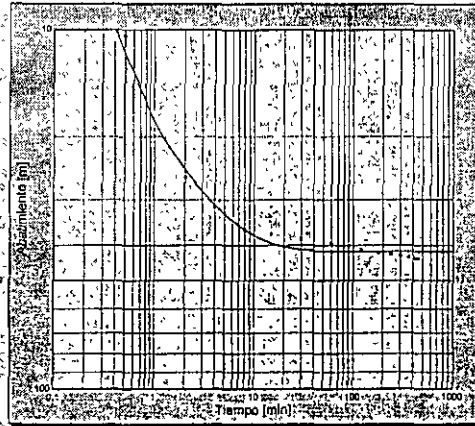
MODELO MATEMÁTICO (MODFLOW) DEL
ACUÍFERO DEL VALLE DE SILAO – ROMITA,
GTO.

EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004






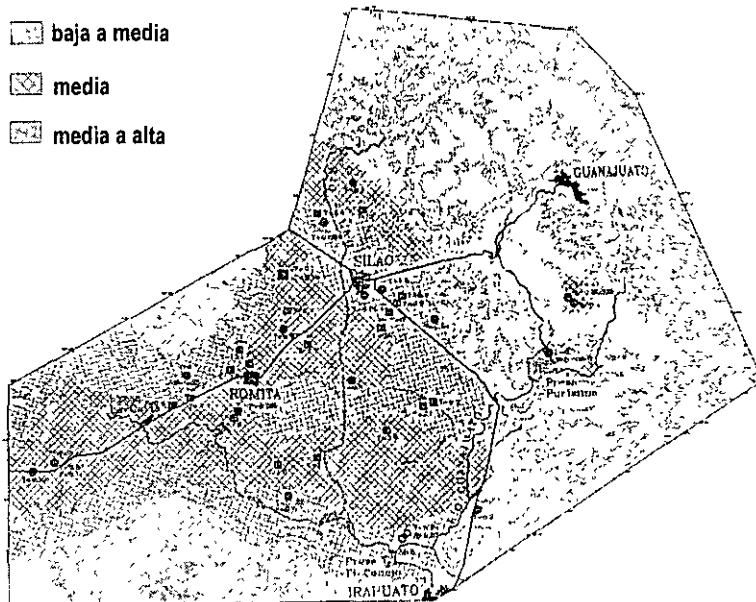
PRUEBAS DE BOMBEO

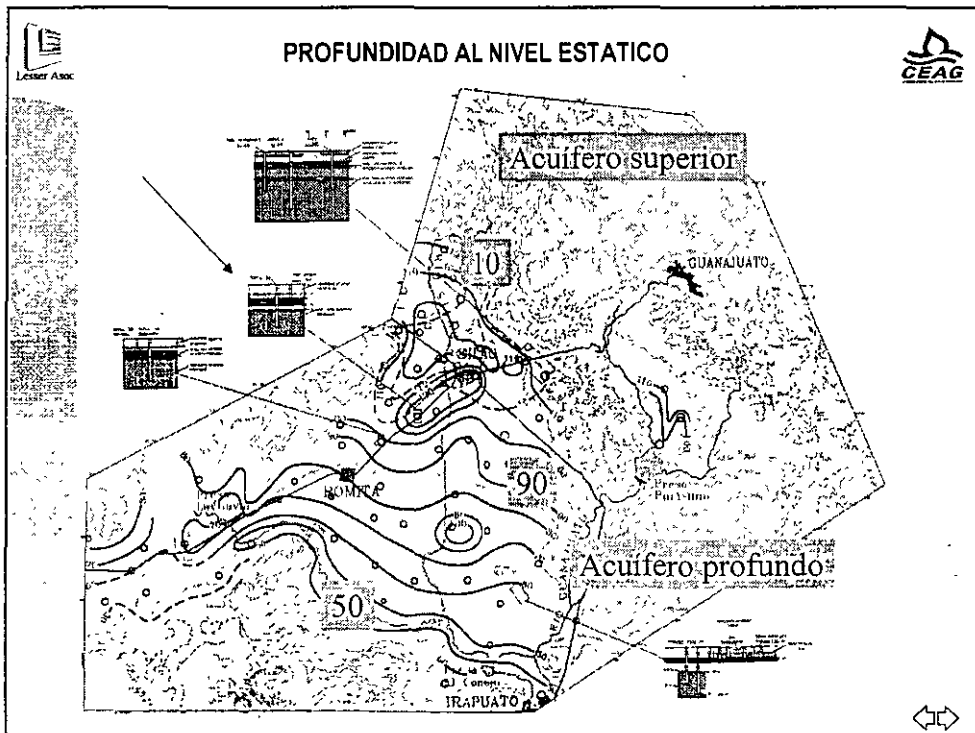
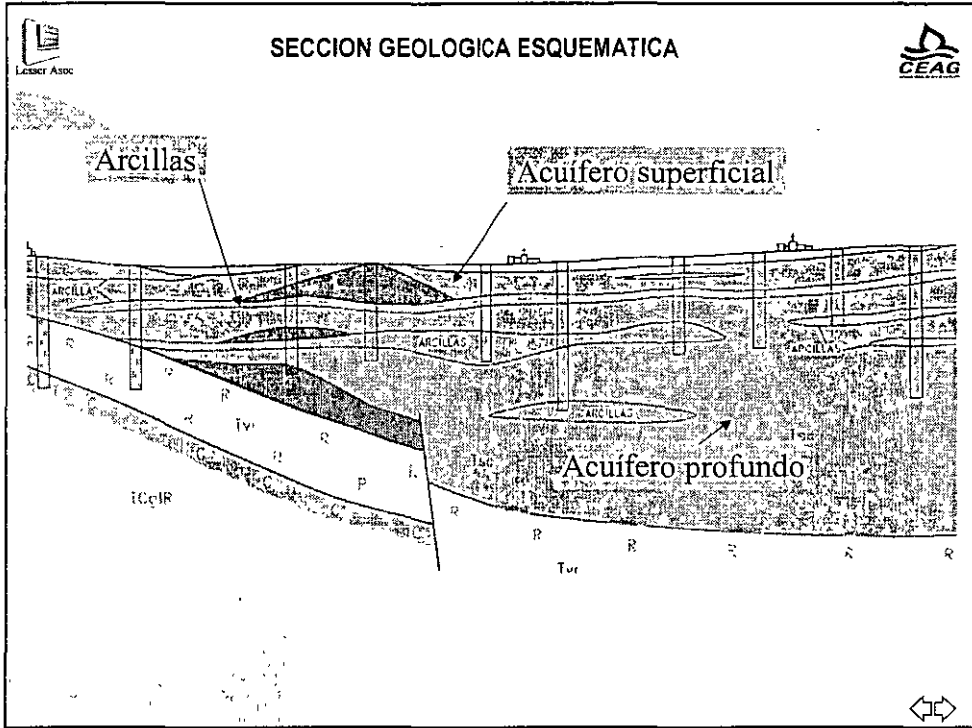
Prueba de Bombeo			
Pozo No. 3442	Lugar 7 Silao-Romica, Gto	Estepa de Recuperación	
Pozo de operación	Distancia al pozo de operación (m) 20	Cuval en m ³ 10.89988	Duración en min 450.0000
Transmisibilidad en m ² /dia 5.503182	Coefficiente de Almacenamiento 2	Resultados Estimación del Error (m) 1.32	
Método utilizado Método de Hantush			

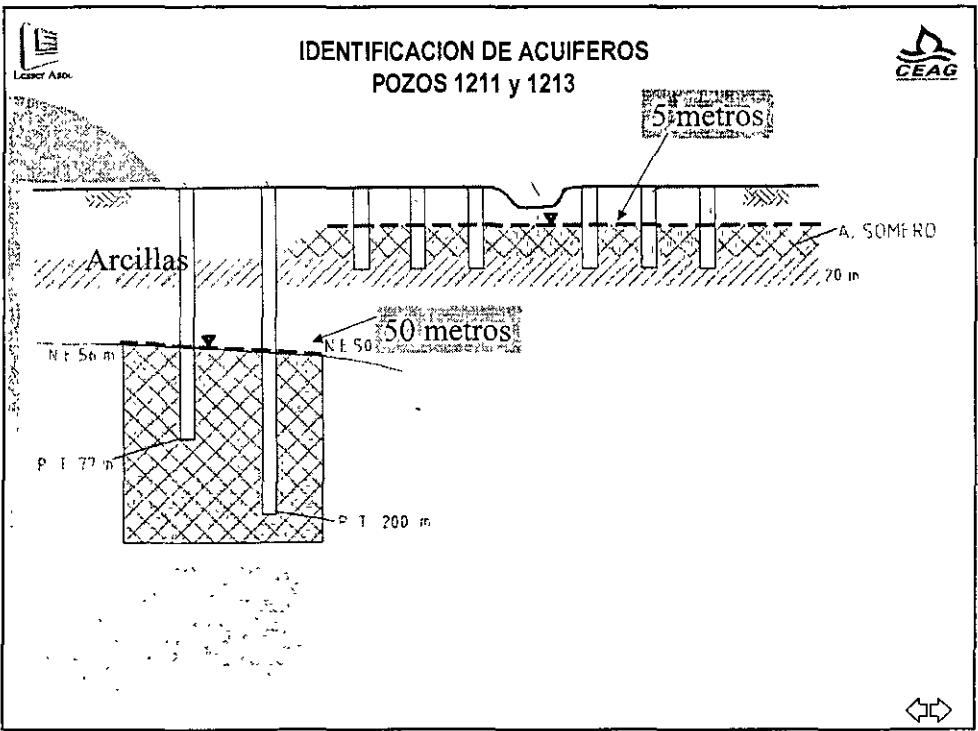
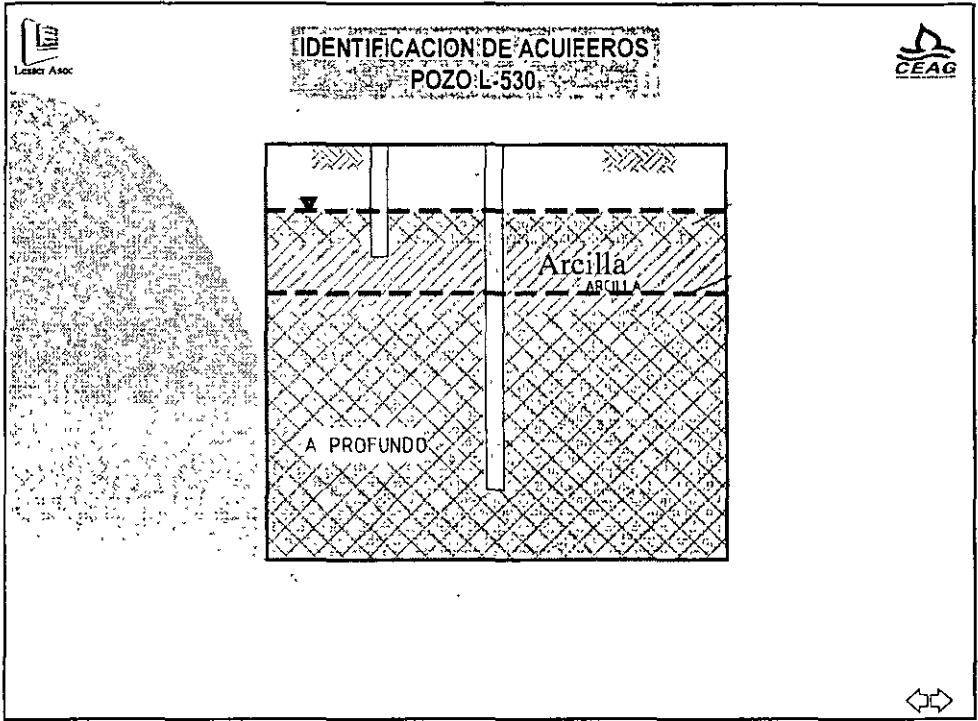


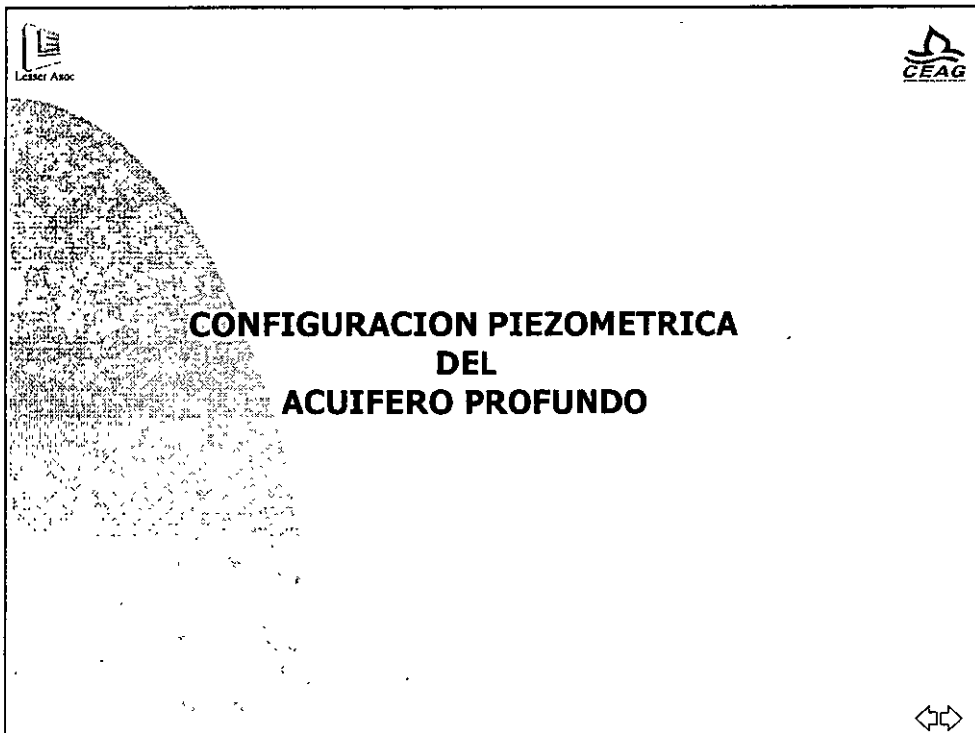
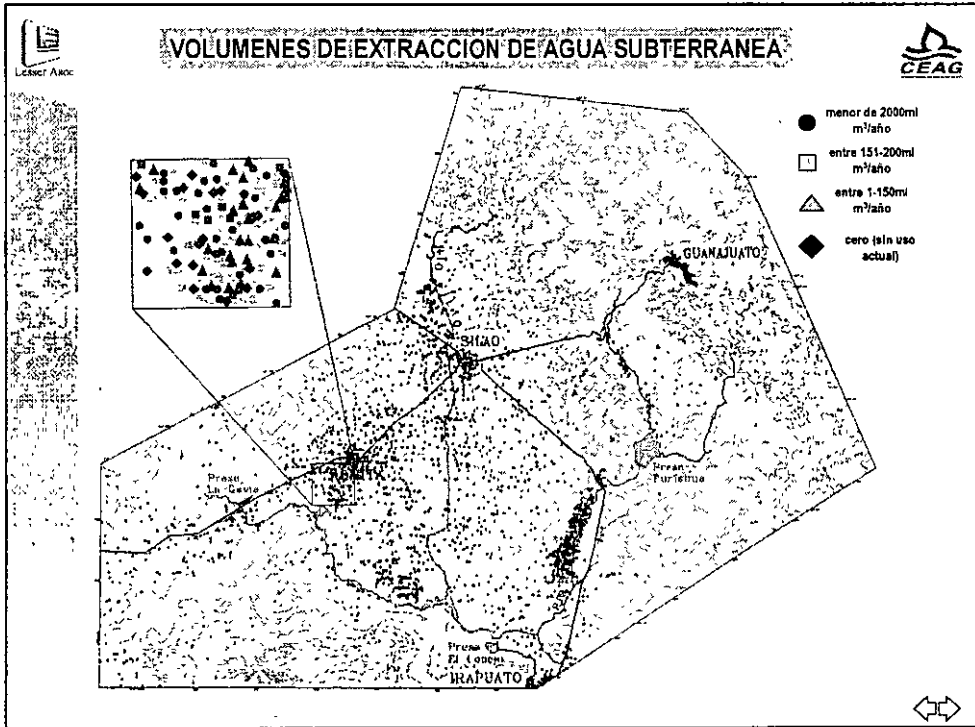
ZONIFICACION DE TRANSMISIBILIDAD

-  baja a media
-  media
-  media a alta



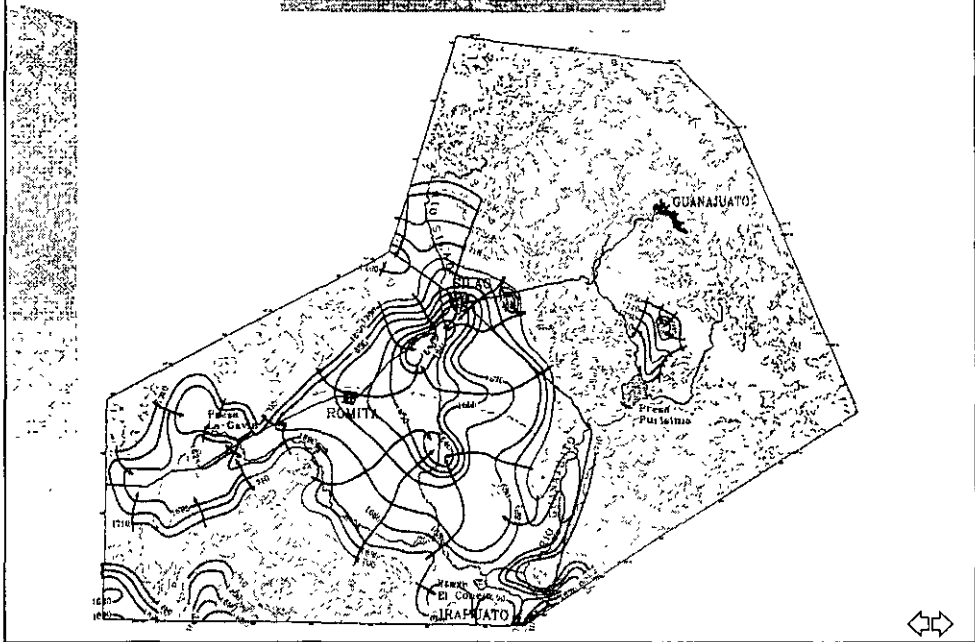








ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO

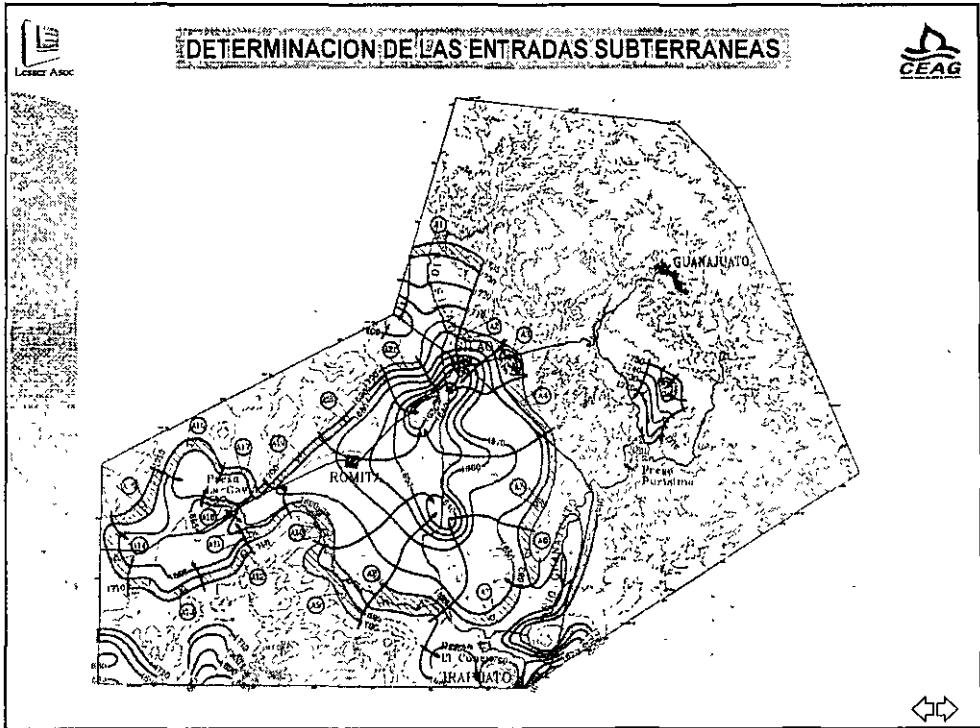


BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA

Entradas subterranas
Infiltración vertical
Extracción por bombeo
Cambio de almacenamiento

$$Es + Iv = Ex + A$$





La extracción total de agua subterránea en el valle de Silao-Romita es de 409 millones de m³/año

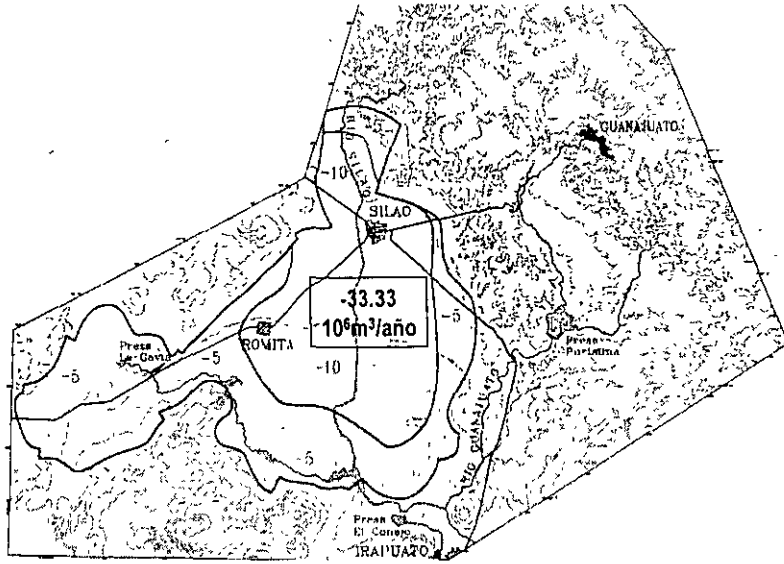
Extracción del acuífero profundo en el área de balance: 305.4 millones de m³/año

DETERMINACION DE LAS ENTRADAS SUBTERRANEAS

Photograph showing a man in a hat standing next to a wellhead or pump structure, likely related to the underground water extraction study. The man is wearing a plaid shirt and a wide-brimmed hat. The structure has a vertical pipe and some electrical equipment. The background shows a field and trees. A north arrow is present in the bottom right corner.

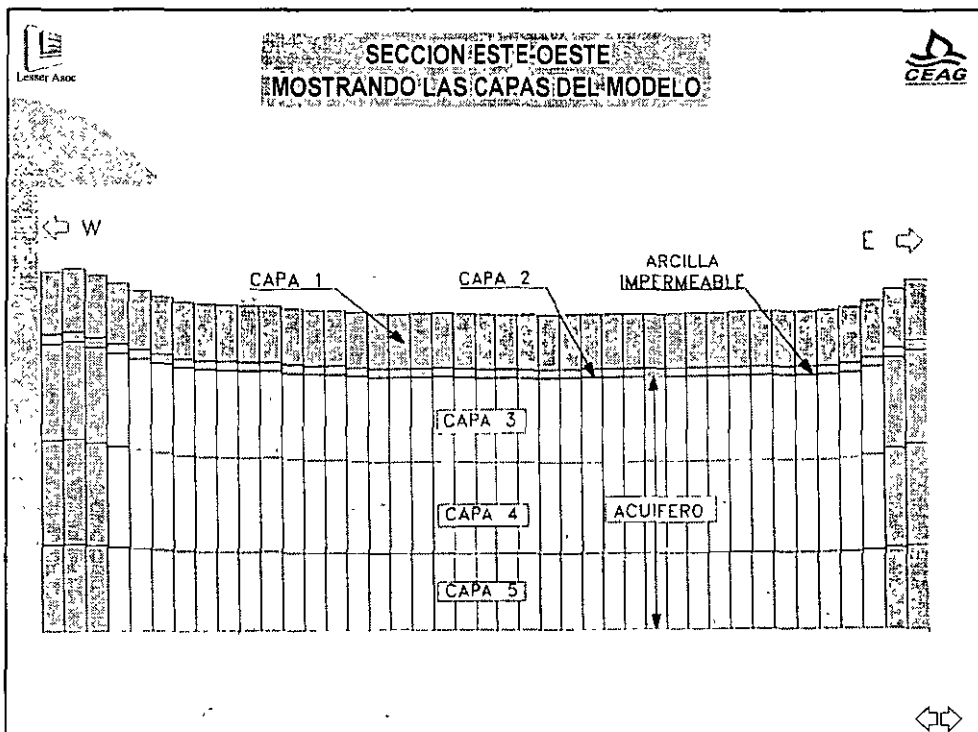
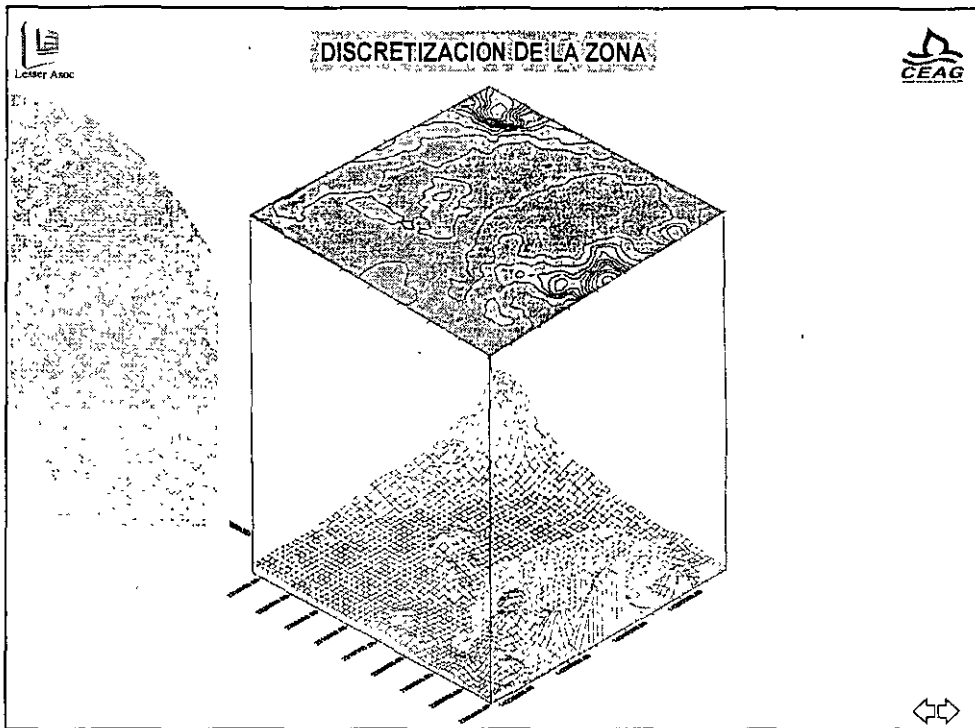


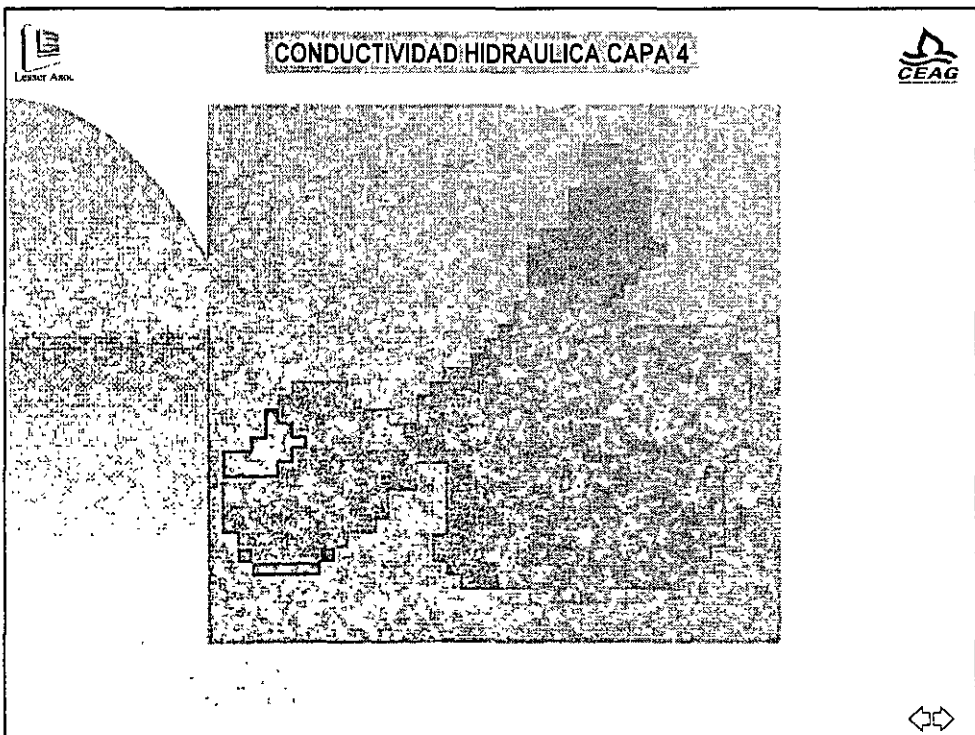
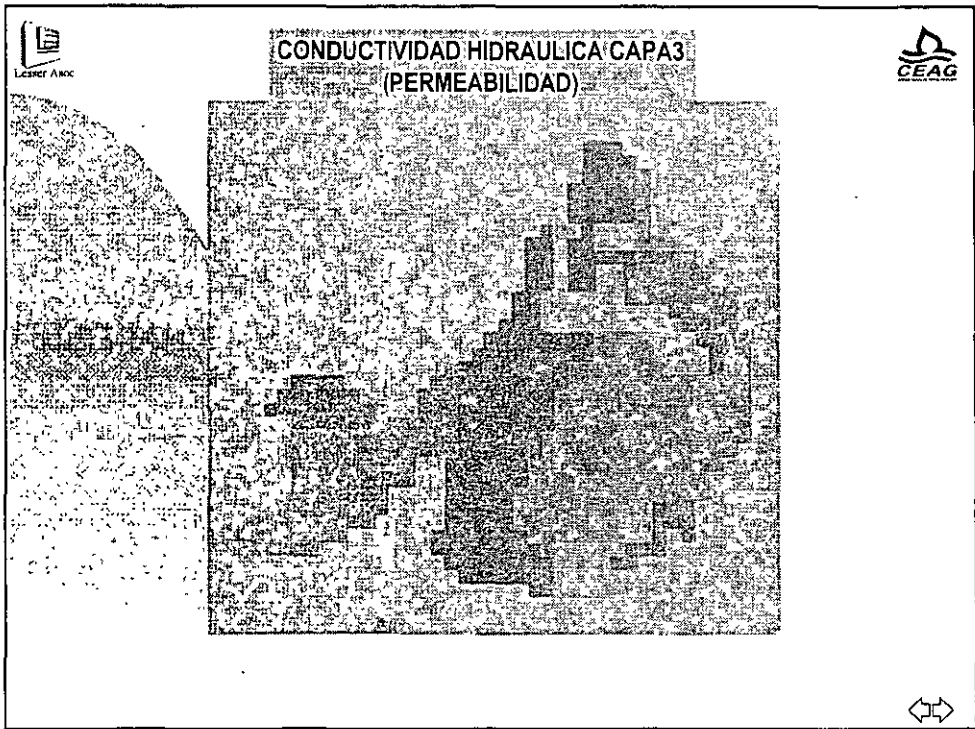
**CAMBIO DE ALMACENAMIENTO
EN 2 AÑOS**

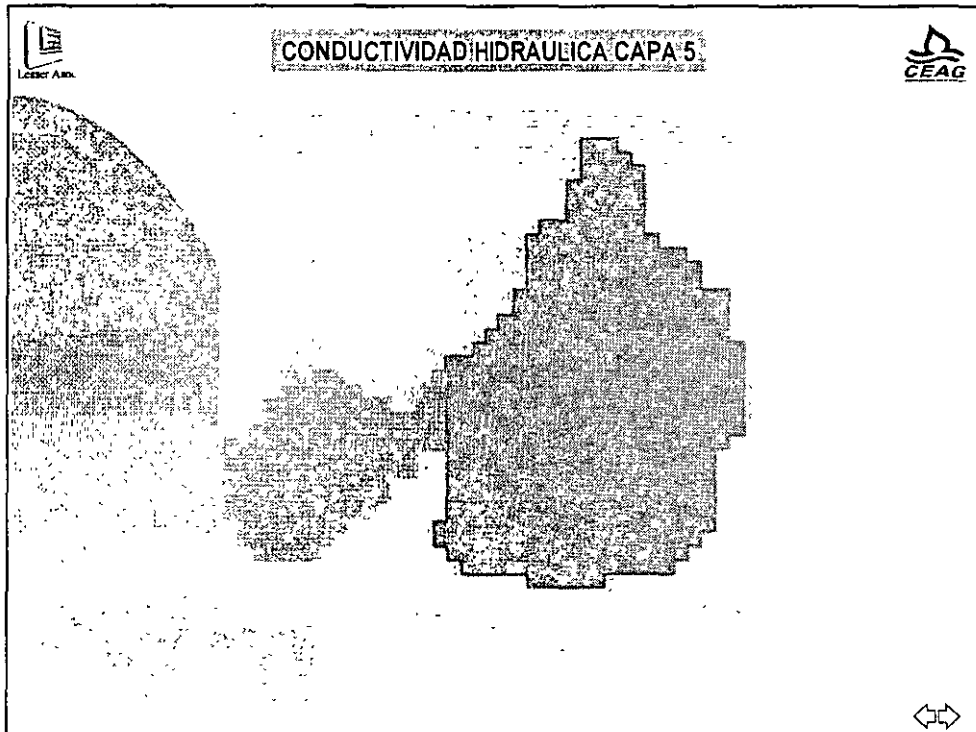
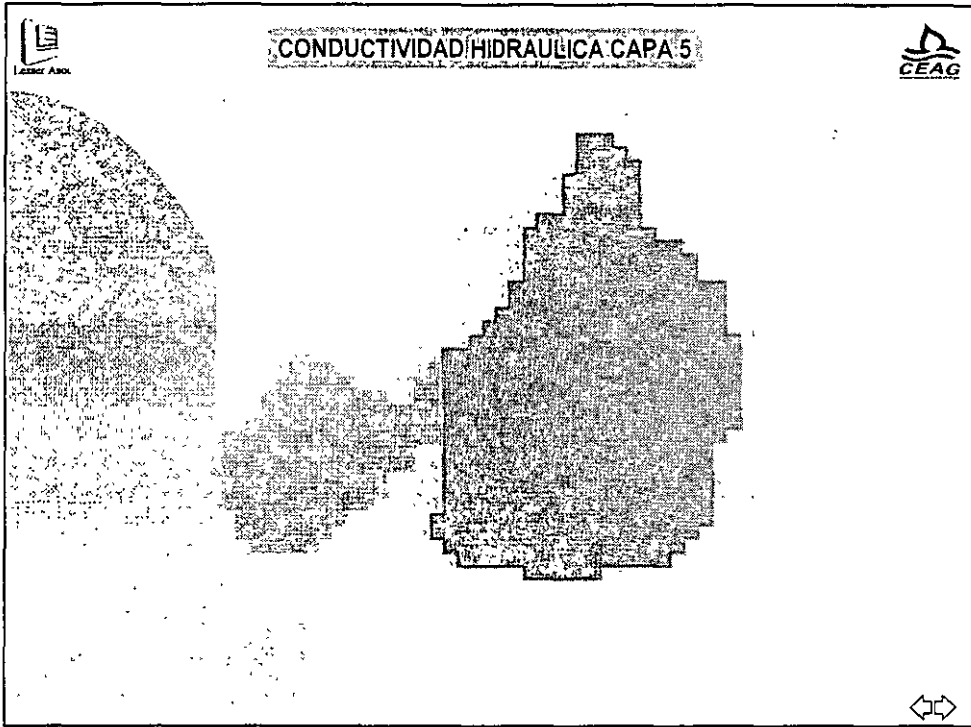


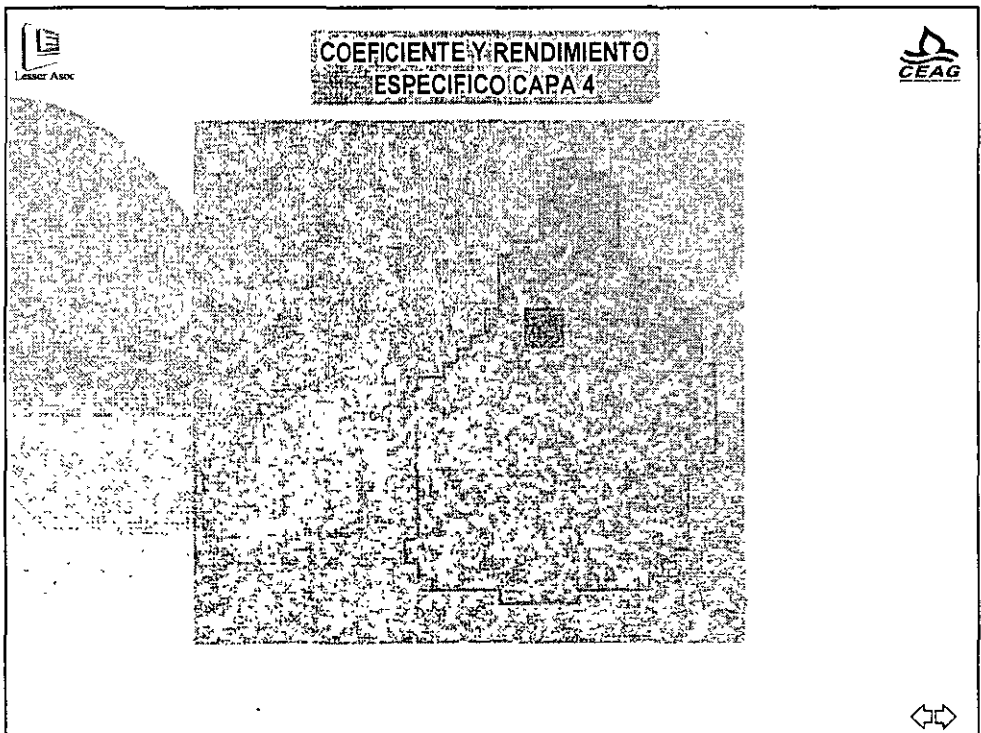
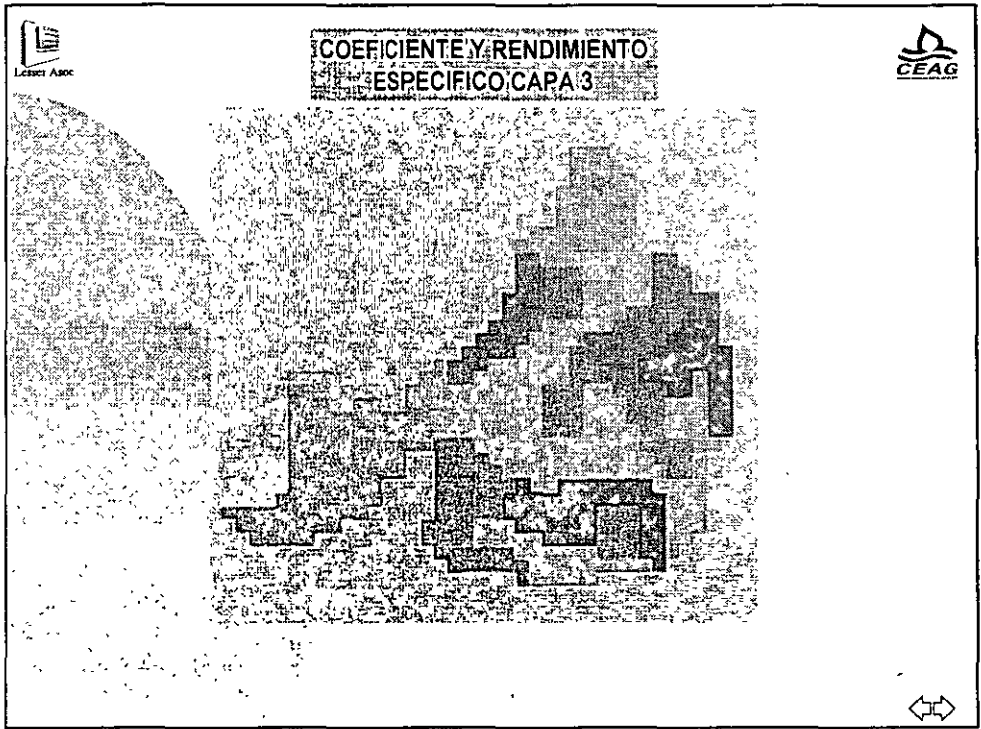
**CONOCIDAS LAS
CARACTERISTICAS DEL
ACUIFERO SE PROCEDE A LA
FORMACION DEL MODELO
MATEMATICO**

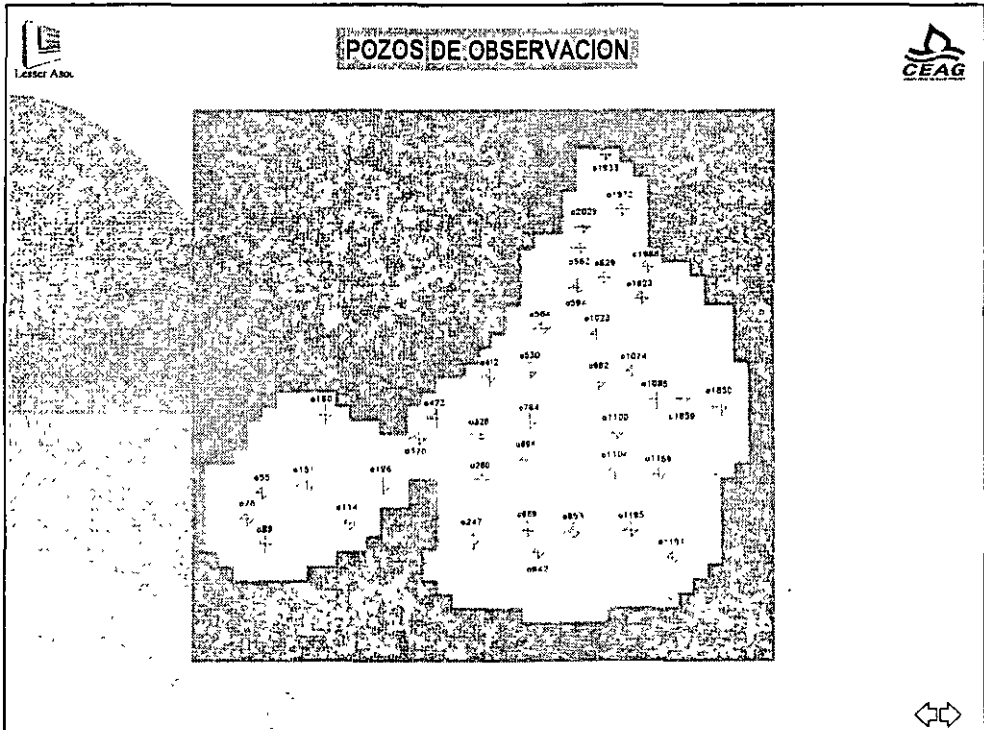
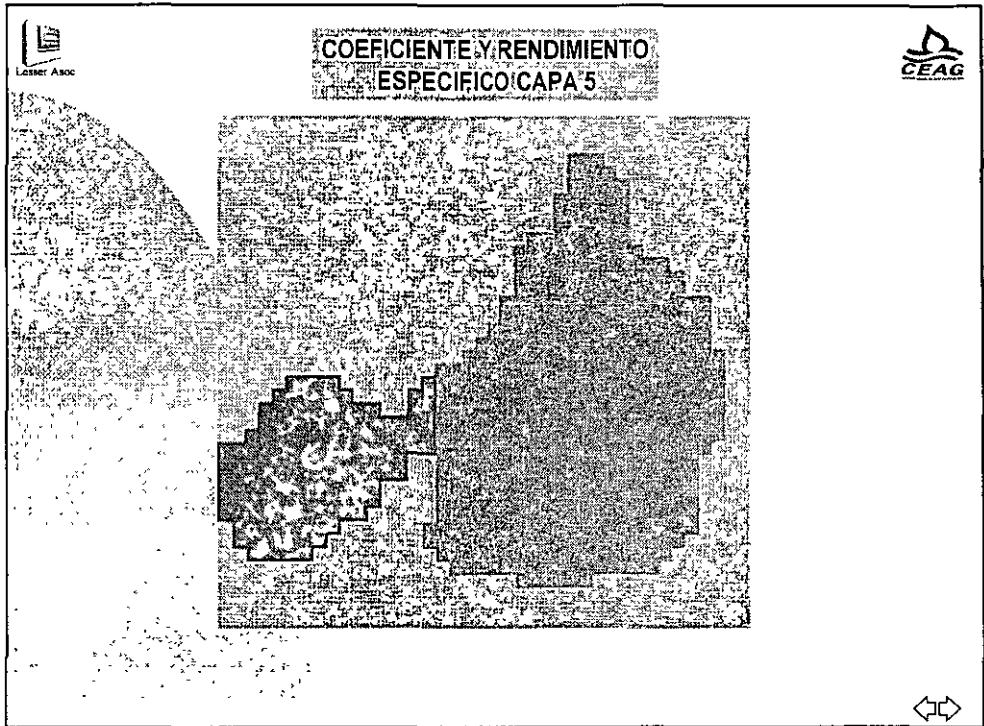


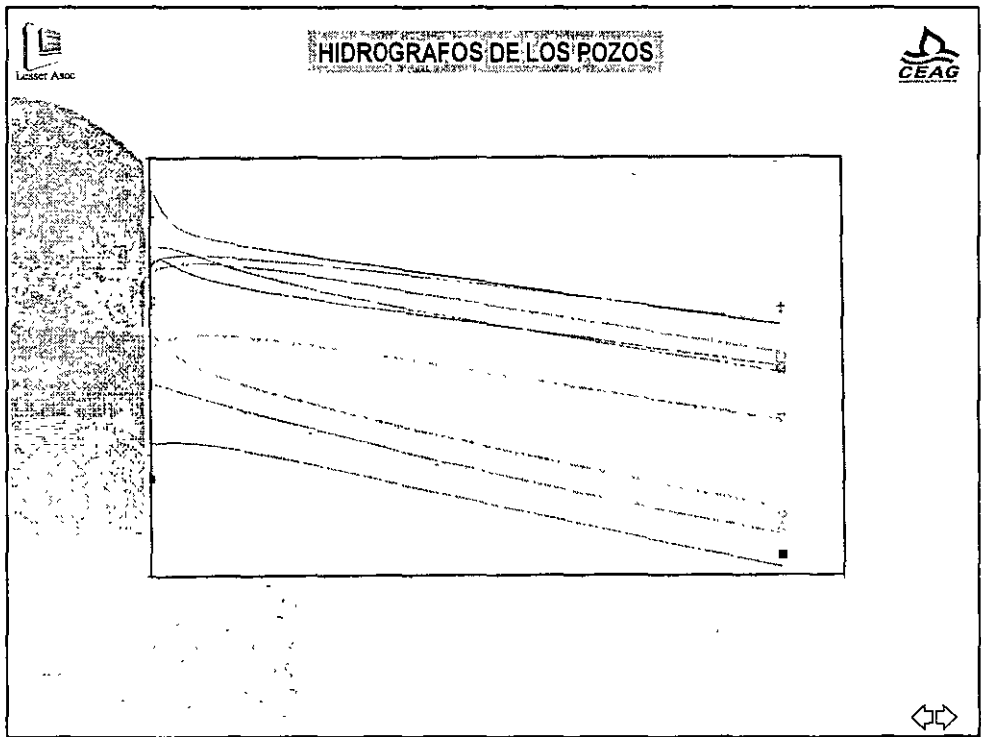
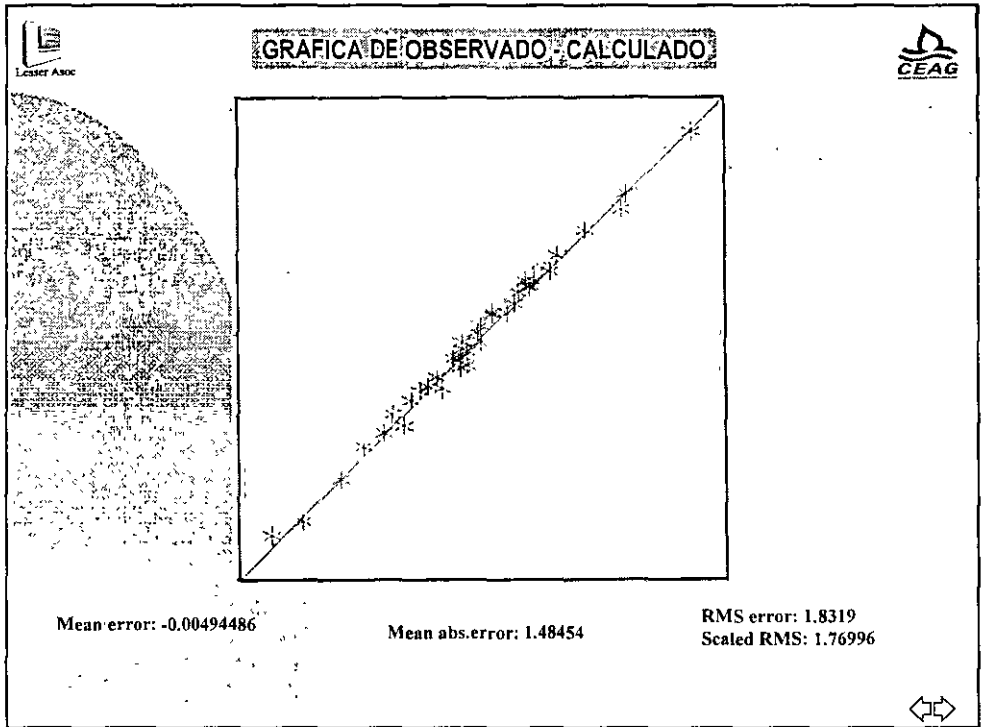






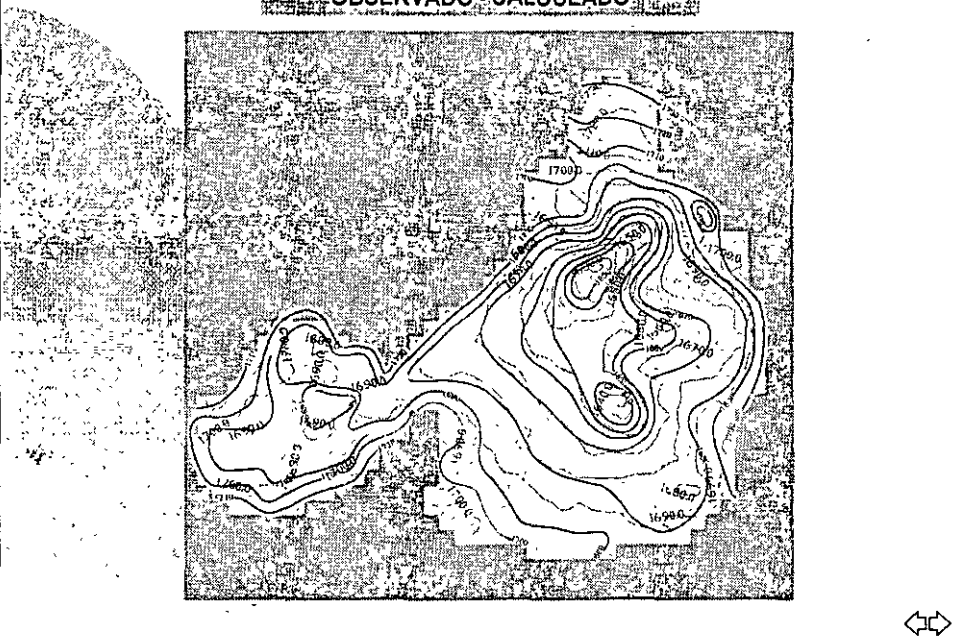








COMPARACION DE VALORES FINALES
OBSERVADO - CALCULADO





FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS

MODULO III MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

CA 166

Del 18 al 22 de octubre del 2004

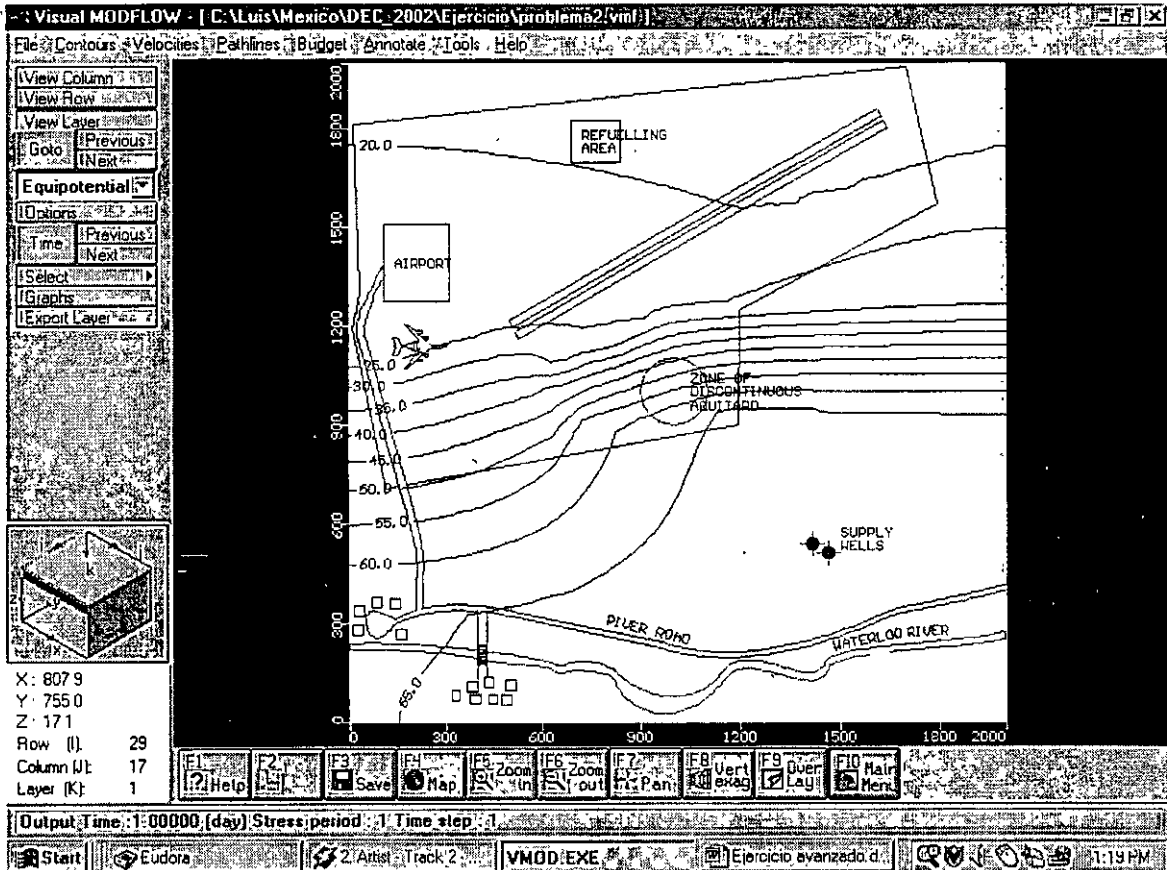
Tema Anexo EJERCICIO AVANZADO DE VISAUL MODFLOW - CALIBRACIÓN

EXPOSITOR: MC LUIS ERNETO LESSER CARRILLO
MC RAYMUNDO ESTRELLA CHAVERO
PALACIO DE MINERÍA
OCTUBRE DE 2004

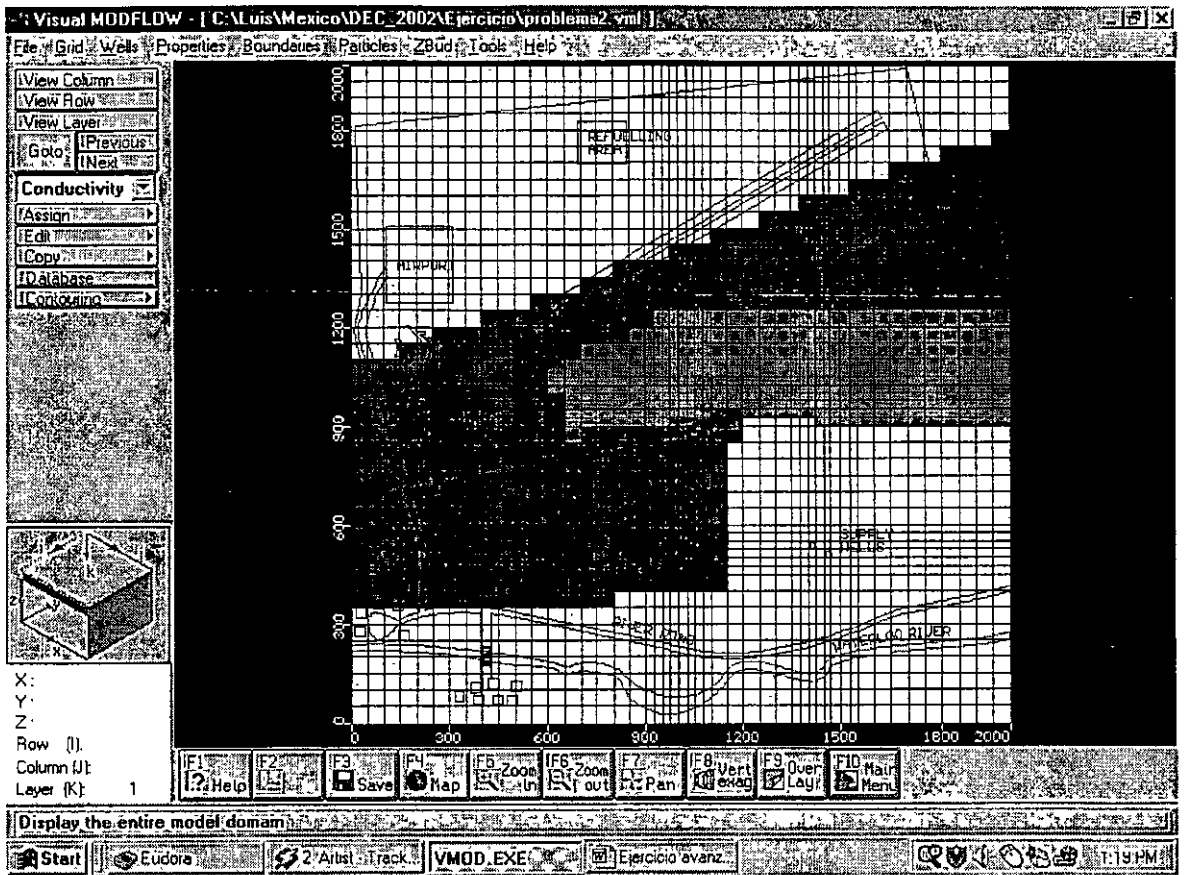
Ejercicio Avanzado de Visual Modflow- Calibración

Del ejercicio anterior elimine la frontera de río, así como el efecto de la perforación abandonada.

Ahora calibre el modelo para obtener la siguiente configuración piezométrica en la primera capa. (seguir utilizando el estado estacionario)



La siguiente es la solución, NO se la den a los estudiantes!!!!



Conductividad hidráulica en las capas 1 y 2:
Color rojo: 10^{-5} m/s
Color gris: 10^{-6} m/s

Ejercicio Avanzado de Visual Modflow- Partículas

Calcular cuanto tiempo tardaran las partículas en llegar a los pozos en los 2 casos.

Solución:

Para empezar hay que correr el modelo en estado transitorio. Los datos que les dimos permiten correrlo únicamente a 10 años. El resultado que da a 10 años es que las partículas apenas se mueven. Hay que cambiar todas las fronteras y pozos para que corran mas años. No llegué al resultado final pero no hay mucho chiste en hacerlo, solo toma tiempo (suficiente para quemarse el tiempo que queda).



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS**

**CA 166 MÓDULO III MODELOS
MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**



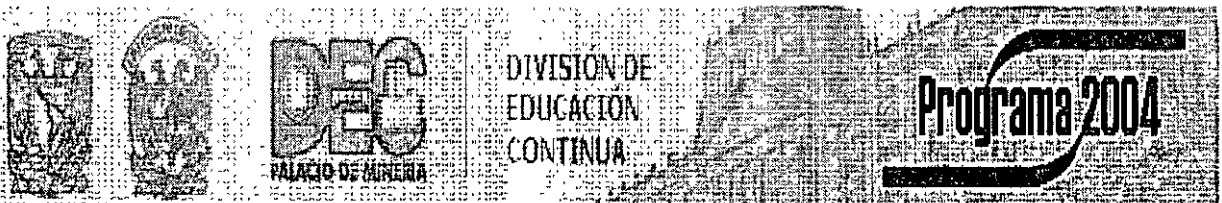
TEMA:

**SECCIÓN MOSTRANDO LOS ESPESORES DE
LAS CAPAS**

COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

DEL 18 AL 22 DE OCTUBRE DE 2004

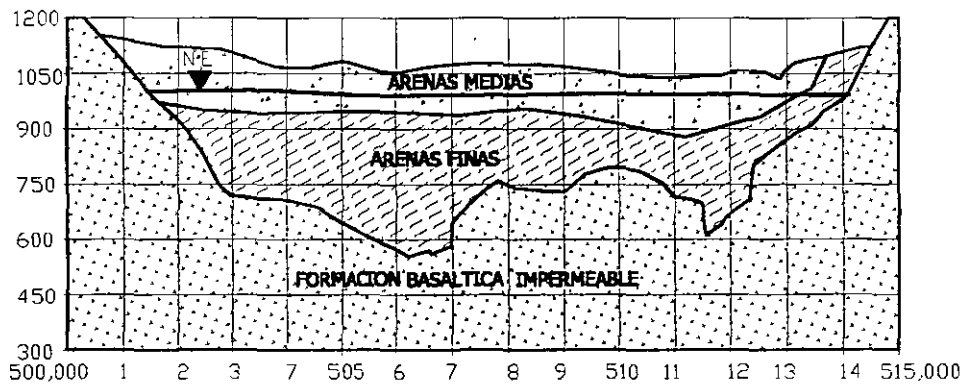
PALACIO DE MINERÍA



SECCIÓN MOSTRANDO LOS ESPESORES DE LAS CAPAS

A

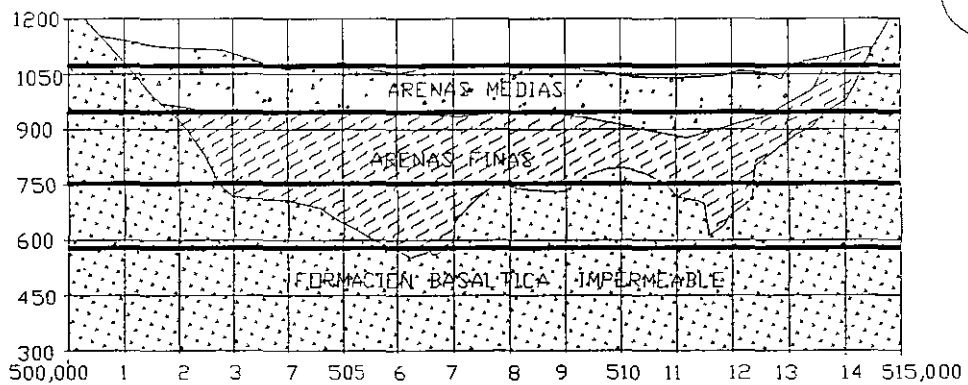
A'



SECCIÓN MOSTRANDO EL NIVEL ESTÁTICO

A

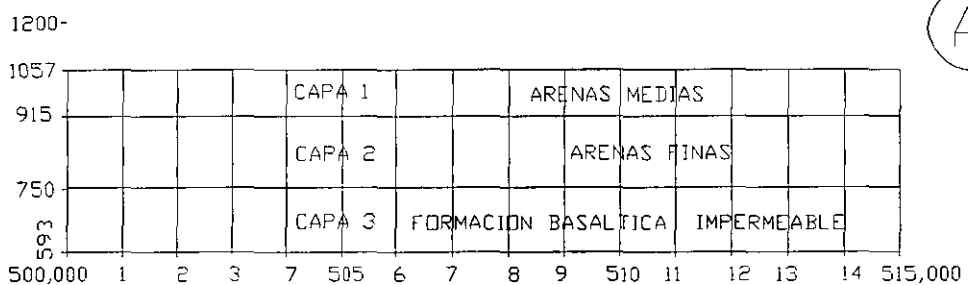
A'



SECCIÓN MOSTRANDO LAS CAPAS DEL ACUÍFERO

A

A'



CAPAS EN LAS QUE SE HA DISCRETIZADO EL DOMINIO

Figura 1. SECCIÓN VERTICAL MOSTRANDO LA GEOLOGÍA.

CONFIGURACIÓN MOSTRANDO LA TOPOGRAFIA DEL SITIO

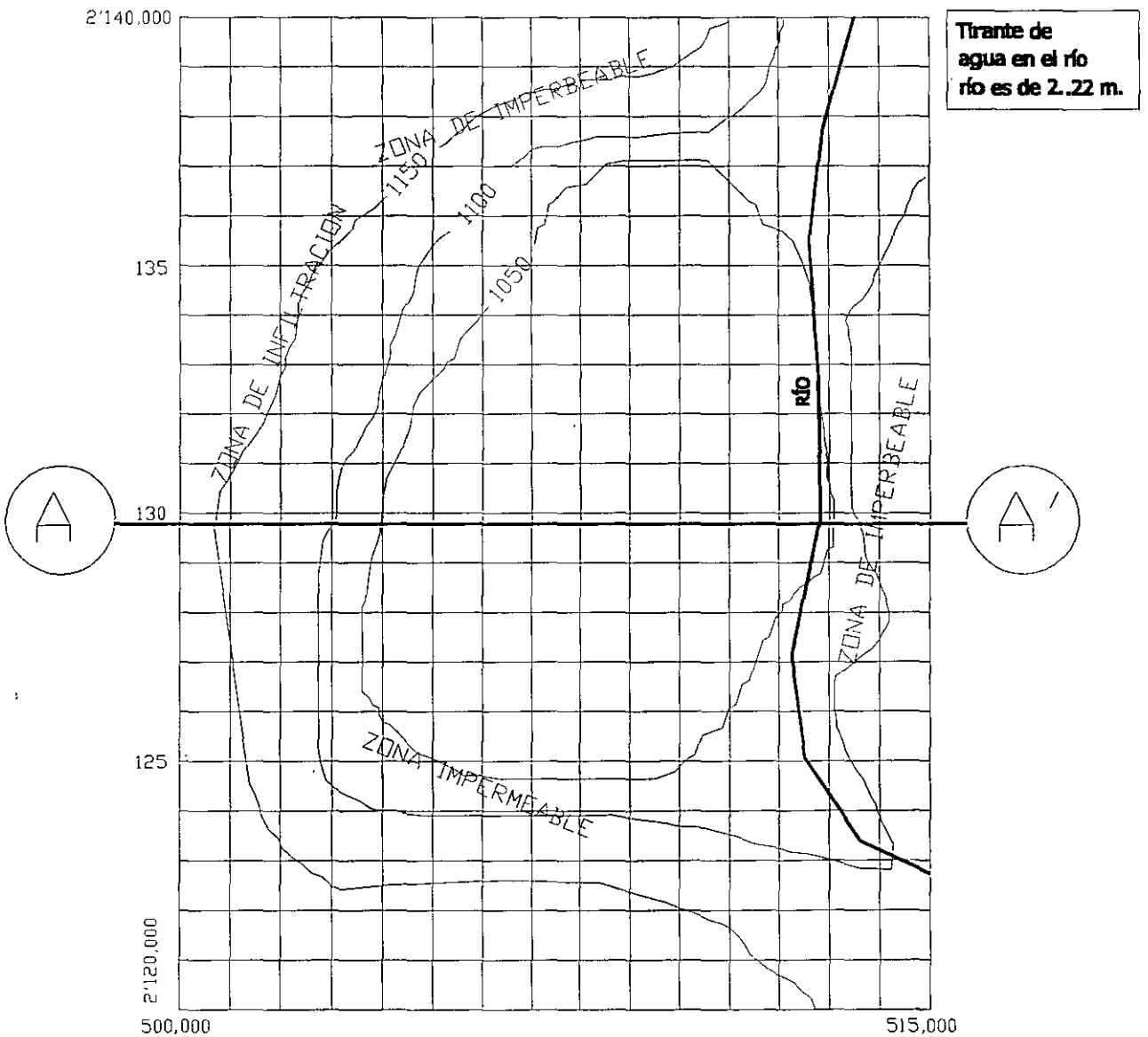
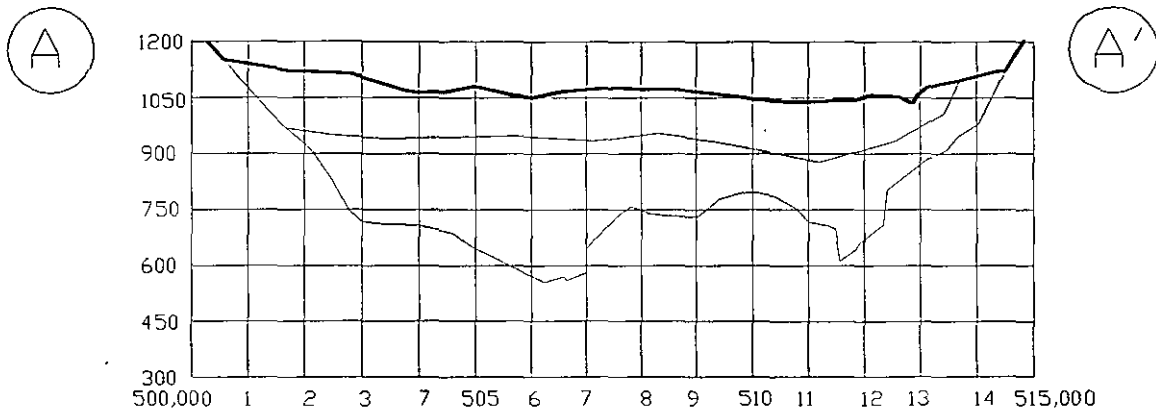


FIGURA 2. MAPA TOPOGRÁFICO MOSTRANDO LA SUPERFICIE Y EL RECORRIDO DEL RÍO.

CONFIGURACION MOSTRANDO LA BASE DE LA CAPA 2

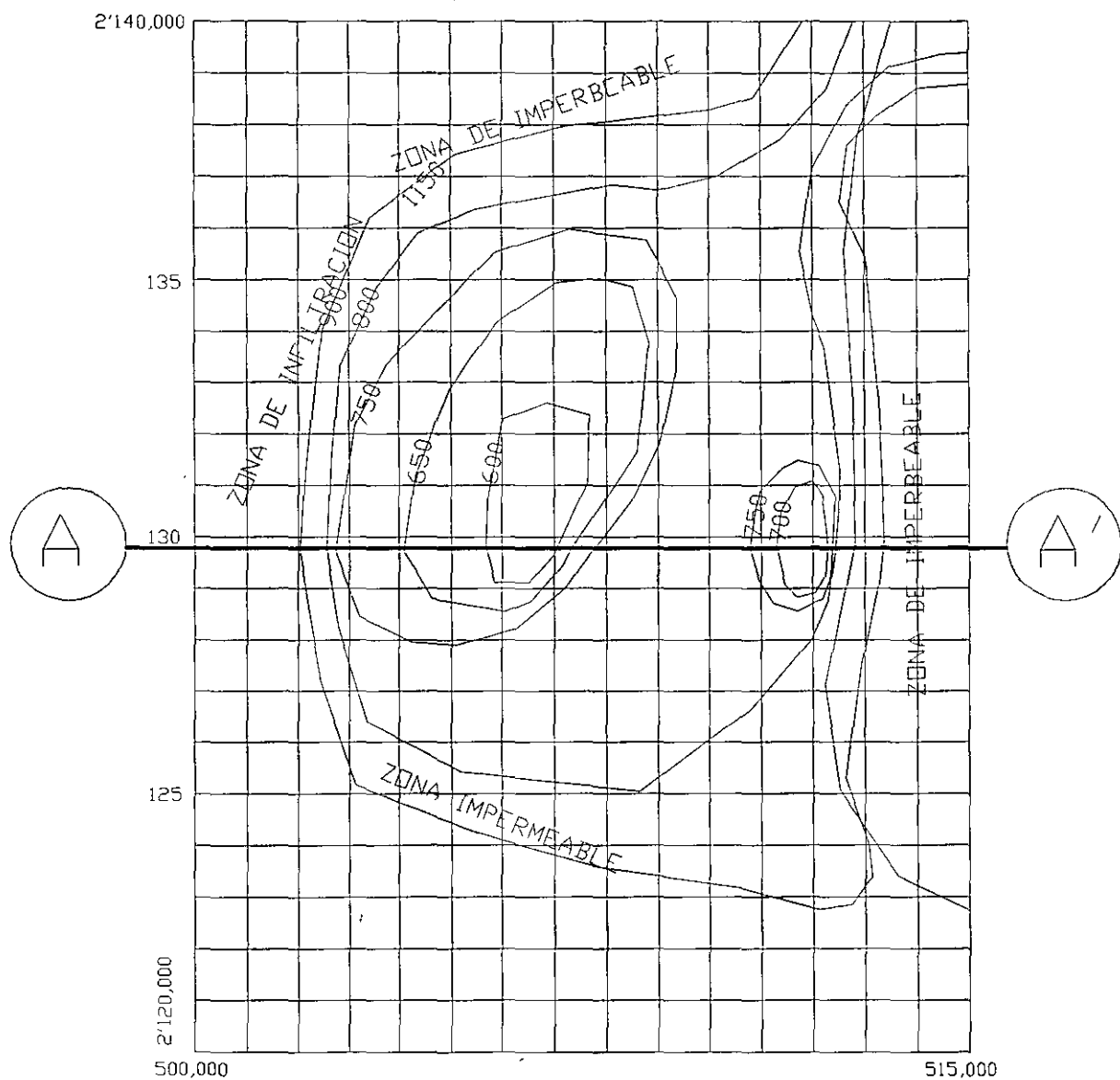
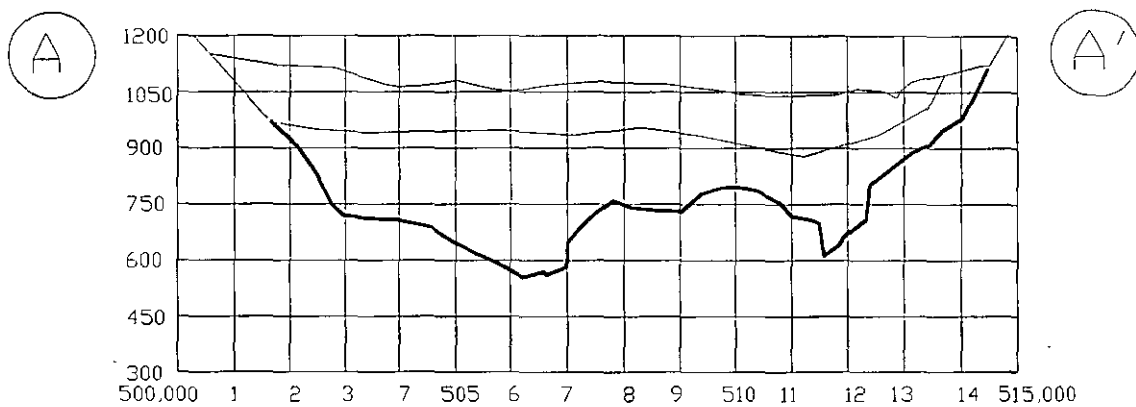


FIGURA 3. MAPA MOSTRANDO LA BASE DEL ACUÍFERO

CONFIGURACION MOSTRANDO LA BASE DE LA CAPA 1.

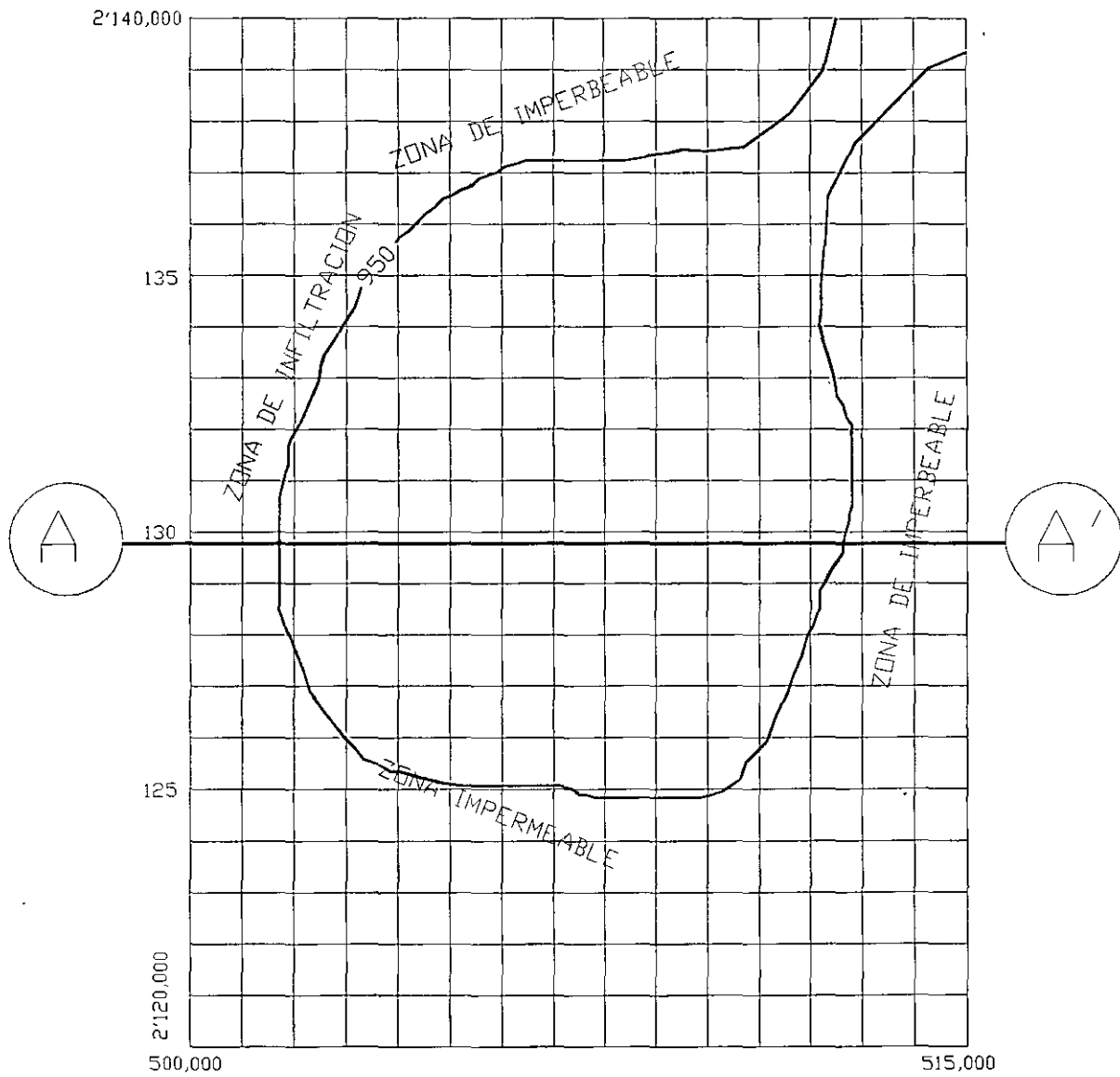
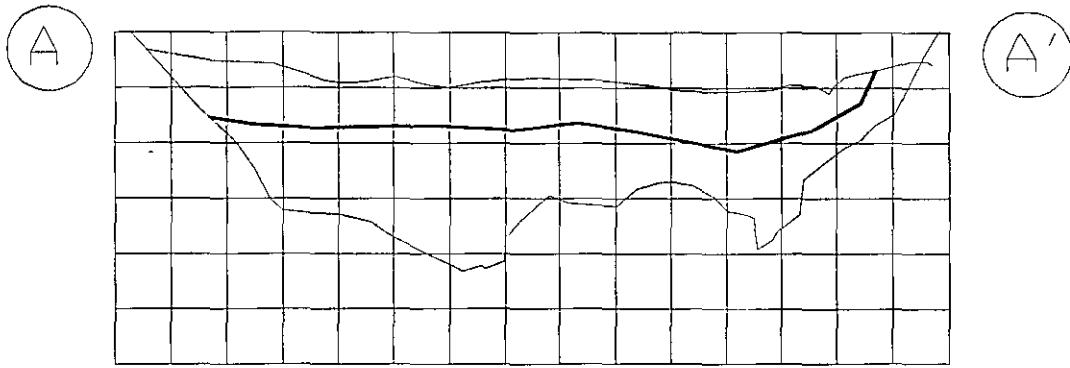


FIGURA 4. SECCIÓN MOSTRANDO EL ESPESOR DEL ACUÍFERO E ISOPACAS.

CONFIGURACION DEL NIVEL ESTATICO, CARGAS INICIALES

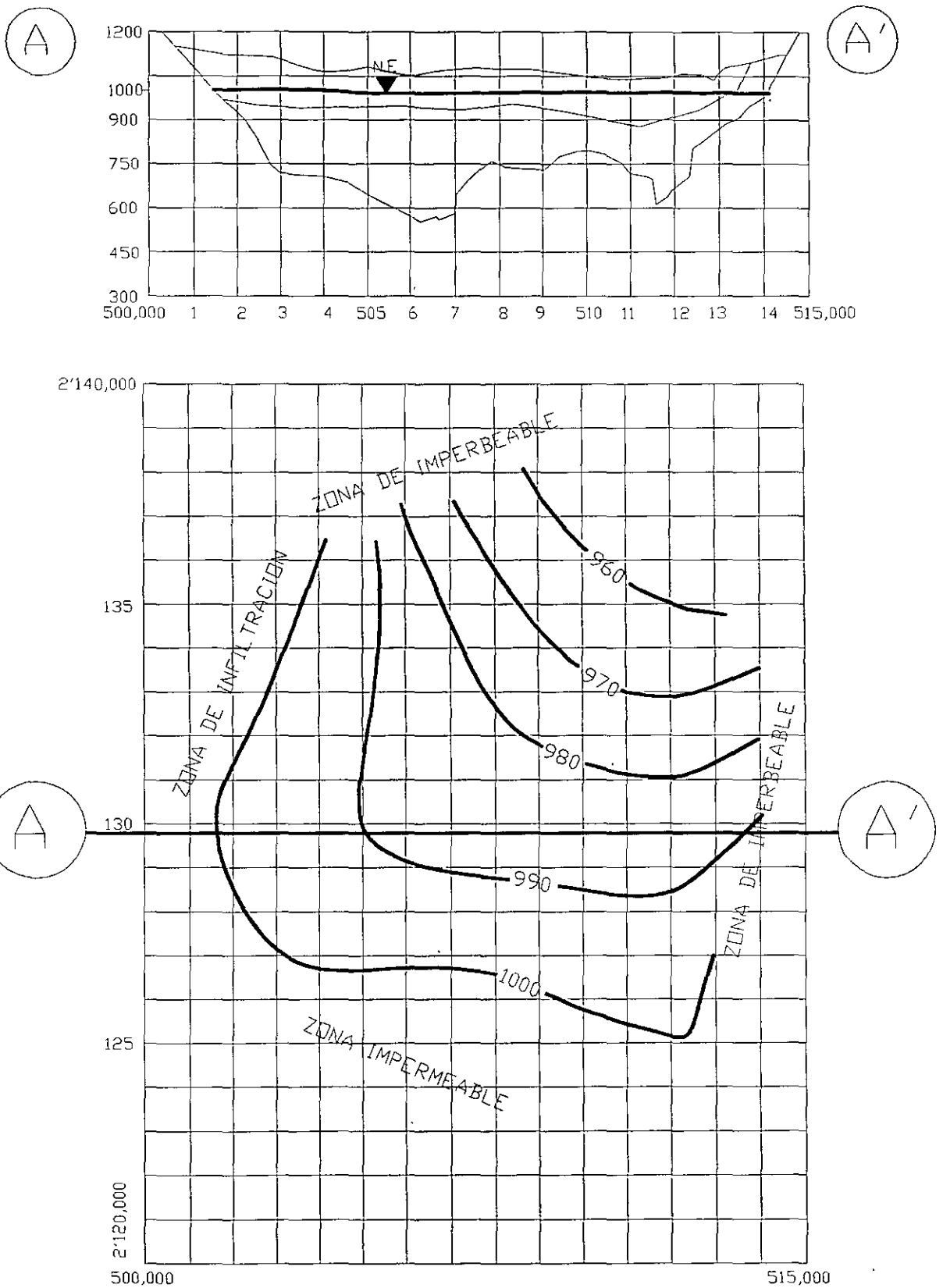


FIGURA 5. MAPA DE LA SUPERFICIE FREÁTICA.

CELDAS CON FLUJO LATERAL

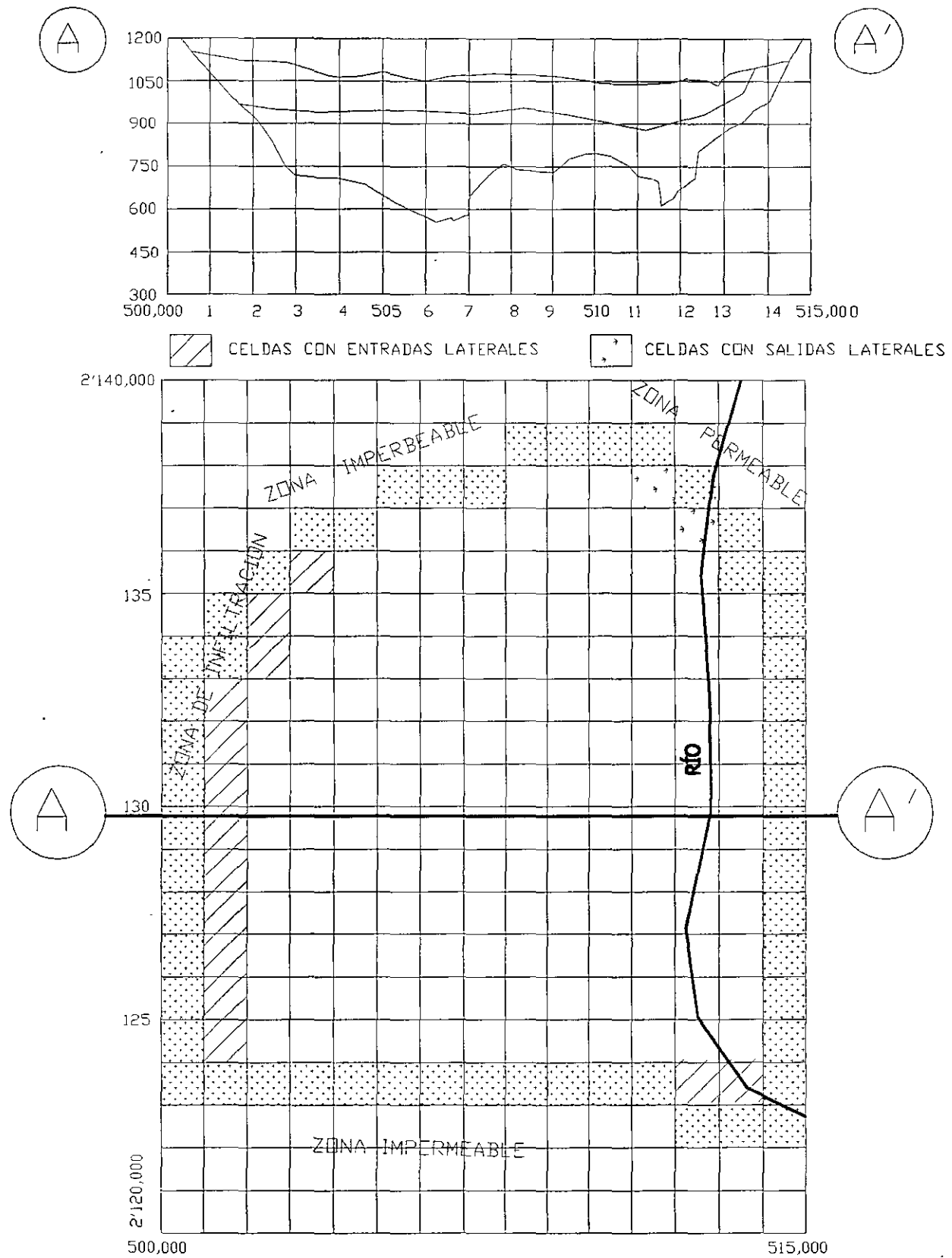
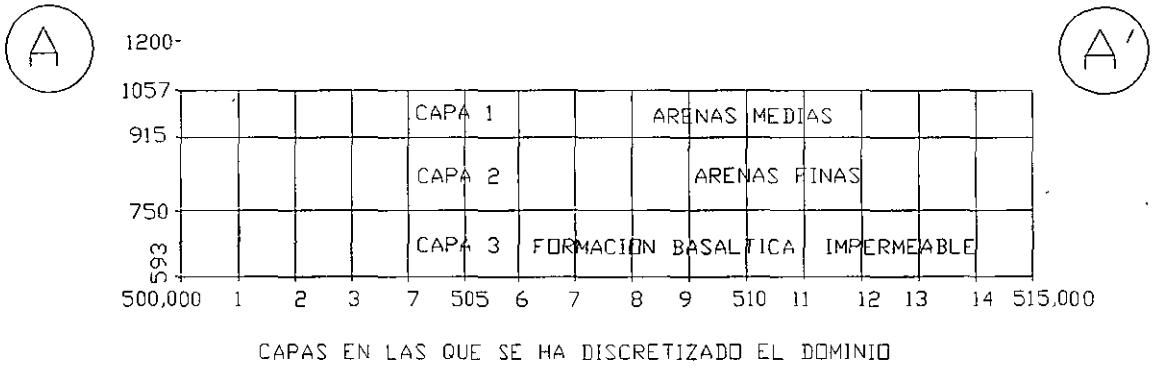


FIGURA 6. CELDAS QUE PRESENTAN ENTRADA O SALIDA DE AGUA AL ACUÍFERO.

LOCALIZACION DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO



CAPAS EN LAS QUE SE HA DISCRETIZADO EL DOMINIO

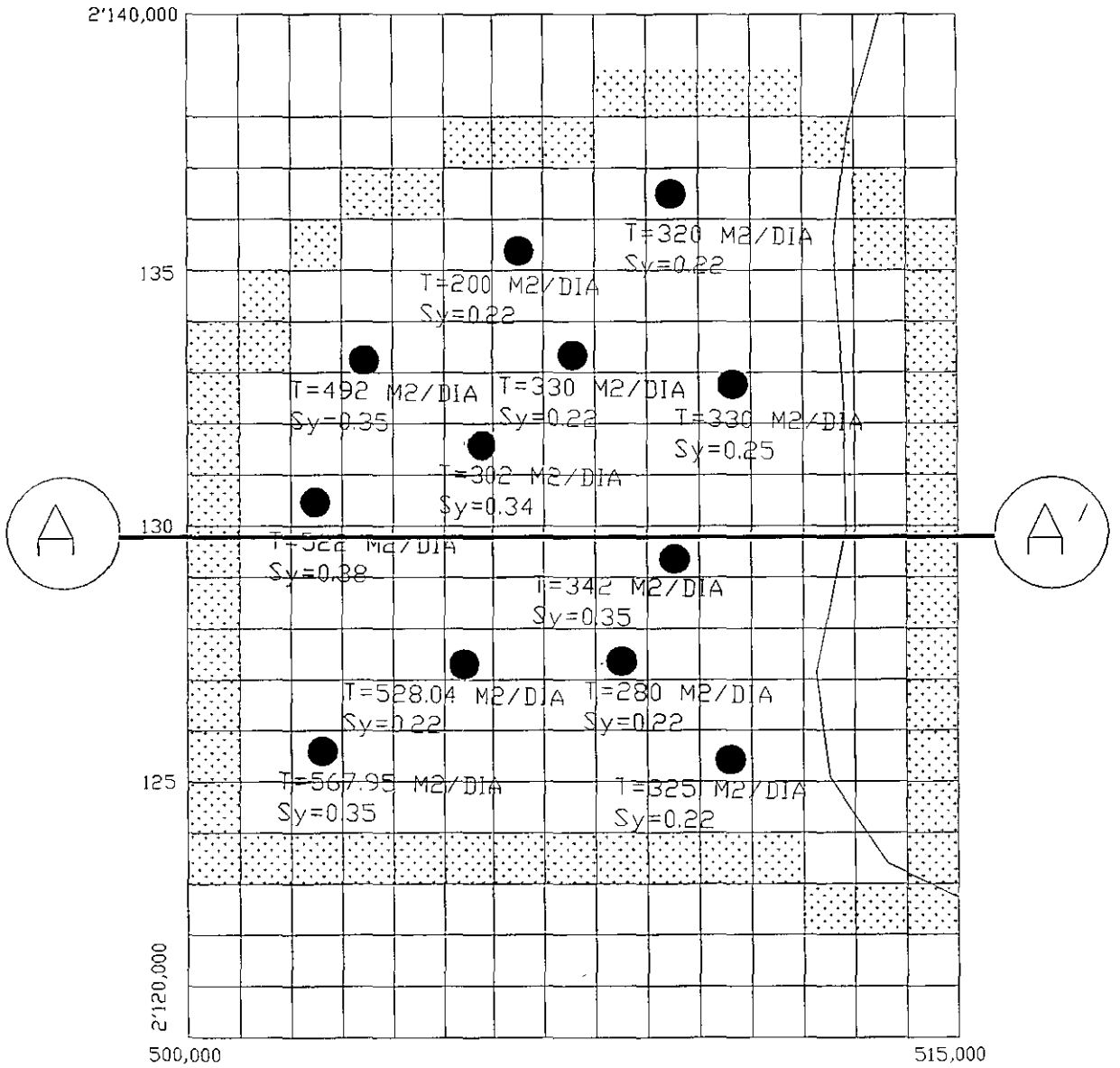


FIGURA 7. VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y RENDIMIENTO ESPECÍFICO.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CAPA 1

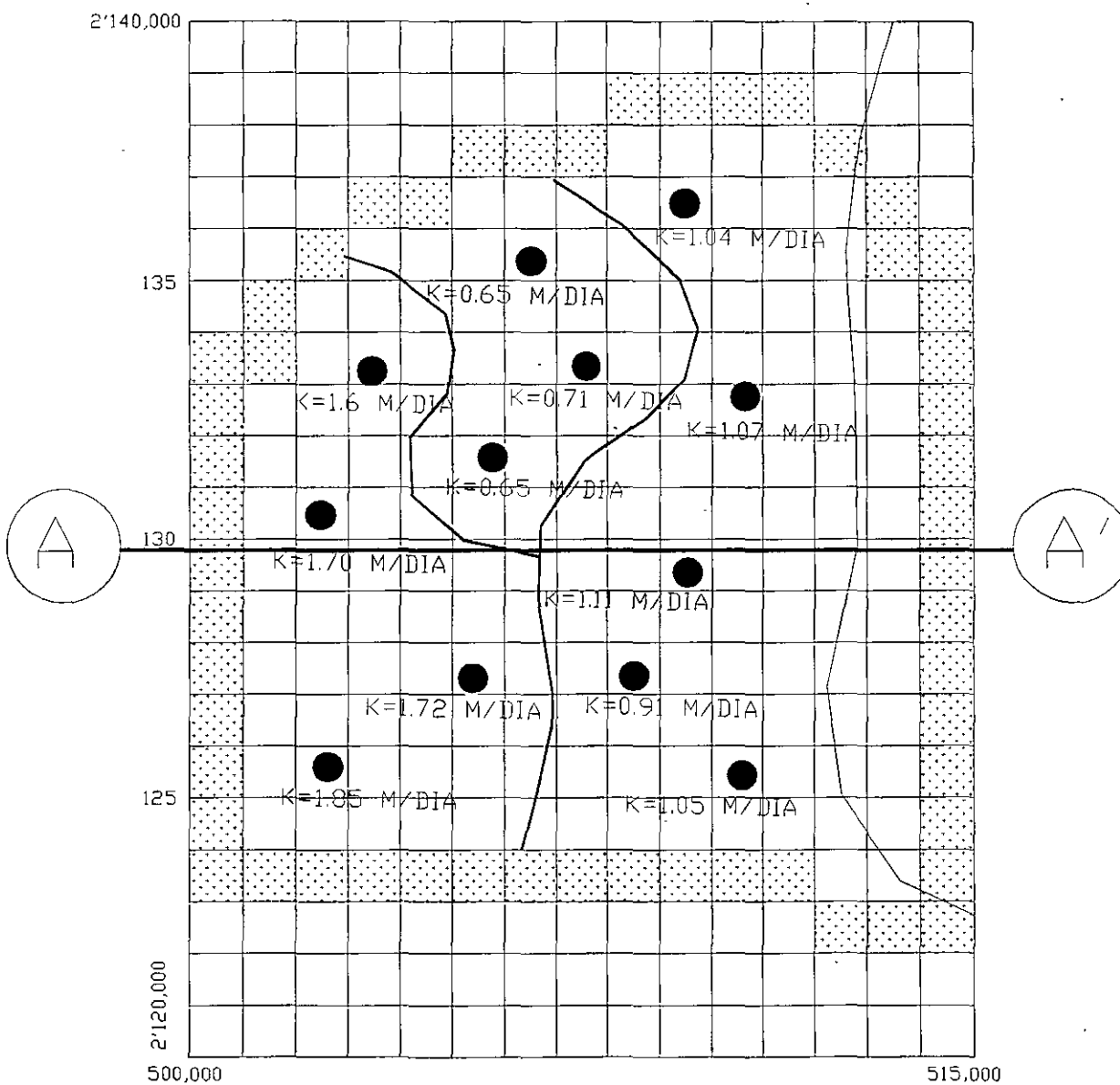
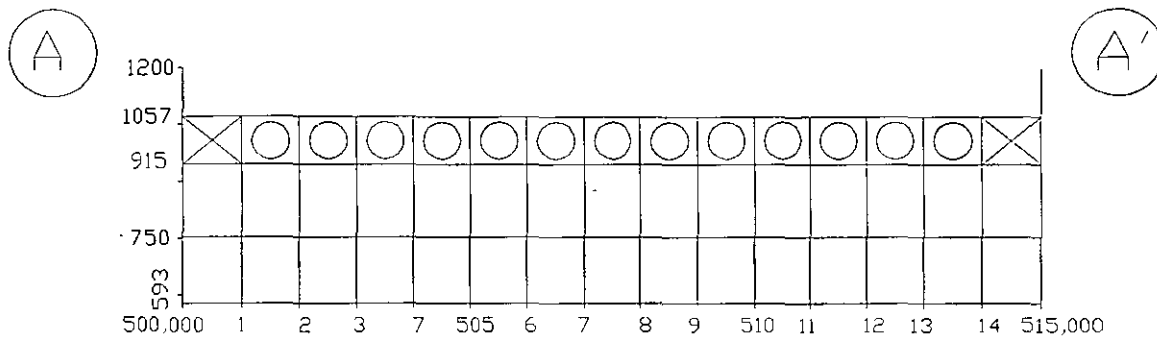


FIGURA 7a. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CAPA 1

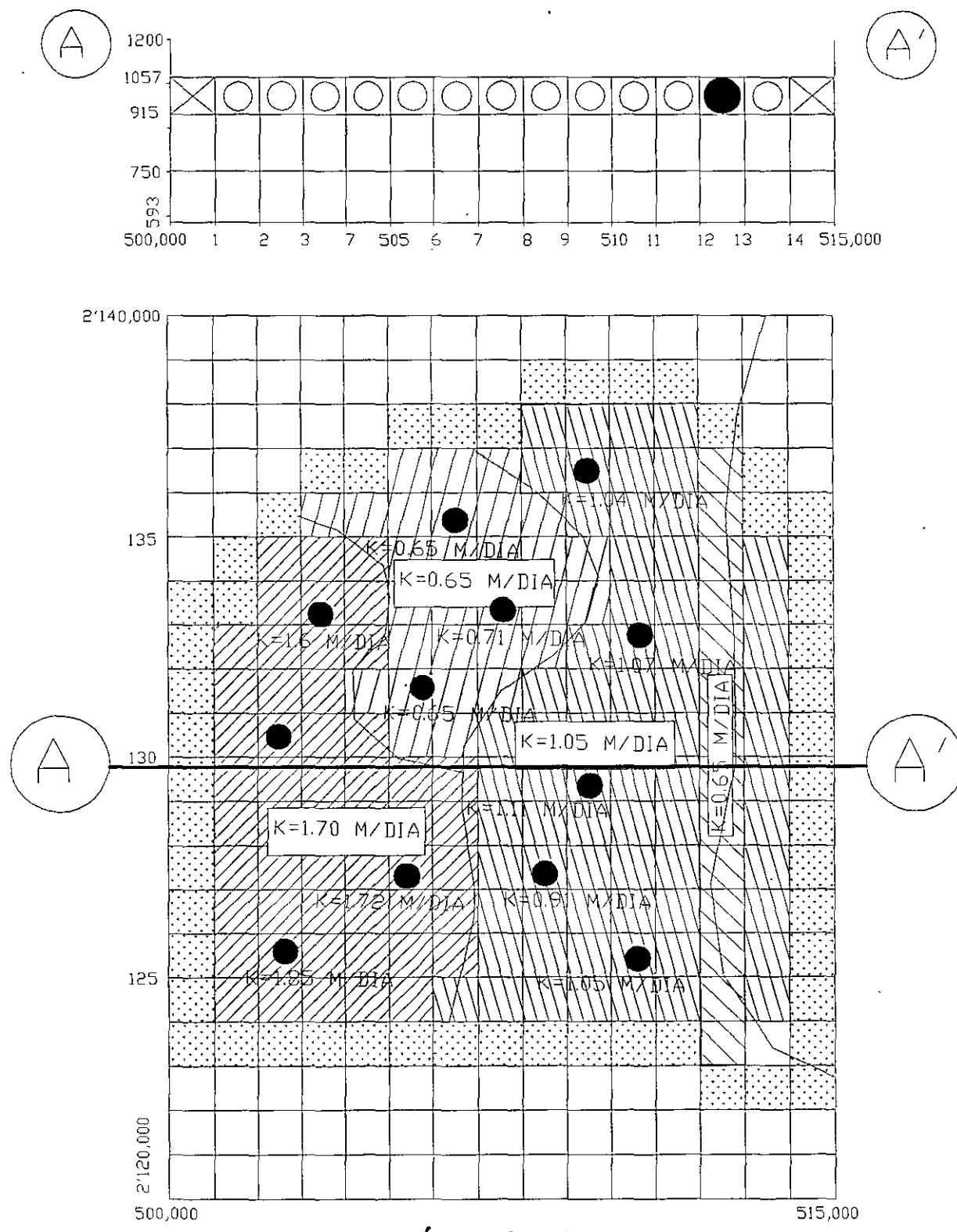


FIGURA 7b. ZONIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CAPA 2

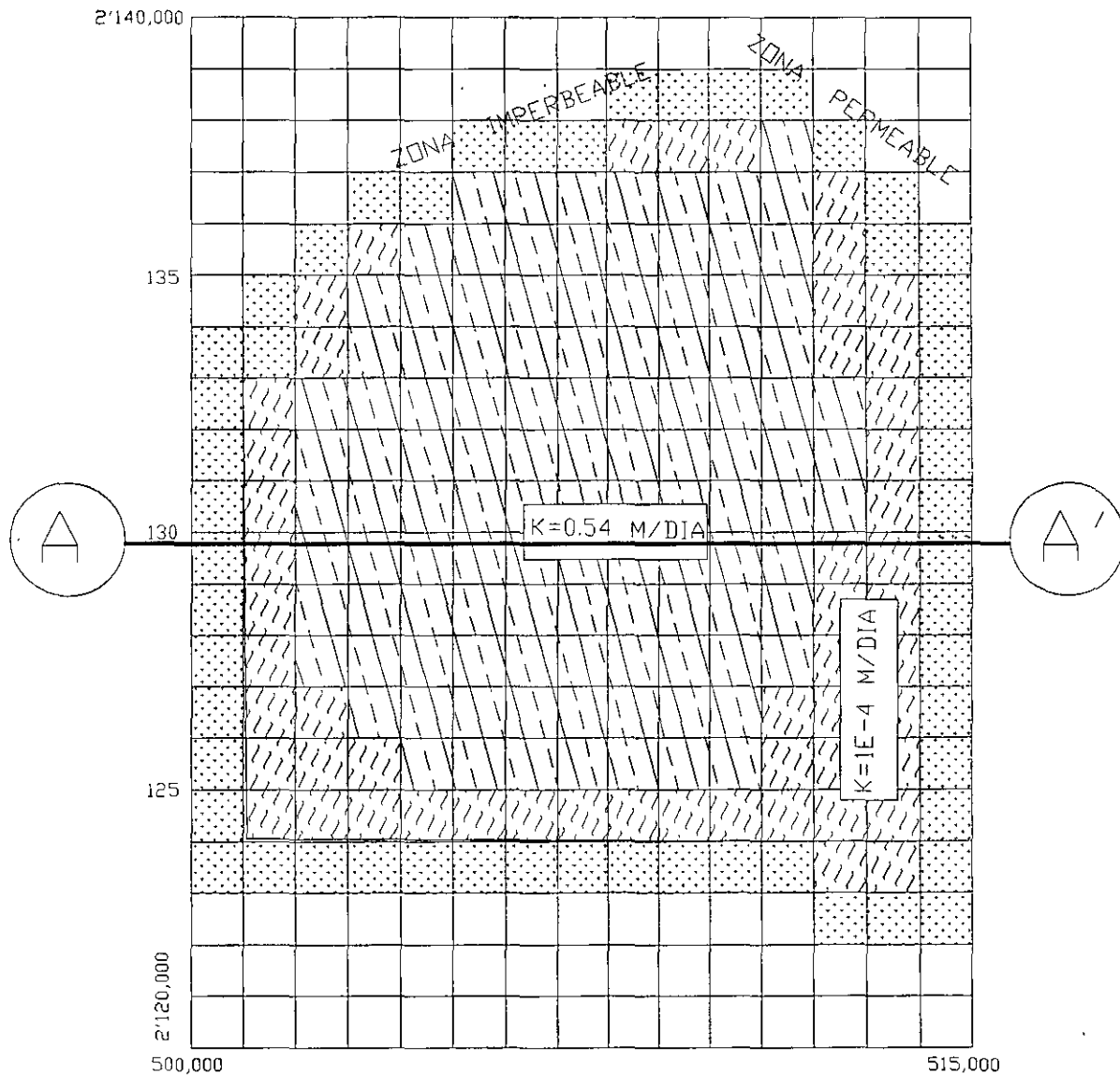
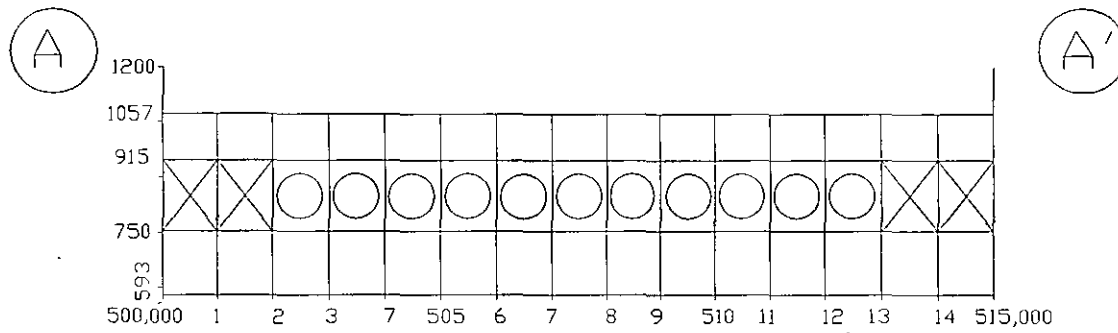


FIGURA 7c. DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CAPA 3

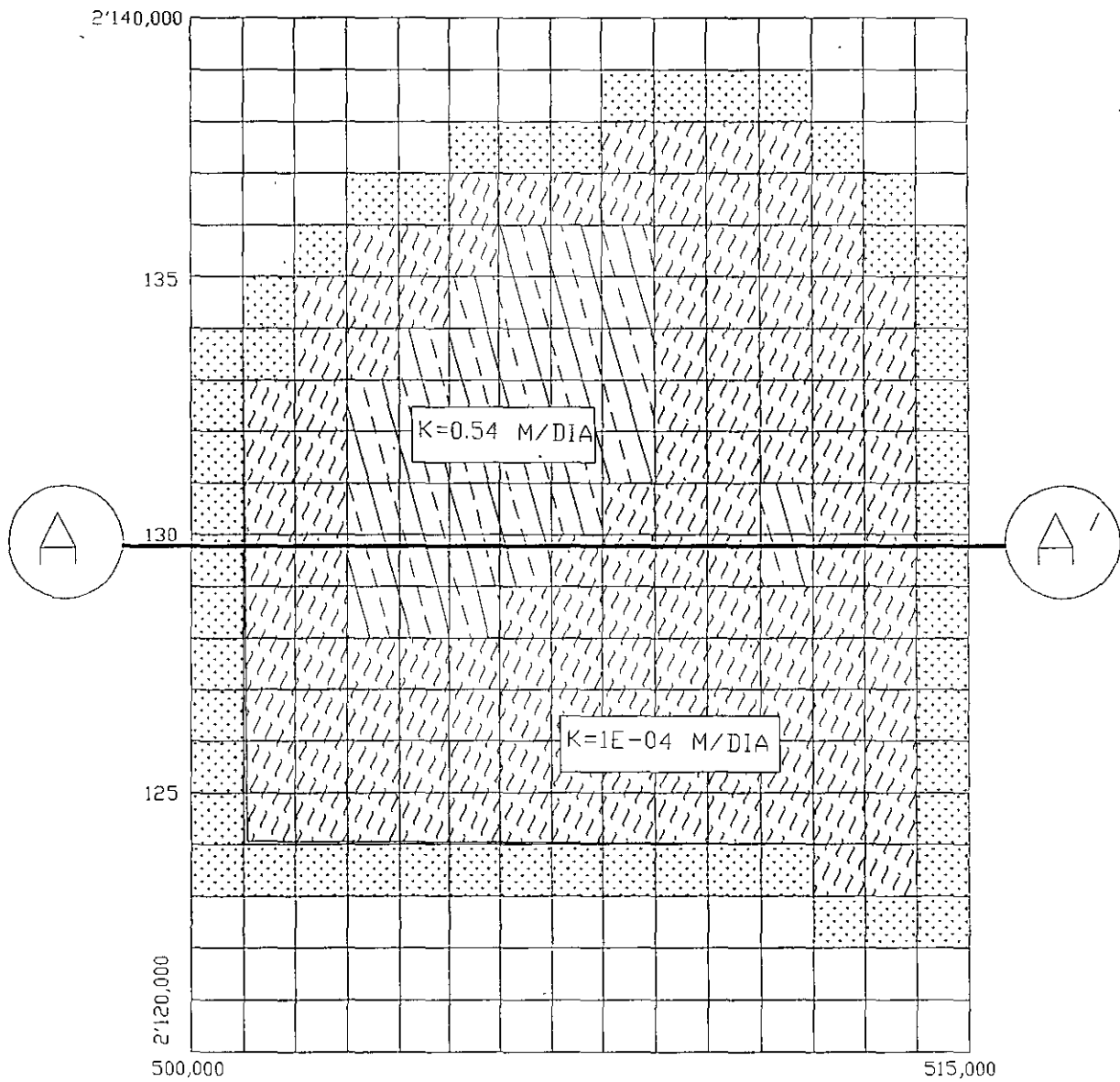
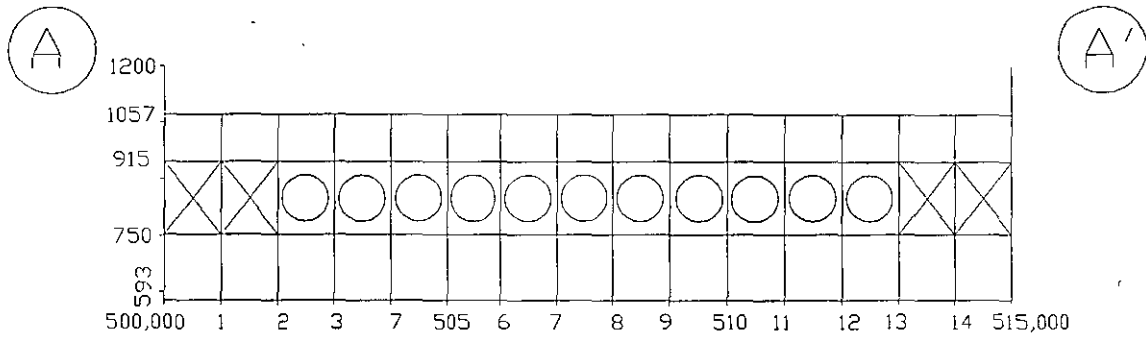


FIGURA 7d. DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECIFICO S_y EN LA CAPA 1

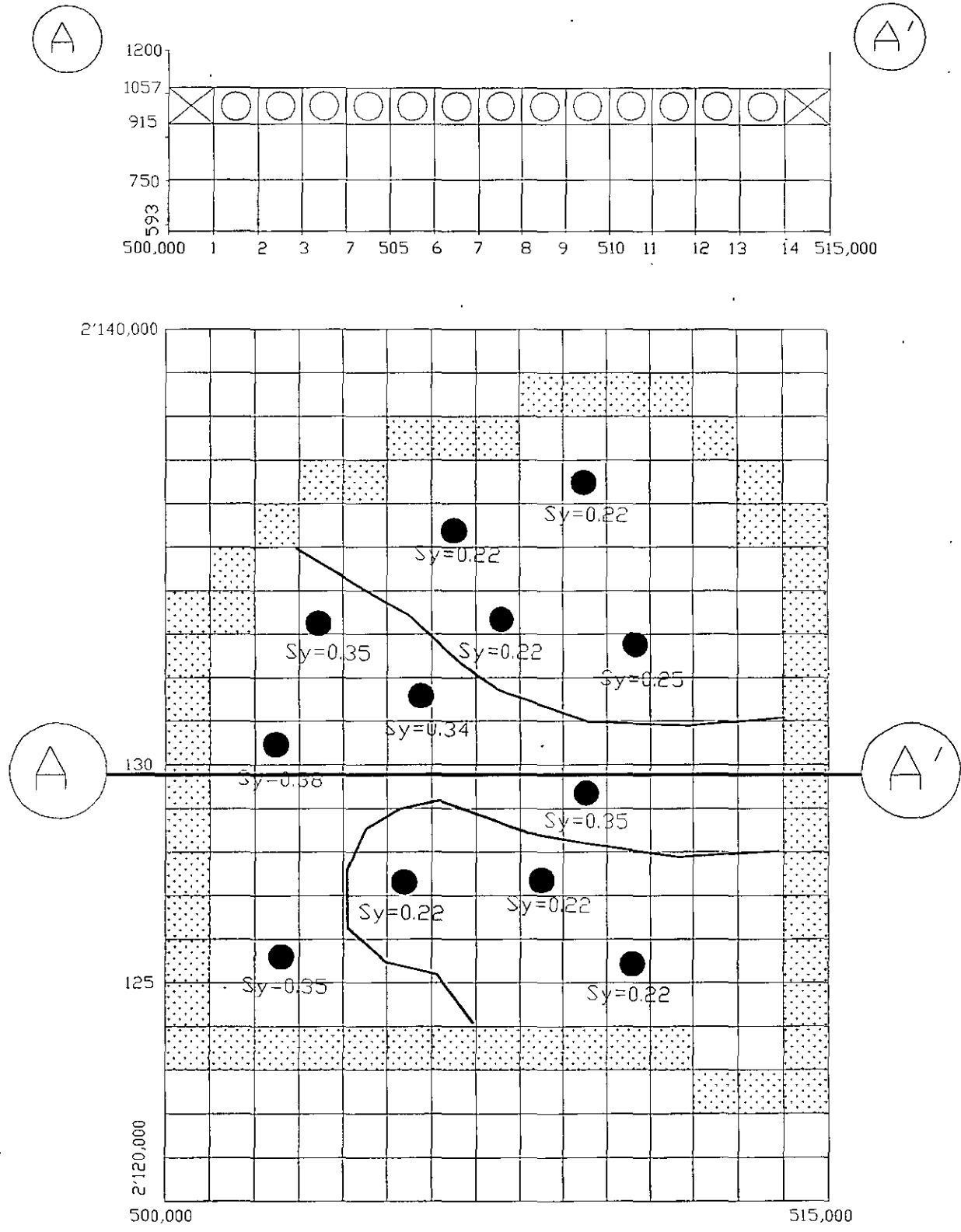


FIGURA 8. VALORES DE RENDIMIENTO ESPECÍFICO.

DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECIFICO S_y EN LA CAPA 1

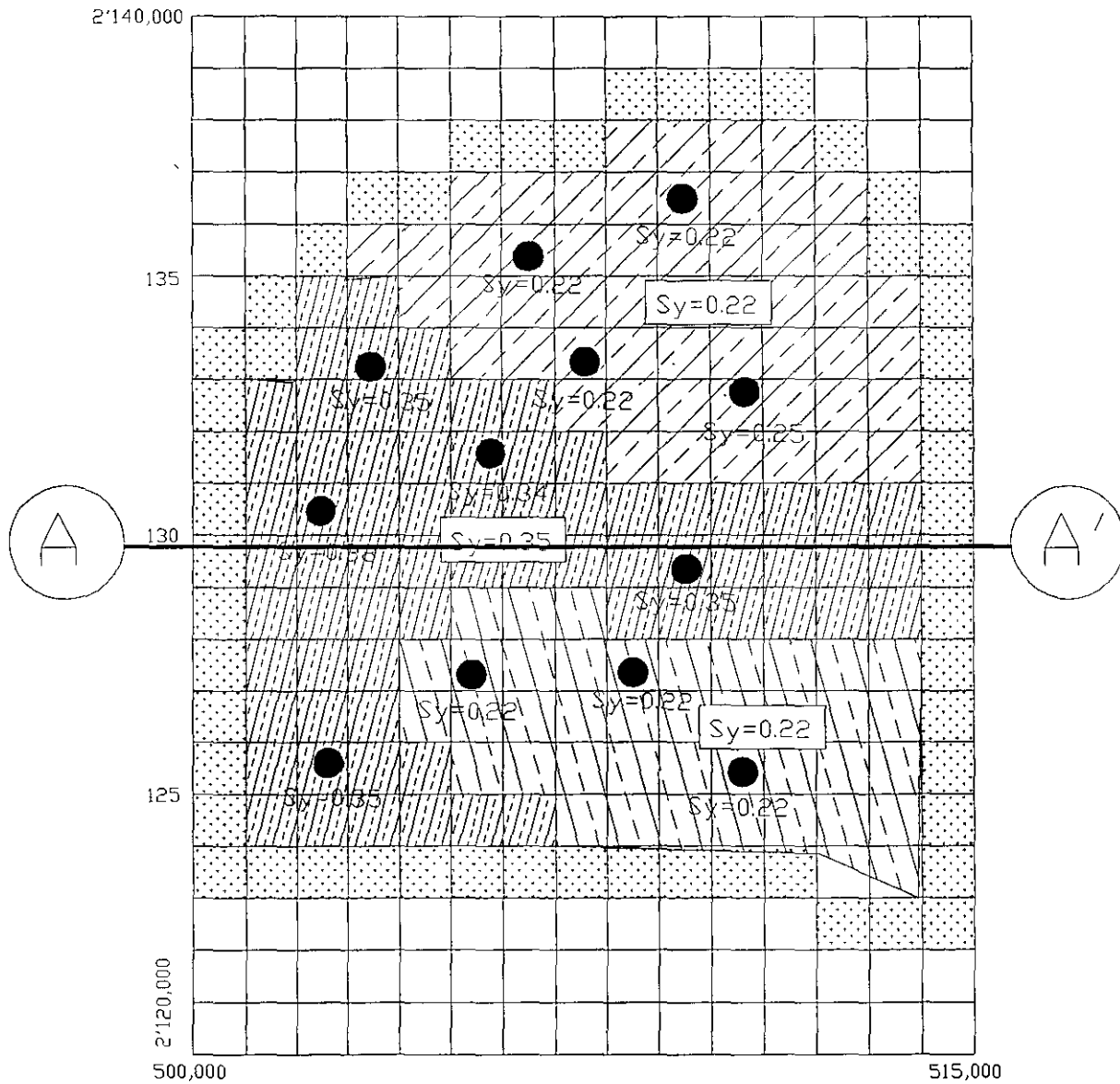
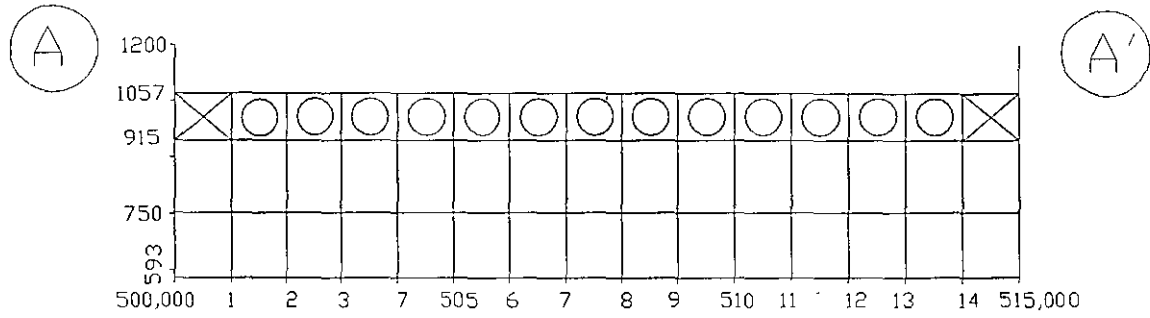


FIGURA 8a. ZONIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECIFICO.

DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECÍFICO S_y EN LA CAPA 2

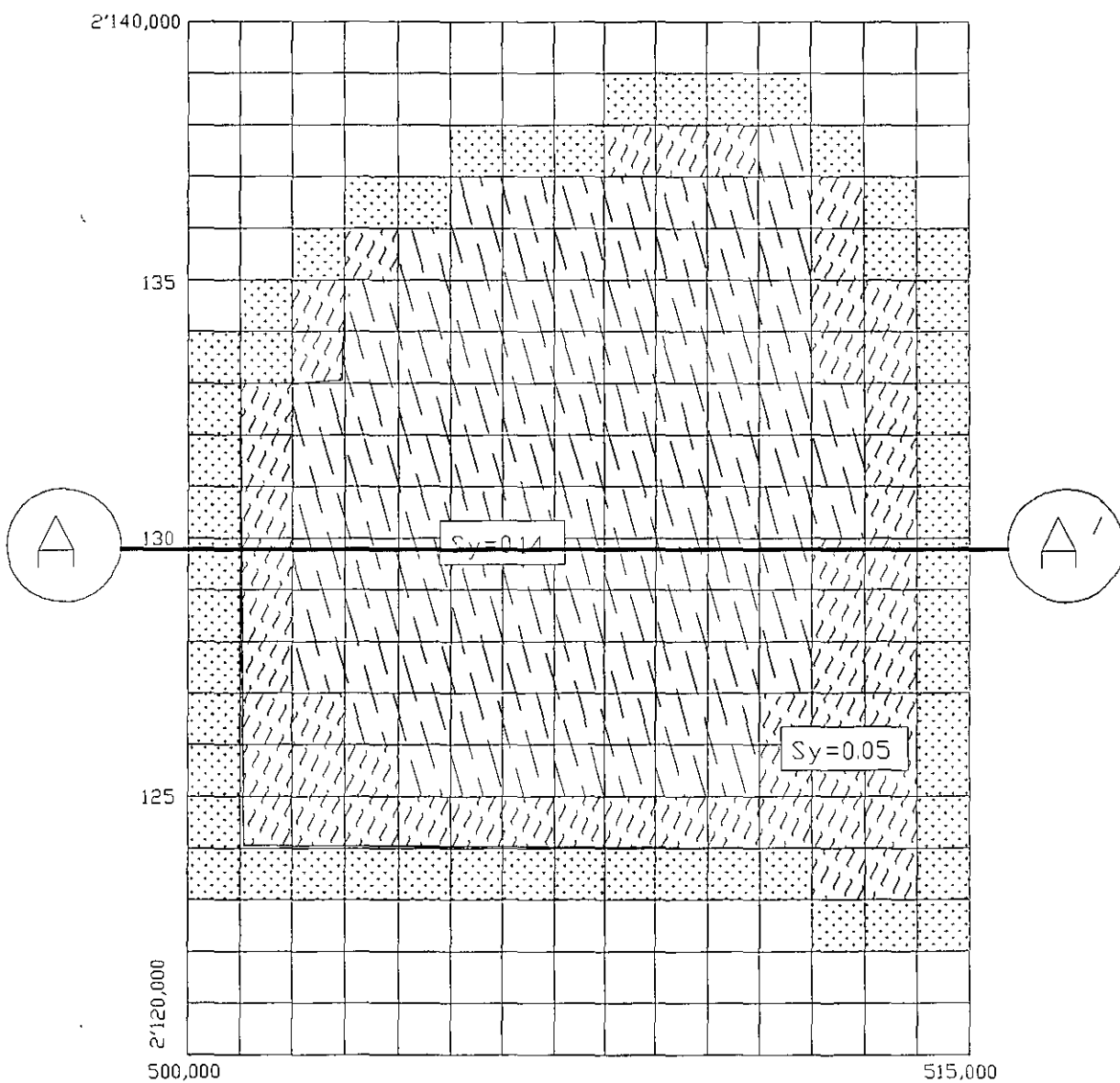
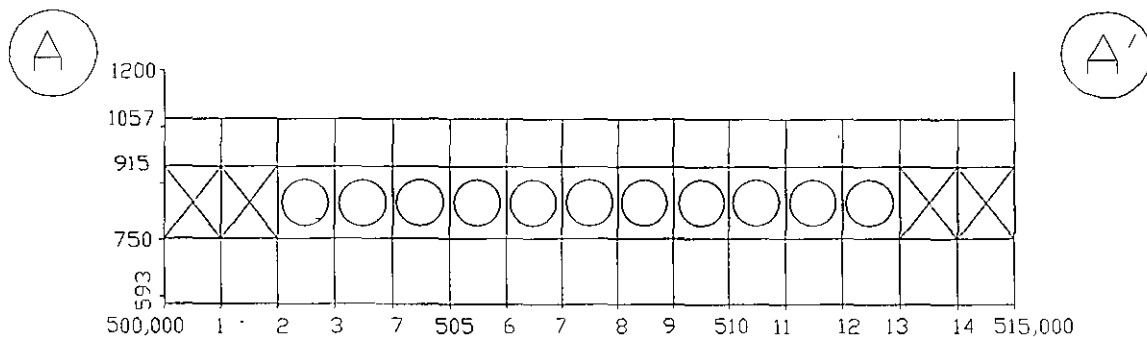


FIGURA 8b . DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECÍFICO.

DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECÍFICO S_y EN LA CAPA 3

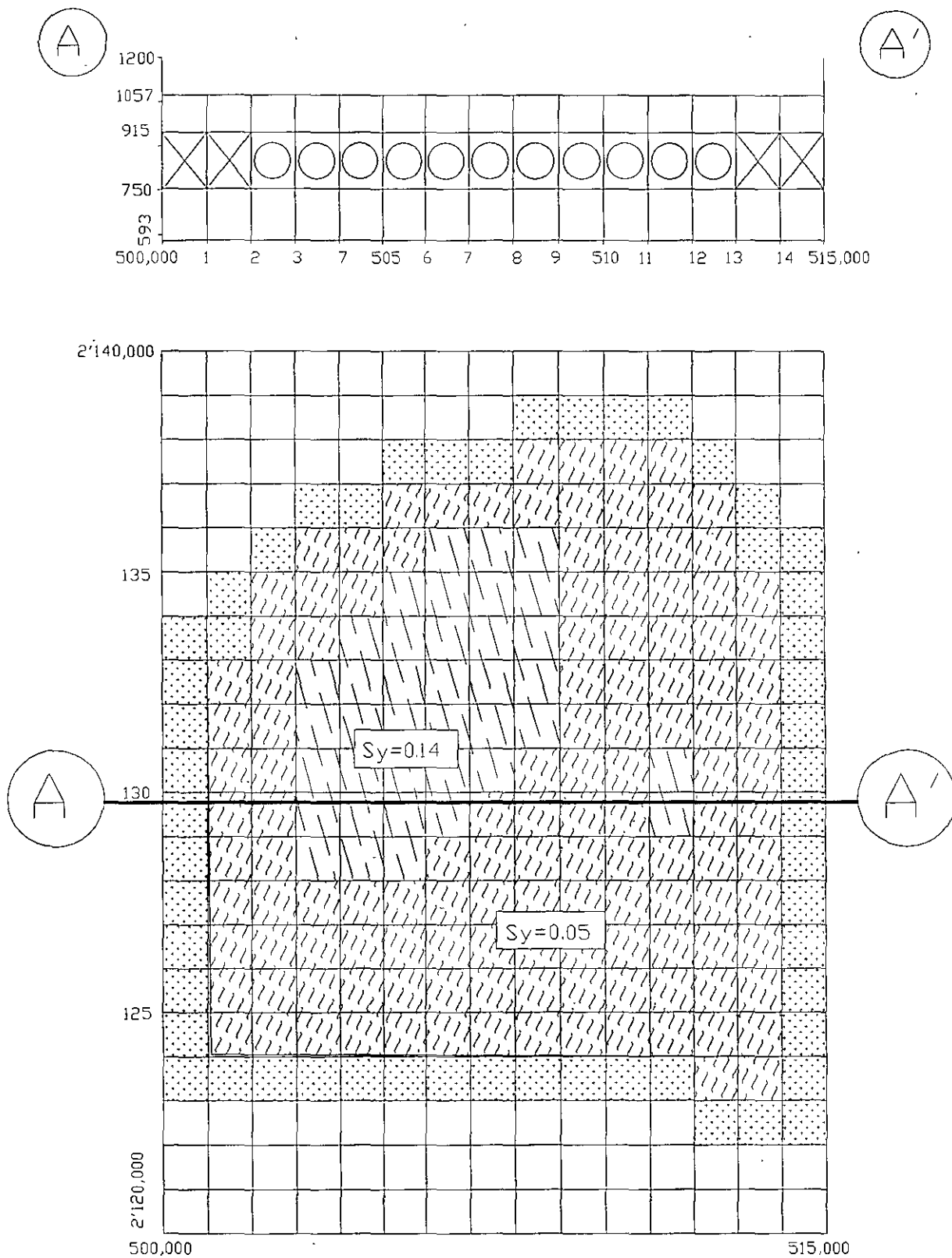


FIGURA 8c. DISTRIBUCIÓN DEL RENDIMIENTO ESPECÍFICO.

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN EL CAUCE DEL RÍO

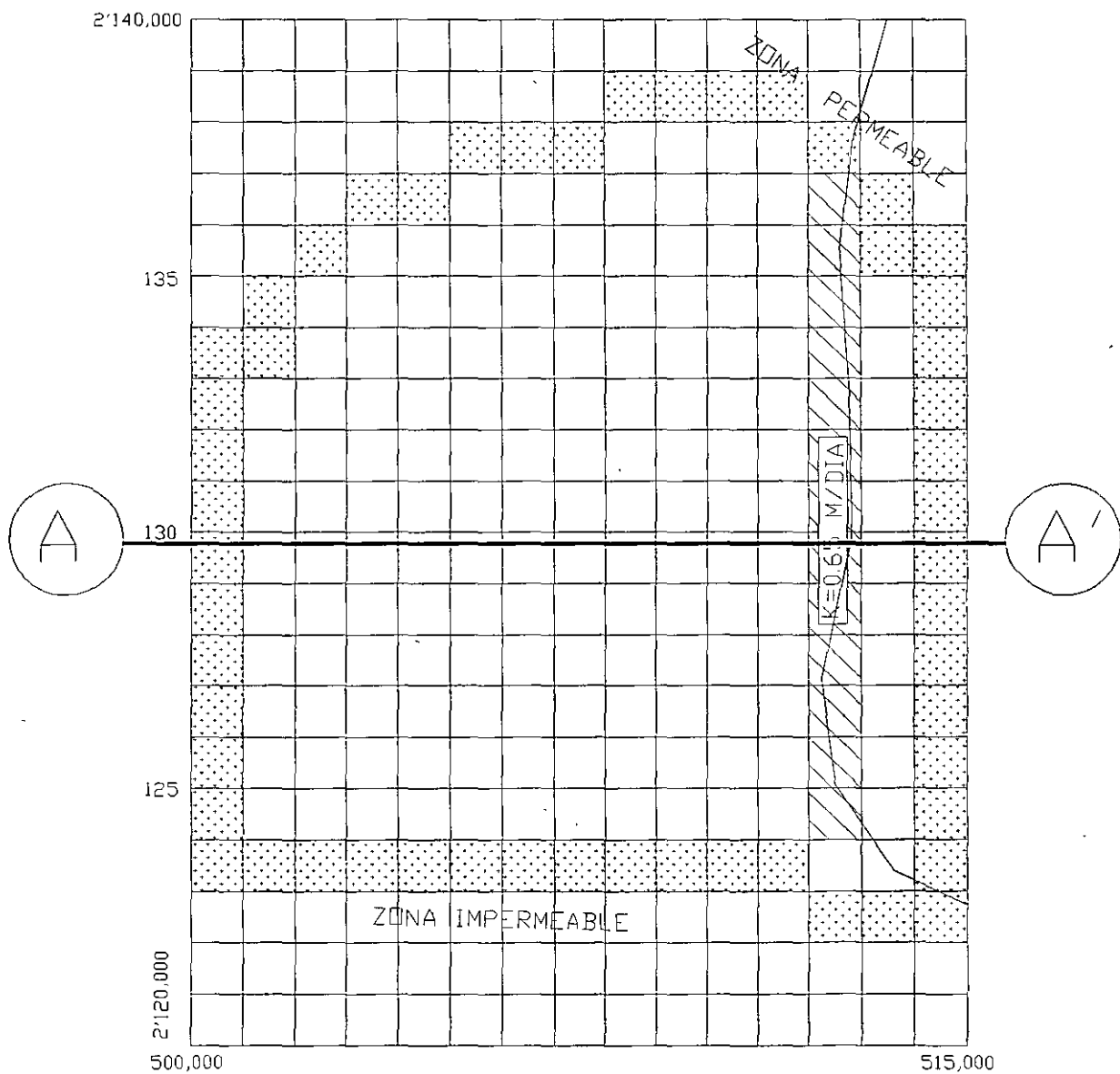
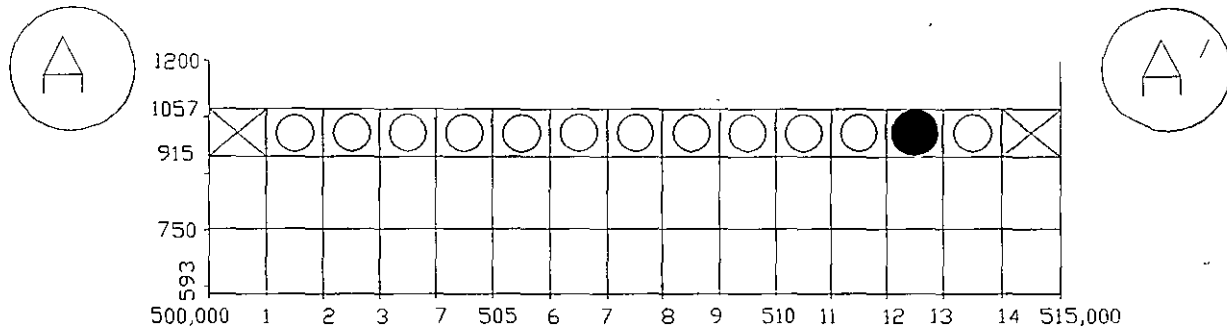
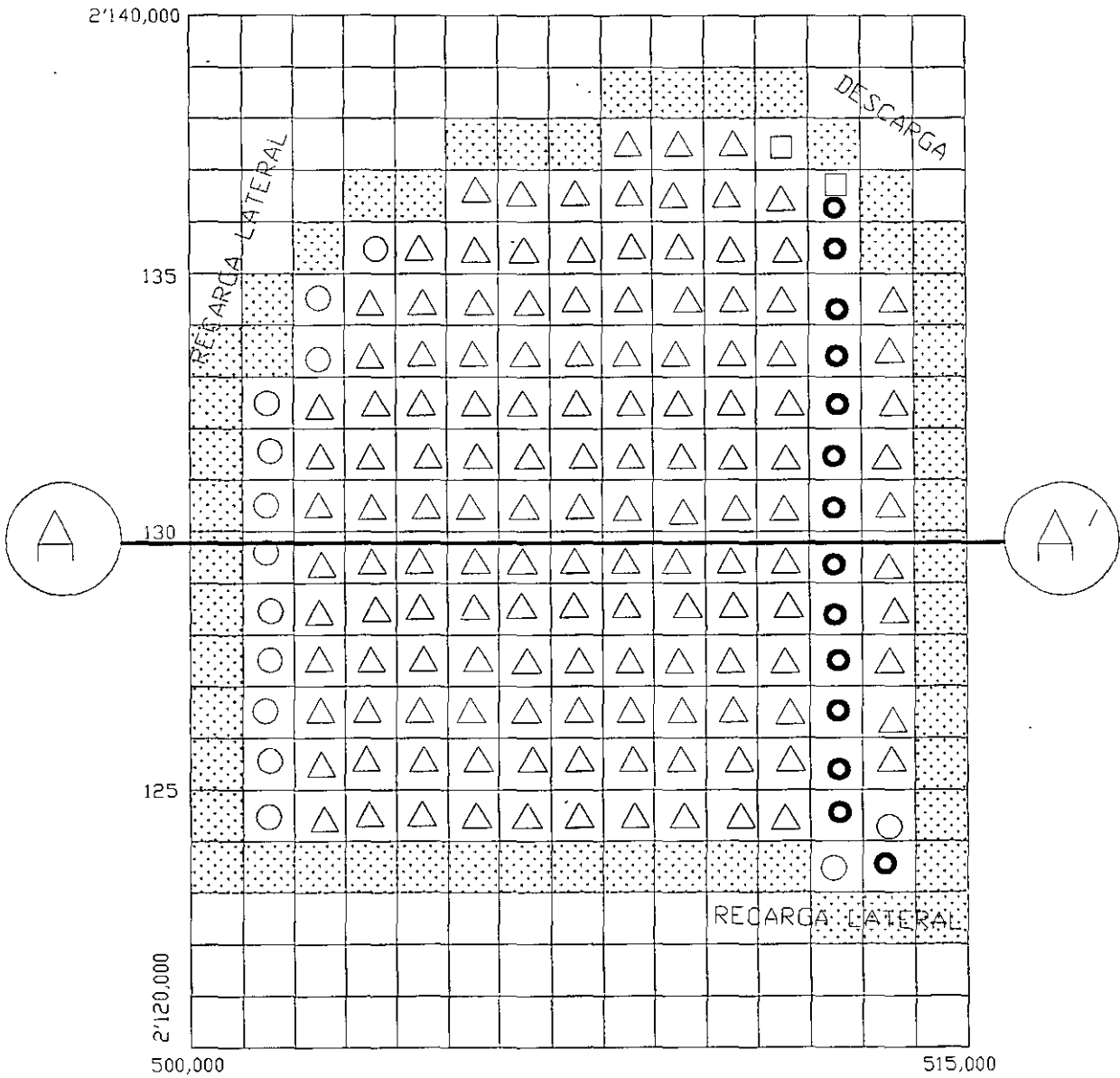
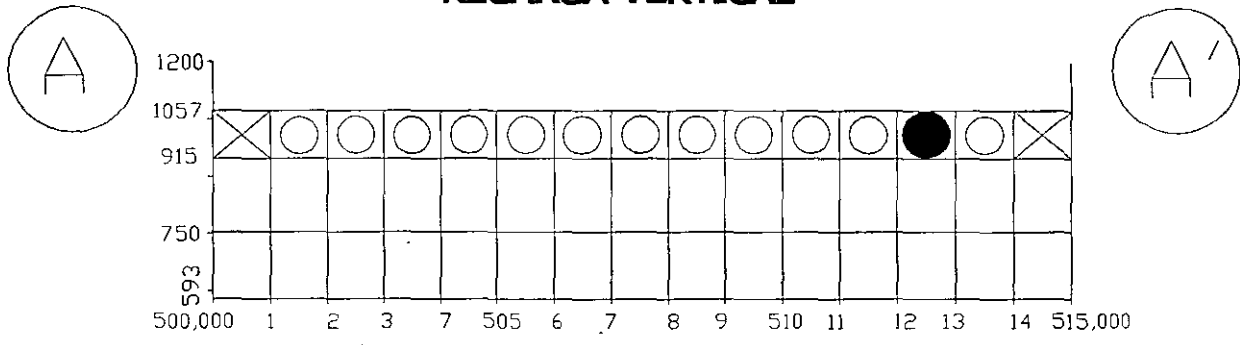


FIGURA 9. ZONIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN EL LECHO DEL RÍO.

RECARGA VERTICAL



- | | | | |
|---|--------------------|---|--------------------|
| △ | RECARGA VERTICAL | □ | SALIDAS LATERALES |
| ○ | ENTRADAS LATERALES | ● | INFILTRACIÓN (RÍO) |

FIGURA 10. ZONAS DE RECARGA Y SALIDAS AL ACUÍFERO.

LOCALIZACIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN

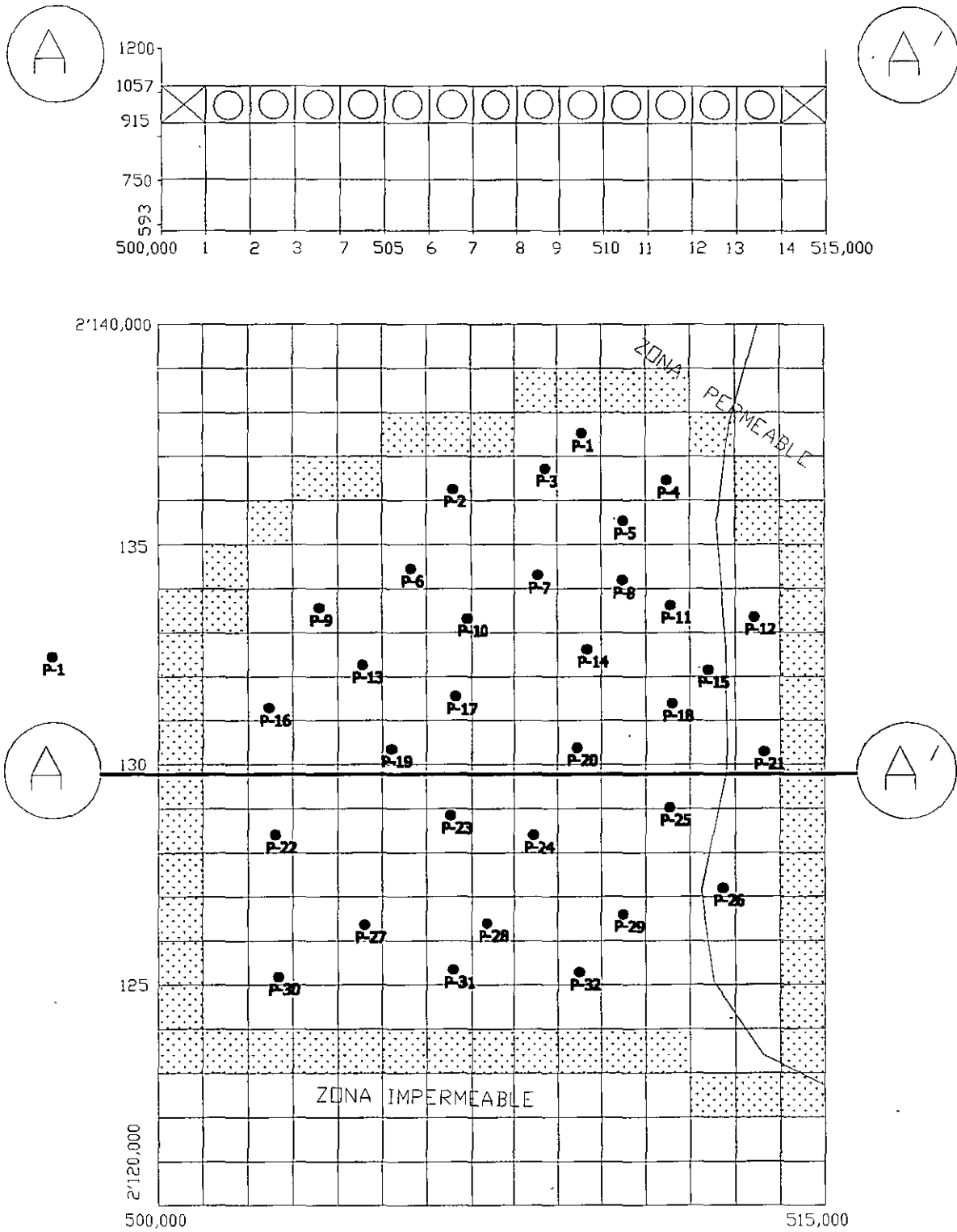
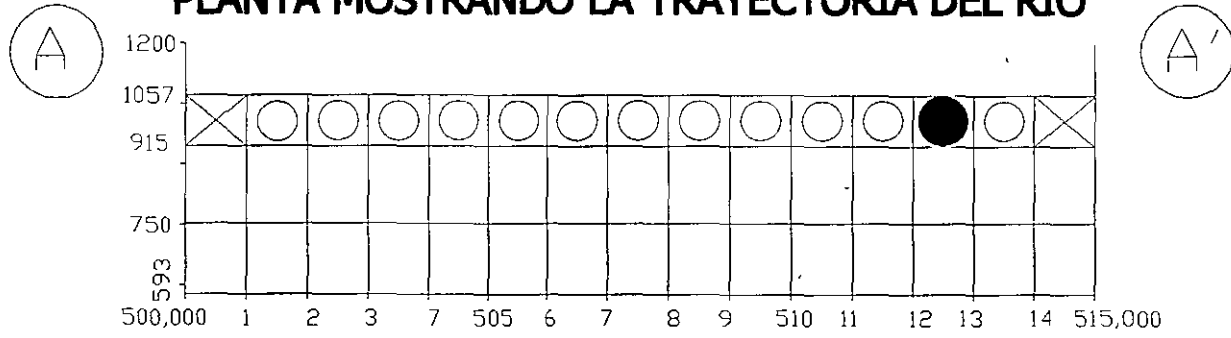



FIGURA 10a. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE EXTRACCIÓN.

PLANTA MOSTRANDO LA TRAYECTORIA DEL RÍO



 CELDA NO ACUÍFERA
  CELDA ACUÍFERA

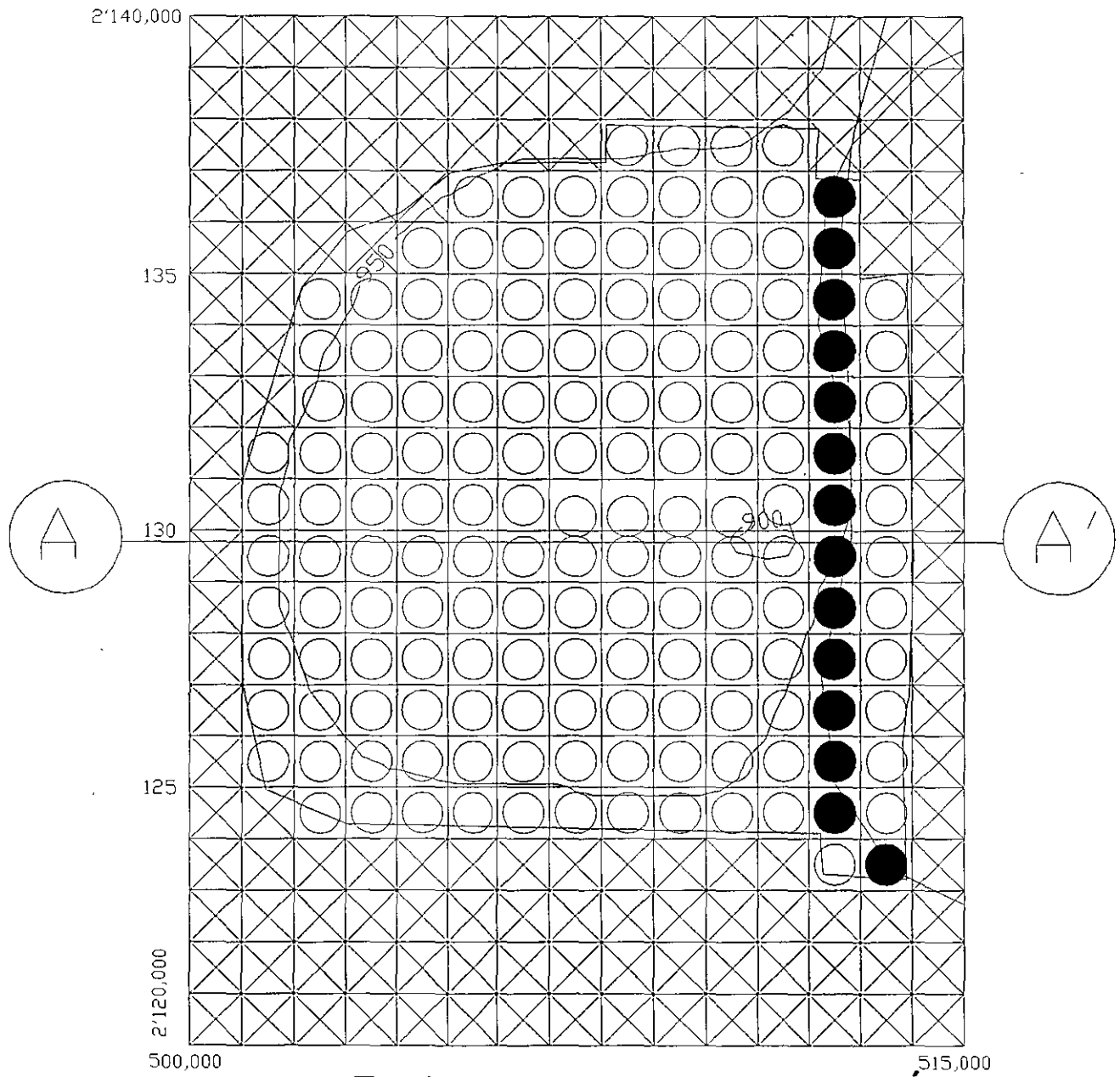


FIGURA 11. MOSTRANDO LA TRAYECTORIA DEL RÍO.

PLANTA MOSTRANDO LA DISCRETIZACIÓN DE LA CAPA 1

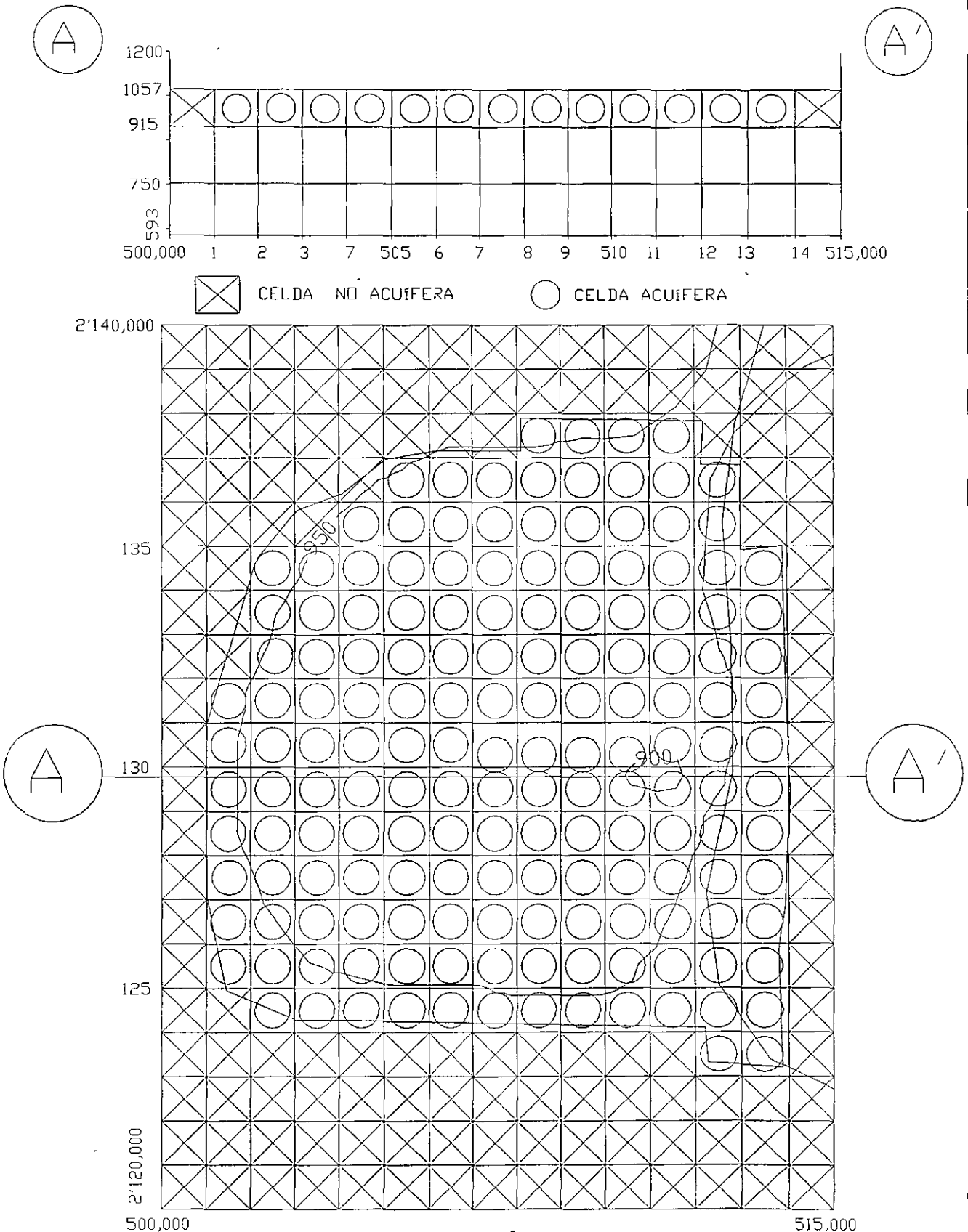
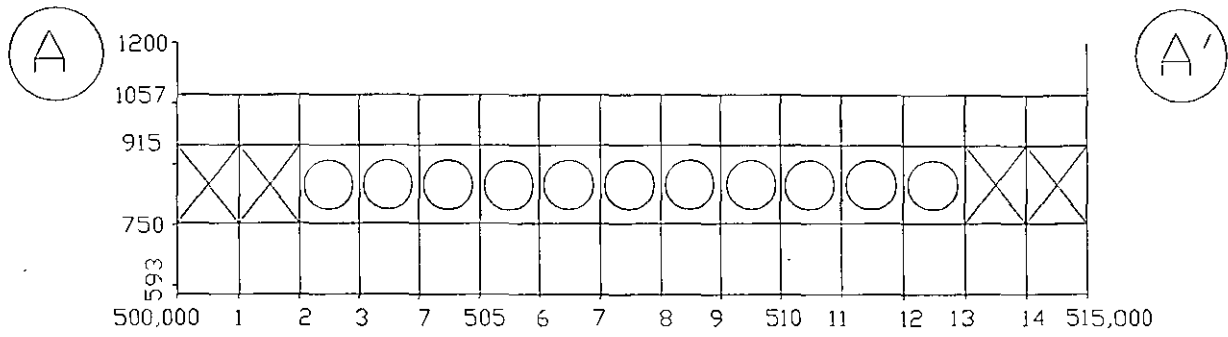




FIGURA 12. CELDAS ACUÍFERAS EN LA CAPA 1.

PLANTA MOSTRANDO LA DISCRETIZACIÓN DE LA CAPA 2



 CELDA NO ACUÍFERA
  CELDA ACUÍFERA

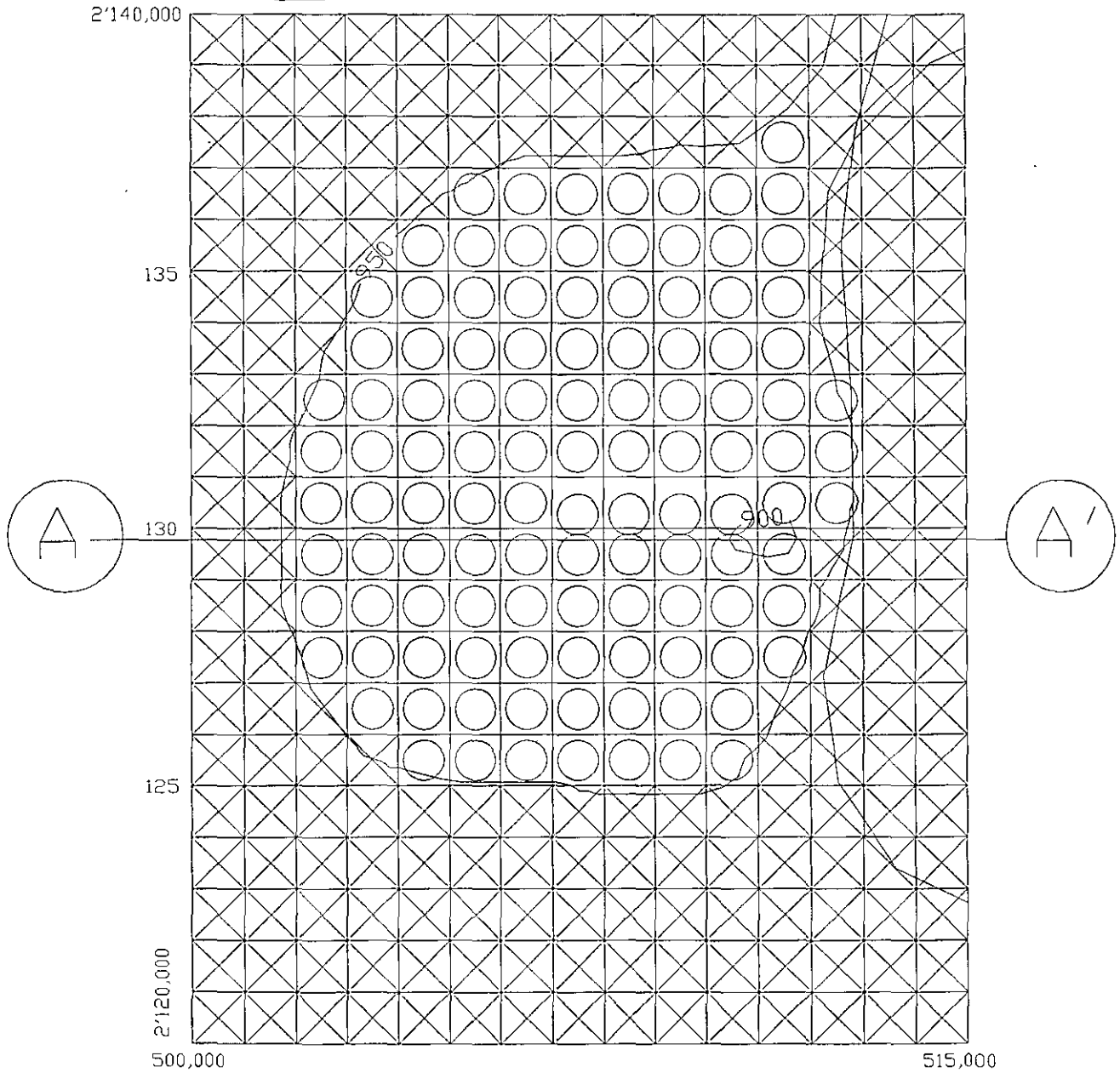


FIGURA 13. CELDAS ACUÍFERAS DE LA CAPA 2.

PLANTA MOSTRANDO LA DISCRETIZACIÓN DE LA CAPA 3

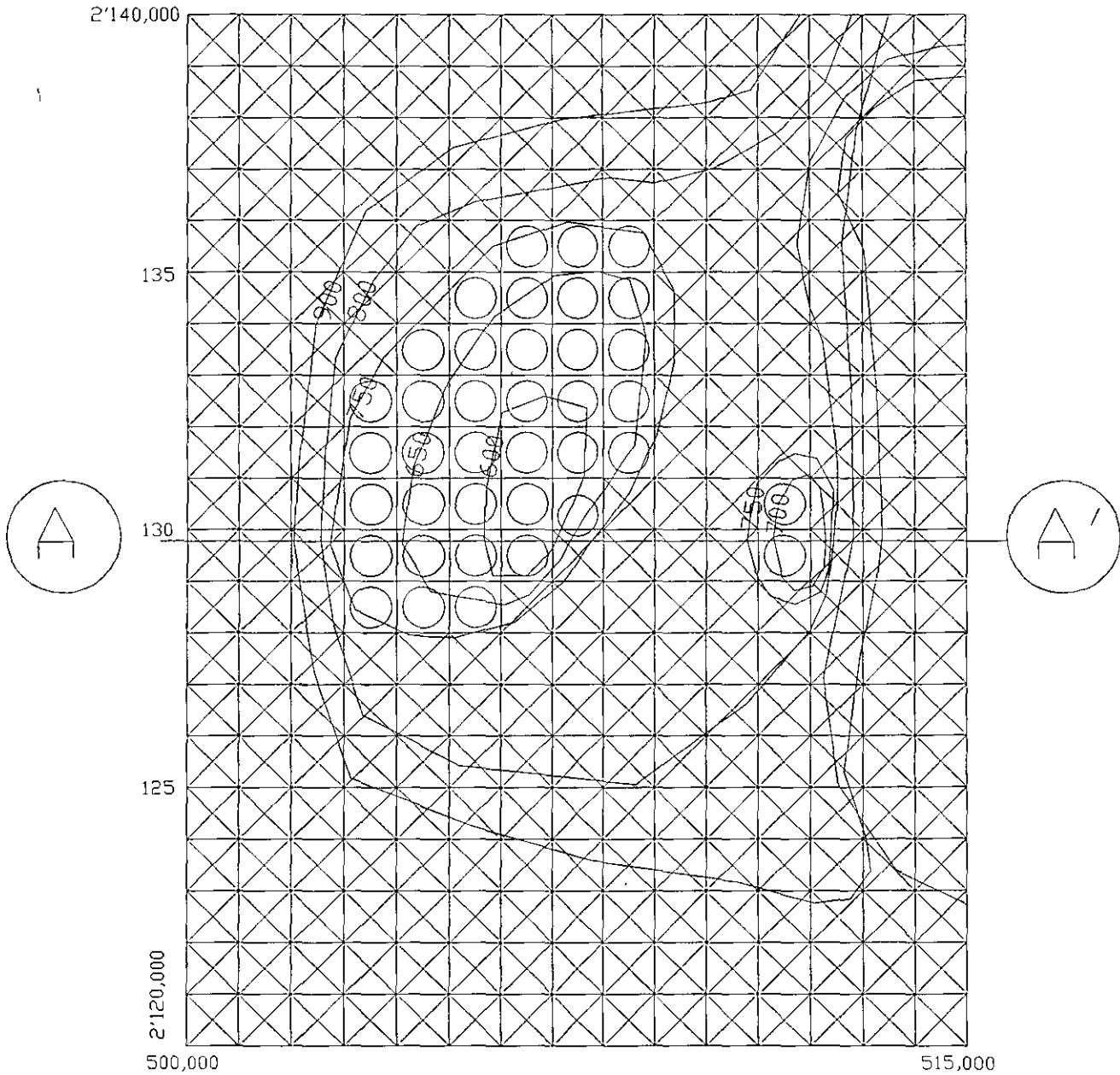
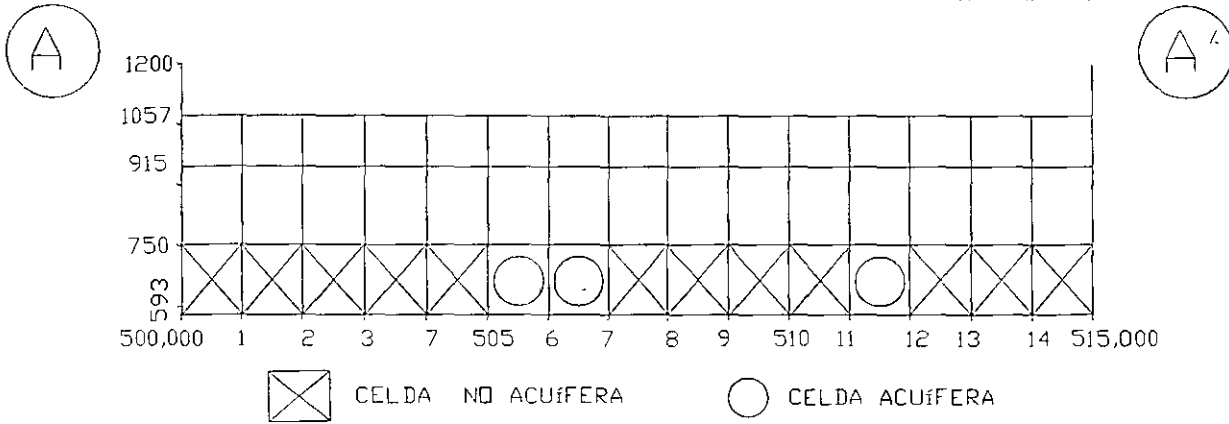


FIGURA 14. CELDAS ACUÍFERAS CAPA 3.

LOCALIZACIÓN DE POZOS DE OBSERVACIÓN

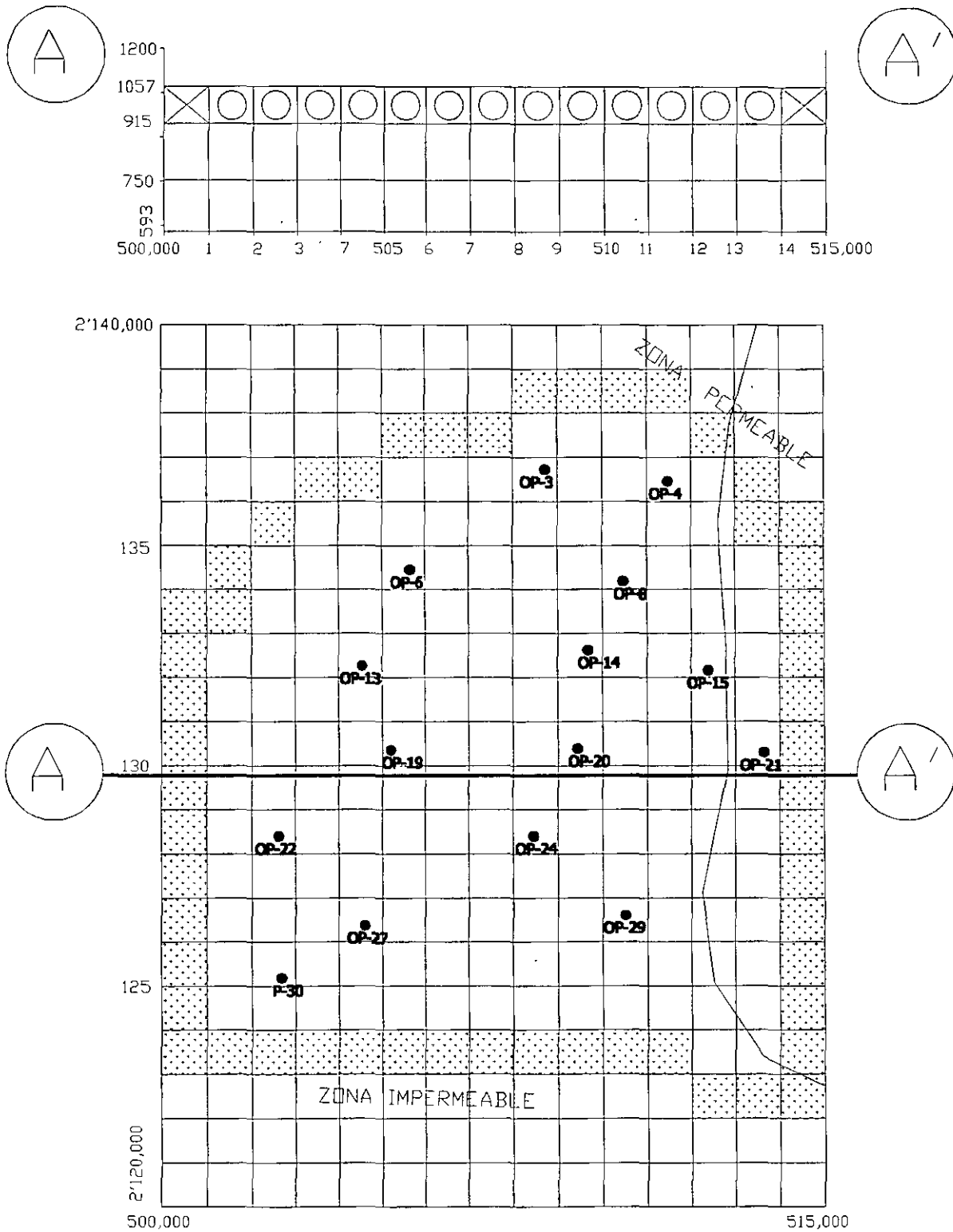


FIGURA 15. LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS**

**CA 166 MODULO III MODELOS
MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

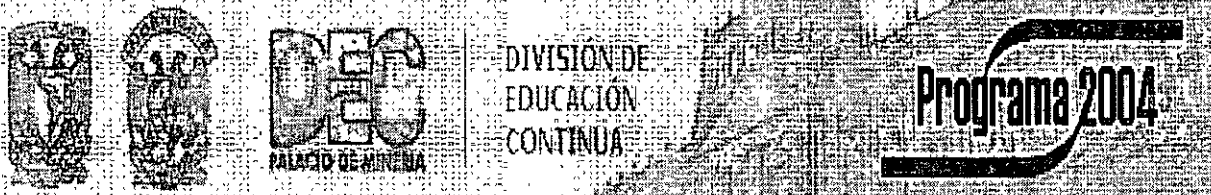
TEMA:

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE AGUA
A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS**

COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

DEL 18 AL 22 DE OCTUBRE DE 2004

PALACIO DE MINERÍA



SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS

Derivación de la ecuación gobernante

Es derivada matemáticamente por combinar una ecuación de balance de agua con la Ley de Darcy. La derivación es tradicionalmente hecha por referirse a un cubo de material poroso que es lo bastante grande para ser representativo de las propiedades del medio poroso y es todavía lo bastante pequeño para que el cambio de carga dentro del volumen es relativamente pequeño. Este cubo de materia poroso es conocido como un volumen elementario representativo o REV. Su volumen es igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$ (figura 1). El flujo de agua a través del REV es expresado en términos de la descarga (\mathbf{q})

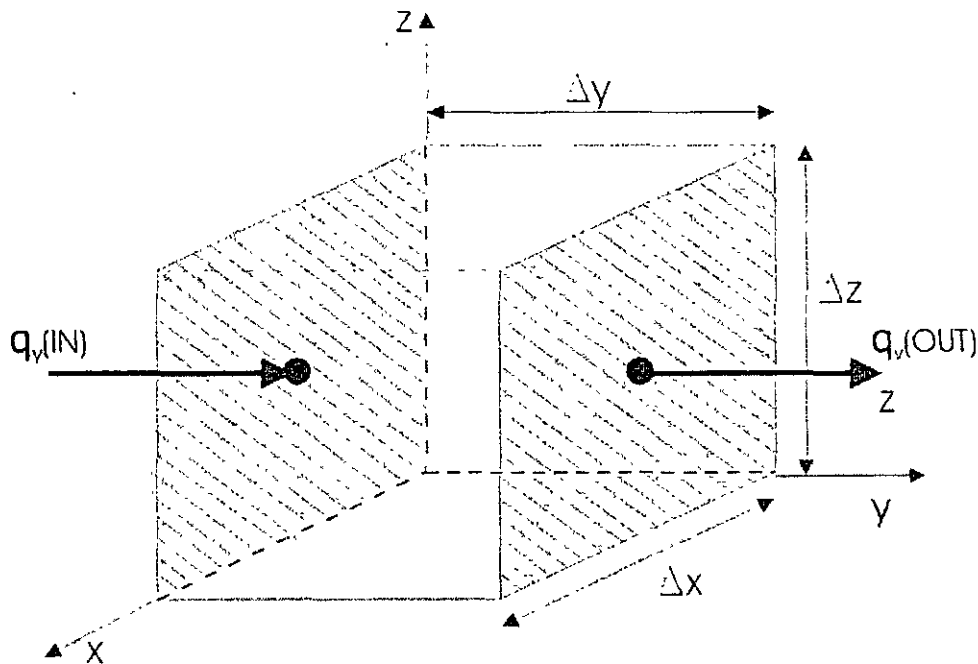


Figura 1. Volumen elementario representativo REV.

Donde \mathbf{q} es un vector donde la magnitud puede ser expresada en términos de tres componentes q_x, q_y, q_z . Formalmente hablando:

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z \quad (1)$$

donde $\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$ son vectores unitarios a lo largo de los ejes x, y, z .

La ecuación de balance de agua (o conservación de masa) indica que

$$\text{flujo saliente} - \text{flujo entrante} = \text{cambio en el almacenamiento} \quad (2)$$

Considérese el flujo a lo largo del eje y del REV en la figura 1. El flujo que entra al REV ocurre a través de la cara $\Delta x \Delta z$ y es igual a $(q_y)_{IN}$. El flujo que sale es igual a $(q_y)_{OUT}$. El flujo volumétrico saliente menos el flujo volumétrico entrante a lo largo del eje y es

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (3)$$

También lo podemos escribir así

$$\frac{[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta y} \quad (4)$$

o tomando la diferencia en el flujo de entrada y el flujo de salida, el cambio en el flujo a través del REV a lo largo del eje y es

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5)$$

Similar expresiones pueden ser escritas para el cambio en el flujo a lo largo del eje x y z . El cambio total en la velocidad del flujo es igual a el cambio en el almacenamiento y se expresa como

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{cambio en el almacenamiento} \quad (6)$$

Debemos también permitir la posibilidad de un sumidero (un pozo de bombeo) o una fuente de agua (un pozo de inyección o cualquier otra fuente de recarga) dentro del REV. La velocidad del flujo volumétrico que entra es representada por $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$. Definimos R^* por ser intrínsecamente positivo cuando es una fuente de agua; sin embargo,

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{cambio en el almacenamiento} + R^* \Delta x \Delta y \Delta z \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - (\pm R^*) \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{cambio en el almacenamiento} \quad (7a)$$

Ahora consideremos el lado derecho de la ecuación 2.2. Cambio en el almacenamiento es representado por el almacenamiento específico (S_s), que es definido como el volumen de agua tomado del almacenamiento por unidad de cambio en la carga (h) por unidad de volumen de acuífero:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (8)$$

La convención usada en la ecuación 8 es que ΔV es intrínsecamente positivo cuando Δh es negativo, o en otras palabras, el agua es tomada del almacenamiento cuando la carga decrece. La velocidad de cambio en el almacenamiento en el REV es

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (9)$$

Combinando la ecuación 7a con la 9 y dividir por $\Delta x \Delta y \Delta z$ da la forma final de la ecuación de balance:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = - S_s \frac{\partial h}{\partial t} + (\pm R^*) \quad (10)$$

La ecuación 10 es de poco uso porque no puede ser medido \mathbf{q} directamente. La ecuación constitutiva (Ley de Darcy) es usada para definir la relación entre \mathbf{q} y h ; la carga es la variable que podemos medir directamente. La ley de Darcy en tres dimensiones es escrita como sigue.

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \tag{11}$$

Sustituyendo la ecuación 11 en la ecuación 10 tenemos

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + (\pm R^*) \tag{12}$$

Finalmente obtenemos la ecuación gobernante

$$[K] \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - (\pm R^*) \tag{13}$$

El tensor de conductividad hidráulica $[K]$ es escrito como sigue:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \tag{14}$$

Las componentes del tensor pueden ser medidas durante una prueba de bombeo.

La ecuación 13 es una ecuación en derivadas parciales de segundo orden.

La expresión en diferencias finitas para una malla irregular las derivadas de primer orden. Mientras que para una malla regular la expresión en diferencias finitas es correcta para derivadas de segundo orden.

Considere el sistema unidimensional mostrado en la figura 2. Para una malla irregular Δx no es constante y la segunda derivada en la vecindad local de (i) es la diferencia en la primera derivada calculada en los puntos $(i - 1/2)$ y $(i + 1/2)$ figura 2. Usando la notación de la figura 2 la segunda derivada puede ser aproximada como sigue:

$$\frac{d^2h}{dx^2} \Big|_i = \frac{d}{dx} \left(\frac{h}{dx} \Big|_{i+1/2} - \frac{dh}{dx} \Big|_{i-1/2} \right) \quad (15a)$$

$$\frac{d^2h}{dx^2} \Big|_i = \frac{1}{\Delta x_i} \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x_{i+1/2}} - \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x_{i-1/2}} \right) \quad (15b)$$

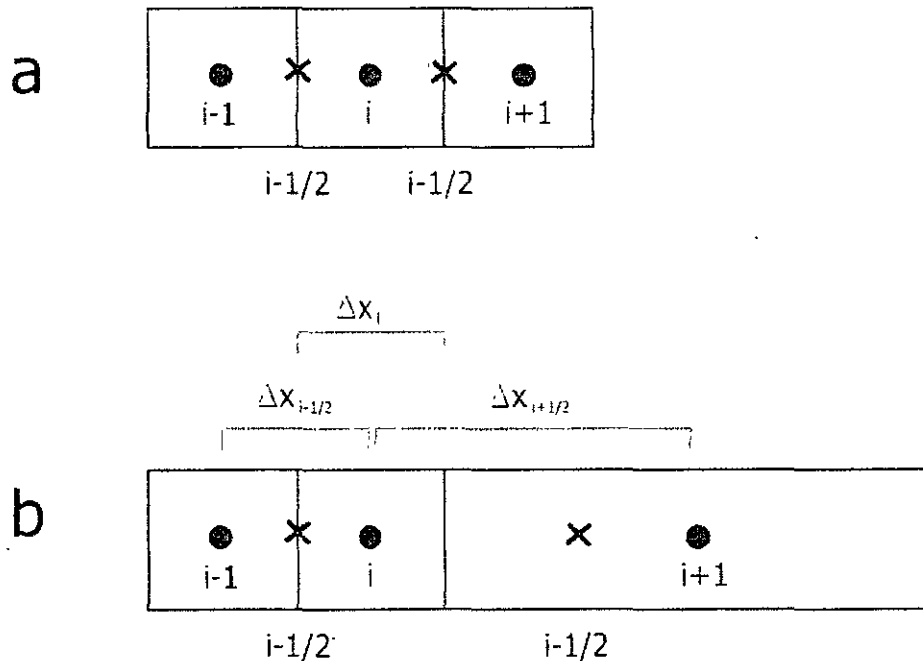


Figura 2. Cuadrículado en diferencias finitas, en el caso b se utilizó un factor de 4, cuatro veces Δx .

Referencias

[1] Applied Ground Water Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport; Mary P. Anderson and William W. Woessner, Academic Press, Inc.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



**DIPLOMADO INTERNACIONAL
SOBRE CONTAMINACIÓN Y
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y
ACUÍFEROS**

**CA 166 MÓDULO III MODELOS
MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

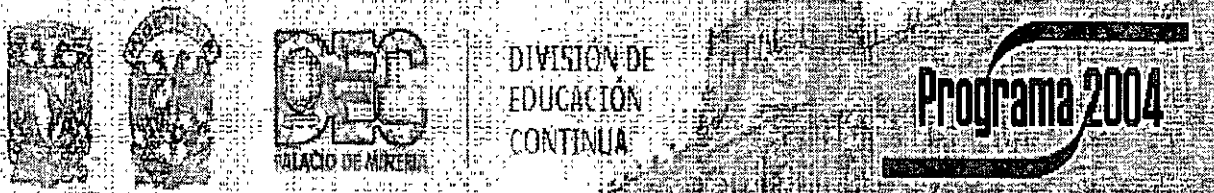
TEMA:

CUADROS

EXPOSITOR: M. en C. FERNANDO LARA GUERRERO

DEL 18 AL 22 DE OCTUBRE DE 2004

PALACIO DE MINERÍA



MODELO HIDROGEOQUÍMICO PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DEL AGUA DE RECARGA AL ACUÍFERO

OBJETIVOS

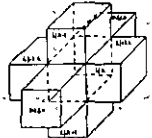
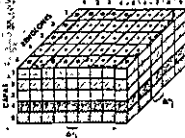
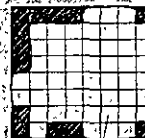
- SIMULAR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA RESULTANTE DE LA MEZCLA DEL AGUA DE RECARGA CON LA DEL ACUÍFERO
- SIMULAR DIFERENTES VOLUMENES DE RECARGA Y VARIOS PERIODOS DE TIEMPO

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE FLUJO

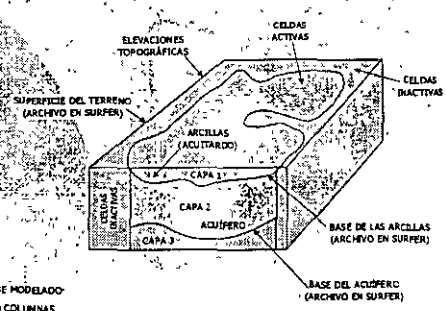
MODFLOW

RESUELVE LA ECUACIÓN DE FLUJO, ESTACIONARIO O TRANSITORIO MEDIANTE UNA APROXIMACIÓN QUASI TRES DIMENSIONAL DE DIFERENCIAS FINITAS

$$\frac{d}{dx} \left(K_x \frac{dh}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dh}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dh}{dz} \right) = W - S_s \frac{dh}{dt}$$



CELDA INACTIVA CELDA ACTIVA



BLOQUE MODELADO
 X=40 COLUMNAS
 Y=46 RÍNGONES
 Z=3 CAPAS

CALIBRACIÓN

SIMULACIÓN

QUE HACE EL MODELO ?

