



**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS**

**INVESTIGACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA. APLICACIÓN A FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.**

**PARTE 1:**

**Descenso en piezómetro frente a bombeo a caudal crítico**

**Recuperación de nivel en piezómetro frente a bombeo caudal crítico**

**Autores: José María López García (1)**

**Ignacio Yenes Gallego (1) (2)**

**Alfredo Iglesias López (3)(4)**

**2011**

(1) Academia General Militar

(2) Escuela Politécnica del Ejército

(3) Instituto Geológico y Minero de España

(4) ETS de Ingenieros de Minas

## INDICE

INTRODUCCIÓN.

1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.
2. MATERIALES Y METODOS.
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.
4. DISEÑO DE LA CELULA.
  - 4.1. Introducción. Célula estándar y célula específica
  - 4.2. Célula estándar. Mallado, bordes y simulación
5. VALIDACIÓN DEL MODELO.
  - 5.1. Régimen permanente.
    - 5.1.1. Thiem Vs Dupuit.
  - 5.2. Régimen transitorio.
    - 5.2.1. Barrera Positiva.
    - 5.2.2. Bombeo a caudal critico.
6. DISEÑO DE METODOS PARA INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.
  - 6.1. Descenso en piezómetro frente a bombeo a caudal critico
  - 6.2. Recuperación de nivel en piezómetro frente a bombeo caudal critico
7. CONCLUSIONES.

## BIBLIOGRAFÍA

## INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo forma parte de un conjunto de investigaciones y desarrollos metodológicos inéditos, realizados acordes con el Convenio Marco de colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. El trabajo ha sido llevado a cabo por los doctorandos de la ETSIM, José María López García y José Ignacio Yenes Gallego tutelados y dirigidos por Alfredo Iglesias López, investigador titular del IGME y Jefe del Área de Sistemas de Información Geocientífica

La propuesta de investigación planteada es el estudio de métodos de interpretación de ensayos de bombeo utilizando métodos numéricos de simulación, en aquellas ocasiones de interés en las que no existen desarrollados métodos analítico-interpretativos. Estos métodos se investigan principalmente con el objetivo de incrementar la baja y poco fiable gama, hasta el momento, de métodos de interpretación aplicables a formaciones acuíferas de baja permeabilidad.

En un pasado, ya remoto, estos métodos han carecido del interés general de la investigación, dado que se buscaba el agua como fuente de suministro. Más tarde cuando el agua incidía como problema en estudios de geotecnia: túneles, ferrocarriles, presas y carreteras, el estudio de formaciones de baja permeabilidad fue adquiriendo cada vez mayor interés por parte de los investigadores.

Actualmente, el agua subterránea se ha mostrado tal y como es; el elemento fundamental de transporte de contaminantes en la geoesfera. Los estudios de emplazamientos de residuos radiactivos, residuos contaminantes urbanos y residuos tóxicos y peligrosos pasan por evaluar los parámetros hidrogeológicos de formaciones de baja permeabilidad.

Las tareas de este trabajo tutelado han mantenido dos grupos de acciones bien diferenciados:

- Acciones tendentes a adquirir por el alumno la base de conocimientos precisa para acometer la investigación concreta que se pretende.
- Acciones propias de la investigación, constituidas por las hipótesis formuladas, las simulaciones efectuadas, el análisis e interpretación de resultados y las validaciones, todo según los pasos marcados por el método de la ciencia.

Respecto al primero, el presente trabajo aporta un Anexo titulado “Base de conocimientos” en el que se sintetiza la información necesaria para acometer la investigación en curso. No tiene mayor valor ni objetivo que sintetizar y constituirse en los “apuntes de curso”.

Respecto al segundo, supone el informe de la investigación desarrollada en base a los conocimientos sintetizados y adquiridos

## 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Se busca obtener un modelo numérico, o mejor aplicar un modelo numérico con la parametrización adecuada que permita hacer interpretaciones de ensayos de bombeo en determinados casos concretos y que sean de utilidad en formaciones de baja permeabilidad.

Se utilizará el modelo Modflow del United States Geological Survey (Instituto Geológico de los Estados Unidos). Es un modelo realizado por Michael G. MacDonald y Arlen W. Harbaugh. Este modelo ve la luz en 1988 y no ha parado de sufrir mejoras e investigaciones hasta hoy día, siendo un modelo de reconocida solvencia a nivel mundial y el más conocido y usado para estudio del flujo de aguas subterráneas de la actualidad.

En los medios de baja permeabilidad, cuando se bombean los pozos es frecuente que el agua baje a la rejilla de la bomba y a partir de ahí la extracción se lleve a cabo bajo la modalidad de nivel constante en el pozo y caudal variable (caudal crítico). En este tipo de bombeo sería interesante interpretar la variación de caudales en el pozo, la recuperación en el pozo, los descensos en los piezómetros y las recuperaciones en los piezómetros.

Existen métodos analítico-interpretativos (con ciertas deficiencias y limitaciones) que permiten interpretar la evolución de caudales en el pozo y los niveles en recuperación (estimando el caudal de bombeo ponderado), también en el pozo. Sin embargo, no existen métodos analíticos para la interpretación de descenso y recuperación en el piezómetro y se tratará de encontrar procedimientos numéricos de simulación para la interpretación. Hay que tener en cuenta, en este caso, que es imprescindible el análisis de los datos del piezómetro para poder estimar el coeficiente de almacenamiento y en consecuencia de la porosidad eficaz.

También es muy frecuente en los medios de baja permeabilidad que los sondeos que se realicen para estudio de piezómetros sean de reducido diámetro, dado que no requerirán alojar instalaciones de impulsión. En estos casos suele bombearse con aire comprimido y analizar la recuperación. Tampoco existe un método analítico que permita el análisis de la recuperación en el piezómetro y se intentará acudir a una metodología numérica.

La investigación tiene en consecuencia tres fases, bien diferenciadas, para cada caso

- Diseño de una célula en el modelo (Mod Flow) que permita reproducir (simular) un pozo de bombeo real con aproximación suficiente.
- Validación la célula propuesta comparando los cálculos del modelo con los resultados de modelos analíticos conocidos para configuración propuesta.
- Simulación de cada uno de los casos no conocidos y sacar conclusiones de lo obtenido en la simulación (sobre modelo calibrado), para diseñar y recomendar un método de interpretación que permita estimar los valores de permeabilidad y porosidad de las formaciones.

El planteamiento será acorde con los principios del método de la ciencia: Se formulan hipótesis, se validan y se aceptan o rechazan. Si hay rechazo de hipótesis se formula una nueva y así hasta que se logra validación plena de una hipótesis formulada. Se extraen las consecuencias y se formulan las conclusiones.

## 2. MATERIALES Y METODOS.

Los materiales básicos utilizados en esta investigación, son de dos tipos: equipos físicos (hardware) y sistemas lógicos (software).

Como hardware se han utilizado simultáneamente en la investigación tres equipos portátiles con procesadores Intel Pentium de 1.6 a 2 Gz de frecuencia, 1 Gb de memoria RAM y de 60 a 100 Gb de memoria secundaria en HHDD. Todos los ordenadores disponían de conexión de banda ancha a Internet, lo que hizo posible las búsquedas para la elección y descarga del modelo y las búsquedas bibliográficas de diverso tipo muy principalmente aquellas búsquedas tendentes a descubrir la existencia de investigaciones similares en la red.

El software empleado consta de la plataforma de los ordenadores Windows XP series superiores al 2003 actualizados con Service Pack 2 de Microsoft y otros complementos significativos disponibles en "Update" de la firma.

Ha sido utilizada la versión 2003 del paquete ofimático Microsoft Office. De estas aplicaciones usadas con carácter general han sido además de Word, para la composición de los textos, Excel, donde se elaboraron todas las comparaciones gráficas y Power Point para la elaboración de las láminas de la presentación. Ha sido también utilizado Surfer v. 8.02 de Golden Software y diversos capturadores de pantalla, entre ellos Screen Hunter 5.0 Free.

El elemento software por excelencia utilizado en esta investigación es como ya se ha dicho el modelo Modflow del United States Geological Survey Michael G. MacDonald y Arlen W. Harbaugh. Este modelo, que es el original del United States Geological Survey, es de difícil uso dado que es una versión Fortran 77 y los ficheros de datos junto con el rigor de sus formatos de introducción de parámetros, hacen muy poco viable simular con mallados de cierto tamaño. Para evitar esto hay varias casas comerciales (principalmente dos) que han elaborado software de preproceso y postproceso. Son Processing Modflow (PMWIN) y Visual Modflow (VMOD). Se ha utilizado PMWIN 5.3 Free de Wen-Hsing Chiang y Wolfgang Kinzelbach. Esta versión es libre y gratuita y puede ser descargada de la red en [www.pmwin.net](http://www.pmwin.net), que se ha constituido en el sistema lógico fundamental de esta investigación.

PMWIN, en rigor, lo único que hace es permitir configurar el sistema en pantalla de un modo sencillo, elaborar los ficheros de entrada y lanzar la ejecución de Modflow. Después recogen los resultados de los ficheros de salida y permiten aplicaciones para la representación de resultados y para la calibración.

Los métodos fundamentales utilizados son:

- Discretización de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de segundo orden parabólicas, por el método de las diferencias finitas.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T} \quad (\text{Ecuación general del flujo 3D})$$

- Métodos de resolución de sistemas “Gradiente conjugado” y “Procedimiento fuertemente implícito, que son, entre otros, los dos métodos de resolución asociados a Modflow y preferentemente utilizados en esta investigación..

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

Metodológicamente el trabajo ha consistido de cinco pasos o grupos de acciones bien diferenciados:

1. Búsqueda en Internet de trabajos similares o del mismo contenido a efectos de comprobar que la presente investigación podía tener aspectos innovadores no investigados.
2. Diseño de la célula haciendo uso del modelo Modflow.
3. Validación de los valores obtenidos por el modelo con métodos analíticos de solución conocida.
4. Simulación de los casos no conocidos por métodos analíticos y análisis de los resultados de la simulación.
5. Conclusiones y definición metodológica

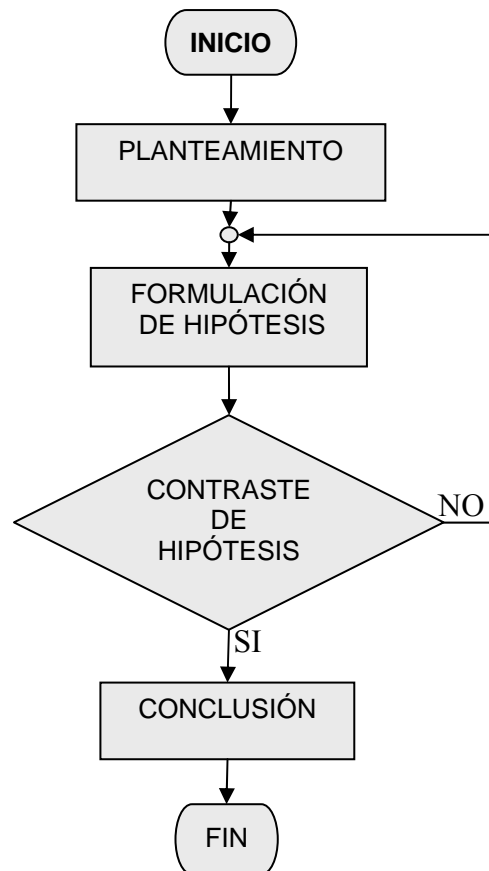
En este trabajo, se utiliza a nivel de base el “método de la ciencia” ampliamente conocido y contrastado tal y como se ha indicado en el apartado anterior.

Se aplica al diseño del modelo de simulación a implementar y consiste en cuatro pasos clásicos:

- Planteamiento del problema. Se sintetiza el problema que se quiere resolver y se define el marco conceptual.
- Formulación de hipótesis. Se formulan las hipótesis que pueden dar solución al problema.
- Contraste de hipótesis. Se contrastan las hipótesis formuladas, si se rechazan se vuelve al paso anterior y se corrigen las hipótesis formuladas o se formulan nuevas hipótesis. Cuando las hipótesis de partida son contrastadas se pasa al punto de conclusiones.

- Conclusión. Se sintetizan las proposiciones validadas y se formaliza el método.

El método sigue el proceso de la figura.



Inicialmente se han formulado hipótesis sobre la configuración más adecuada de la célula en diseño (material, las características temporales de la simulación, periodos de stress y pasos de tiempo y los parámetros de la simulación).

Estas hipótesis se han ido comprobando y aceptando o rechazando hasta encontrar una célula validada. Cada vez que una hipótesis de configuración, tiempo o parámetros específicos se rechazaba definitivamente, se efectuaban las oportunas rectificaciones y adiciones quedando formulada una nueva hipótesis que volvía a someterse al proceso de validación.

Ante una hipótesis validada completa y correctamente se obtenían conclusiones y se pasaba al proceso de simulación de "métodos no conocidos". Sobre los resultados de estos se plantean y sintetizan las metodologías que intentan diseñarse.

## 4. DISEÑO DE LA CELULA.

### 4.1. Introducción. Célula estándar y célula específica

El diseño de la célula de simulación se revela como un paso fundamental para la constatación de la validación del modelo, desde esta premisa, se requiere por lo tanto, una elevada precisión ya que de estos factores dependerá la exactitud, de los resultados posteriores. Para no caer en imprecisiones se definirán dos diseños de célula, una que será llamada Estándar, y otra que se denominará Específica.

Para ambos diseños, es preciso detallar, dimensiones físicas, tamaños de las celdas de estudio, también es necesario definir las condiciones de contorno y fronteras, las referencias de temporales sobre las que van a transcurrir, así como la posición y número del pozo y de los piezómetros y posteriormente definir los parámetros hidrogeológicos que podrían ser asumidos dentro del acuífero.

### 4.2. Célula estándar. Mallado, bordes y simulación.

La decisión de la forma que debería tener la célula estándar, ha ocasionado más que algún problema ya que no todas las células cumplían con los requisitos posteriores de validación, tamaño de celdas, capas, tipos de capas, espesores, bordes, constantes hidrogeológicas y el tiempo son las variables con las que hay que jugar para conseguir que la célula dentro de un tamaño aceptable, pueda ser validada con los posteriores modelos analíticos de referencia.

Nivel piezométrico inicial.

Se decide que este tenga un valor de 150 metros, que junto a una cota superior de la capa de 100 metros configura el acuífero como acuífero cautivo o confinado.

Tamaño de la célula.

Se asigna un tamaño de 9 millones de metros cuadrados en una distribución de 3000 metros de largo por 3000 metros de ancho. Se le asigna un espesor de 100 mts. Este espesor se ha distribuido en una única capa, asumiendo que esta capa es isótropa, y no presenta ninguna irregularidad.

Condiciones de contorno

Se ha decidido rodear la célula por una barrera de nivel constante a fin de impedir que se de el efecto de vaciado. Esta barrera está conformada físicamente por todas las celdas que bordean la célula



Tamaño de celdas.

Se define un tamaño de celda no lineal que podamos asemejar a una escala semi-logarítmica, quedando así un mallado:

500	500	150	100	80	60	40	30	30	20	30	30	40	60	80	100	150	500	500
500																		500
150																		150
100																		100
80																		80
60																		60
40																		40
30																		30
30																		30
20									pozo									20
30																		30
30																		30
40																		40
60																		60
80																		80
100																		100
150																		150
500																		500
500	500	150	100	80	60	40	30	30	20	30	30	40	60	80	100	150	500	500

Intervalos temporales.

Se toman dos periodos de 1 día de duración, el primer periodo dedicado al bombeo y el segundo dedicado a la recuperación. En cada intervalo de tiempo se toman 20 veces mediciones, siguiendo estas un patrón geométrico de razón 1.3.

Piezómetros.

La elección de número de piezómetros y su posición ha ido cambiando durante todos los modelos de células que se han estudiado como candidatas a células estándar. Optando por ubicar un único piezómetro a 55 metros del pozo.

Parámetros hidrogeológicos y valor de bombeo

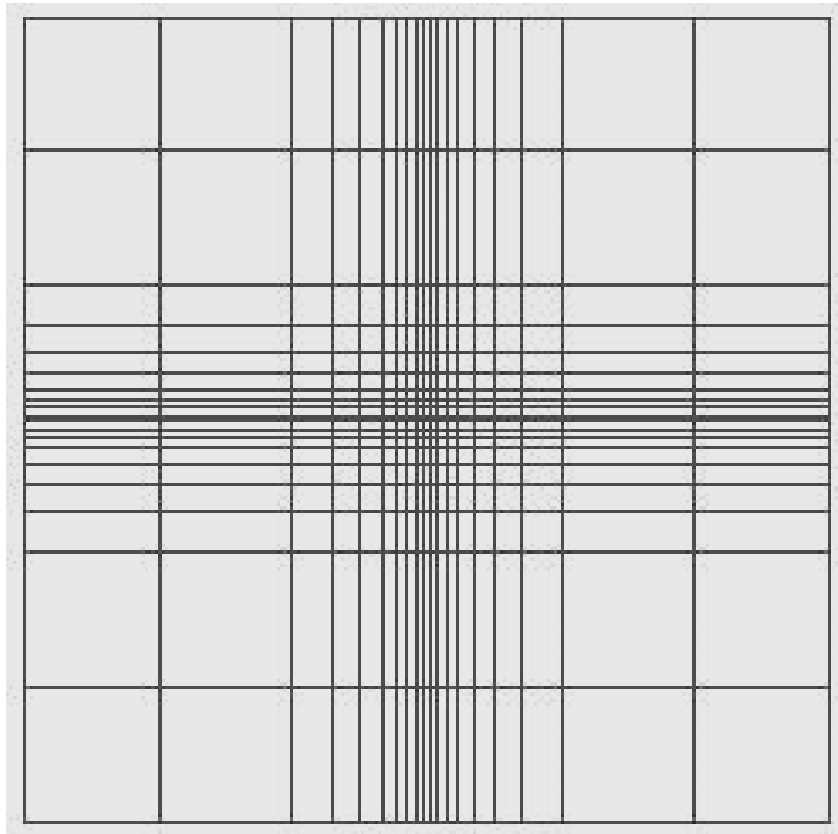
Se ha optado por elegir los siguientes valores de Transmisividad, y coeficiente de almacenamiento.

Transmisividad (T) =  $200 \text{ m}^2 / \text{día}$

Coficiente de almacenamiento (S) = 0.0005

Caudal de bombeo (Q) =  $400 \text{ m}^3 / \text{día}$

Con todo esto la forma de la célula queda:



*Figura 1. Malla de la célula estándar.*

## 5. VALIDACIÓN DEL MODELO.

### 5.1 Régimen permanente.

En los ensayos en régimen permanente, el nivel permanece invariable o prácticamente invariable después de un cierto tiempo de bombeo o tiempo de estabilización. En estas circunstancias, el término  $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$  de la ecuación general se considera nulo. En estos casos el coeficiente de almacenamiento  $S$  no puede calcularse por métodos de régimen permanente, ya que el nivel piezométrico permanece constante y consecuentemente no se producen vaciados en el acuífero, que se limita a ser un mero transmisor del agua.

#### 5.1.1 Thiem Vs. Dupuit.

Ensayo de bombeo en el que se aproxima a las condiciones físicas del acuífero y del pozo (Régimen permanente, no existen recargas exteriores, acuífero homogéneo e isótropo, infinito, el pozo atraviesa toda la formación permeable, flujo radial sin componentes verticales...), con todos estos condicionantes Thiem llegó a la siguiente expresión:

$$d_1 - d_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Que establece la diferencia de nivel piezométrico entre el descenso producido en el pozo y el que se produce en el punto de observación.

Definiendo como radio de influencia ( $R$ ) la distancia entre el punto de bombeo y aquel para el cual la depresión es cero, la ecuación de Thiem para una distancia genérica queda de la siguiente manera:

$$d = 0,366 \frac{Q}{T} \lg \frac{R}{r}$$

Con estas fórmulas podemos relacionar de presiones, caudales, transmisividad y distancia al punto de bombeo.

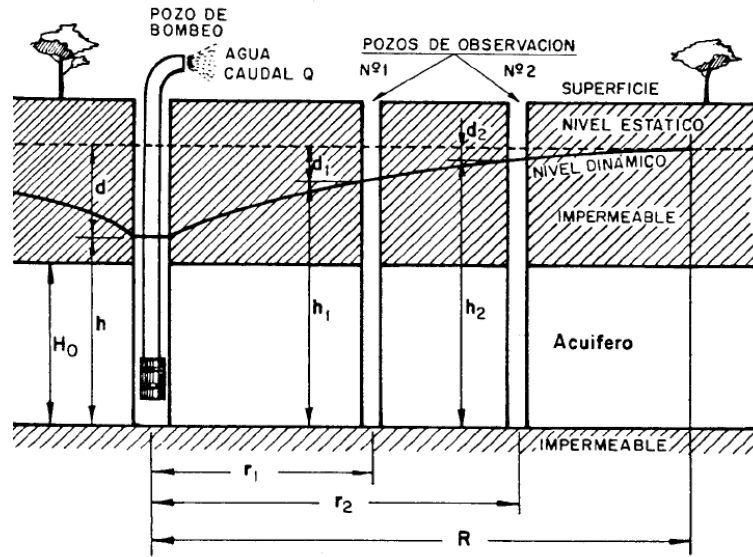


Figura 2. bombeo de un acuífero cautivo en régimen permanente. (Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.33)

Estas expresiones son validas para acuíferos confinados, por lo que Dupuit estableció una corrección a la formula de Thiem para el caso de acuíferos libres

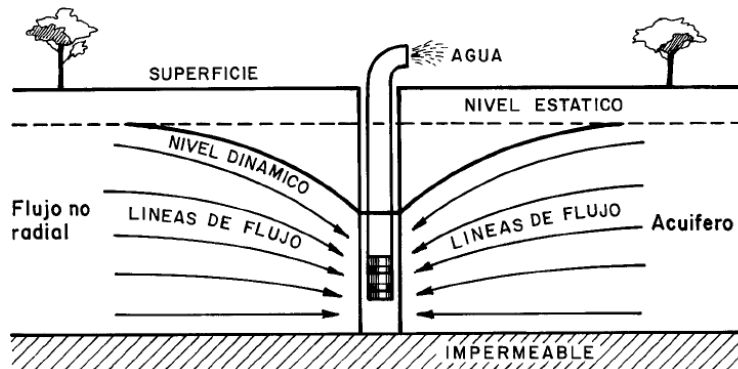


Figura 3. Esquema de flujo en acuífero libre. (Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.42)

Como se observa el flujo deja de ser radial y aparecen con ponentes verticales, por lo que al valor obtenido de la formula de Thiem se le aplica la corrección de Dupuit.

Si un descenso observado tiene valor d, el descenso corregido será  $d - \frac{d^2}{2H_0}$ , donde

$H_0$  es el nivel piezométrico inicial.

**Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.**

Se ha simulado el modelo, dotando de características de régimen permanente a todas las celdas del m allado, para ello la investigación se ha optado por dotar al modelo de un único periodo de estrés de un día, ya que una vez estabilizado el ensayo los niveles permanecerán constantes a lo largo del tiempo.

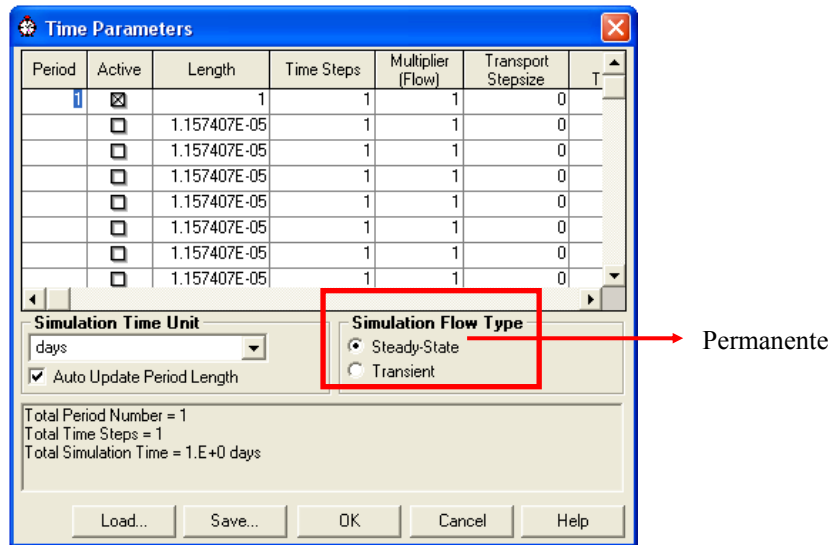


Figura 4. Parámetros temporales

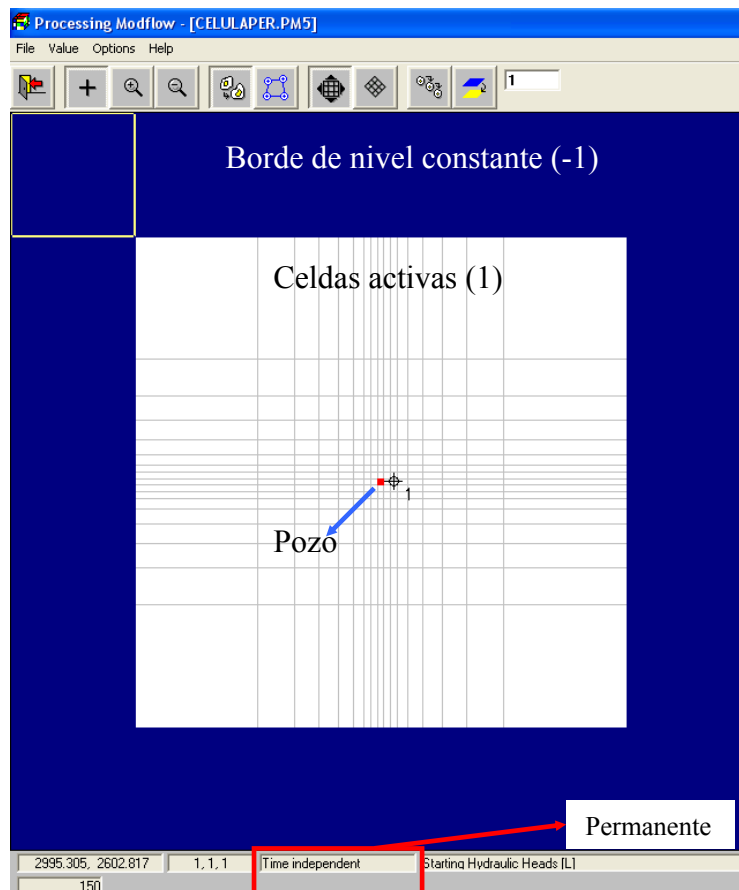
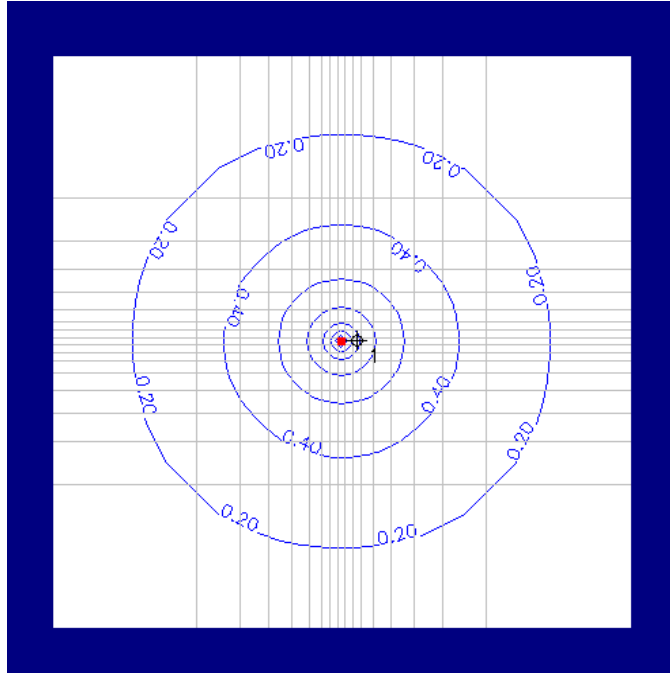


Figura 5. Mallado de la célula modelo para régimen permanente.

**Validación.**

Se ejecutó el modelo una vez introducido los datos propios del régimen en permanente. Los datos obtenidos del modelo, descensos al final del periodo de estrés, se tratan para ver las isopiezas pudiendo comprobarse que son círculos concéntricos como corresponde a un esquema de flujo radial. Además los valores de descensos son coincidentes con los dados por la fórmula de Thiem.



*Figura 6. Gráfico de las isopiezas.*

**Por lo que el modelo para el caso de régimen permanente “Thiem” queda validado.**

## 5.2 Régimen transitorio.

### 5.2.1 Barrera Positiva.

Se procedió a la validación de las células para el caso de existir un borde positivo o recarga lateral. Dicha validación se efectuó comparando resultados del modelo propuesto con el método de Jacob y el método de las imágenes.

Un borde positivo, o borde de recarga, es un sistema superficial en el que existe agua a nivel constante y con capacidad de recargar el acuífero subyacente.

El método de Jacob ha sido explicado con anterioridad y el método de las imágenes para barrera positiva mantiene, y así se demuestra, que si se tiene un pozo bombeando en las proximidades de un borde de recarga y cumple una serie de condiciones (tener nivel constante, ser totalmente penetrante en el acuífero, ser rectilíneo, ...) puede aplicarse dicho método.

Los descensos que se produzcan en el acuífero serán la suma de los efectos debidos al pozo de bombeo real, más los efectos debidos a la inyección de un caudal igual al bombeo real en un pozo imaginario (pozo imagen), situado simétricamente del pozo de bombeo, respecto a la barrera positiva rectilínea y que hubiera comenzado la inyección al mismo tiempo que el bombeo en el pozo real.

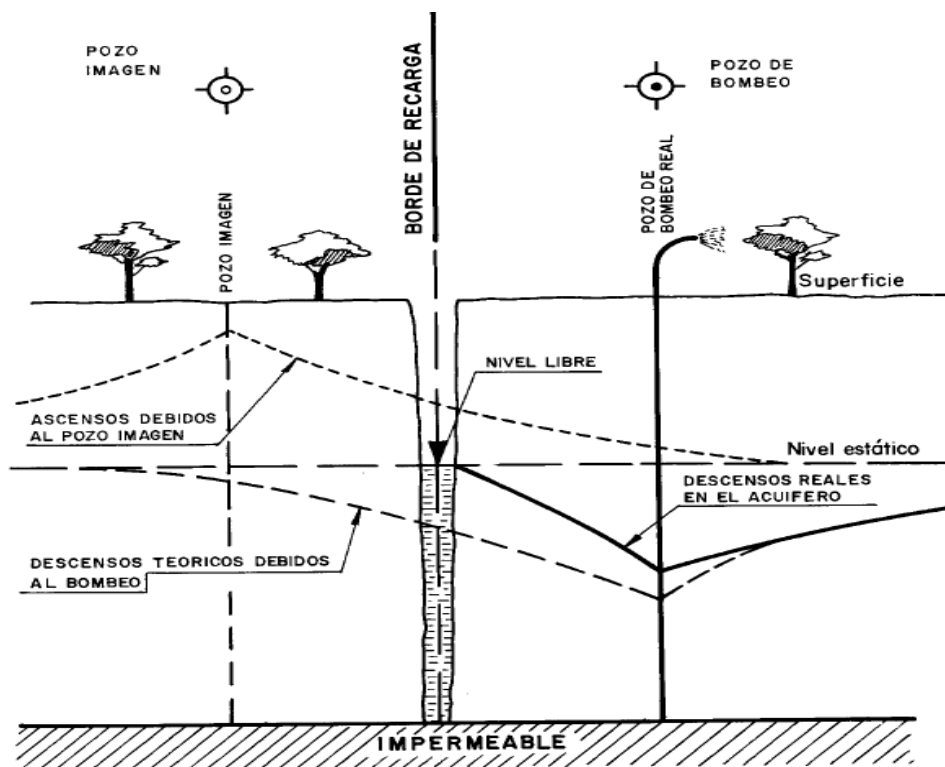


Figura 8. Esquema de los efectos de un bombeo en presencia de un borde de recarga (pozo imagen).

(Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.147)

**Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.**

Se ha simulado el borde positivo, dotando de características de celda de nivel constante (“-1”) a las tres columnas situadas a la derecha del borde de nivel constante y de la zona oeste de modelo.

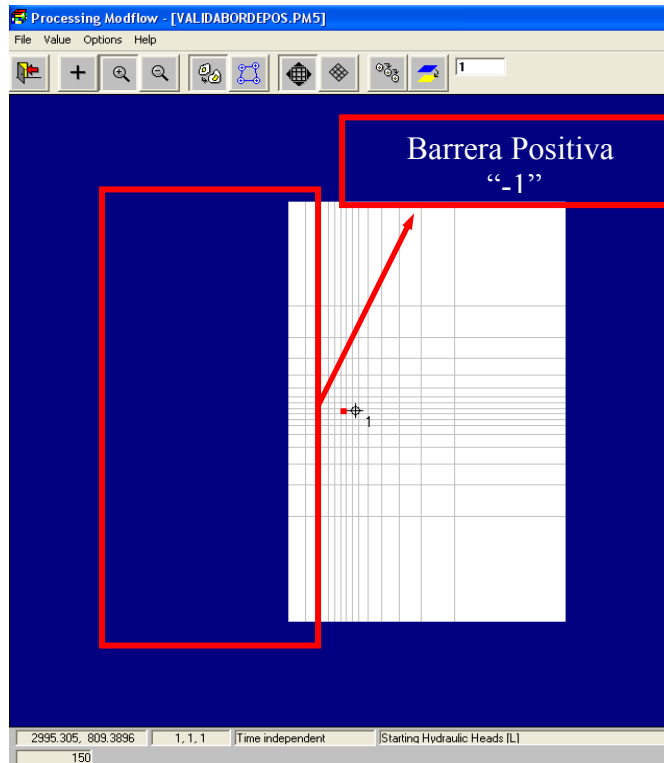


Figura 9. Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio en presencia de una barrera positiva.

**Validación.**

Se ejecutó el modelo una vez introducido los datos propios de la barrera positiva y los datos obtenidos del modelo se volcaron en la base de datos (hoja de Excel) donde fueron cotejados con la “serie de datos reales” la cual no es otra que la serie analítica de Jacob a la cual le hemos restado el efecto de la inyección en el pozo imagen.

$$D = d - d' = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t}{t_0} - 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t}{t'_0}$$

$$D = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t'_0}{t_0}$$

$$t'_0 = \frac{r'^2 S}{2,25T} \quad t_0 = \frac{r^2 S}{2,25T}$$

$$D = 0,366 \frac{Q}{T} \lg \frac{r'}{r}$$



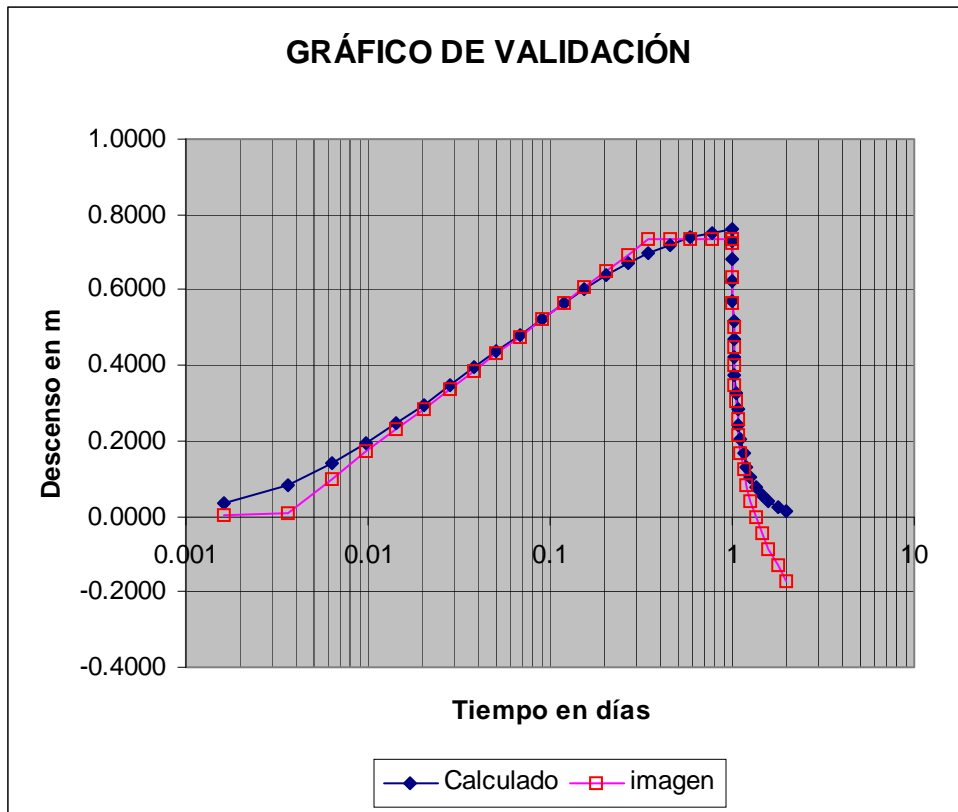


Figura 10. Grafico. En escala semilogarítmica

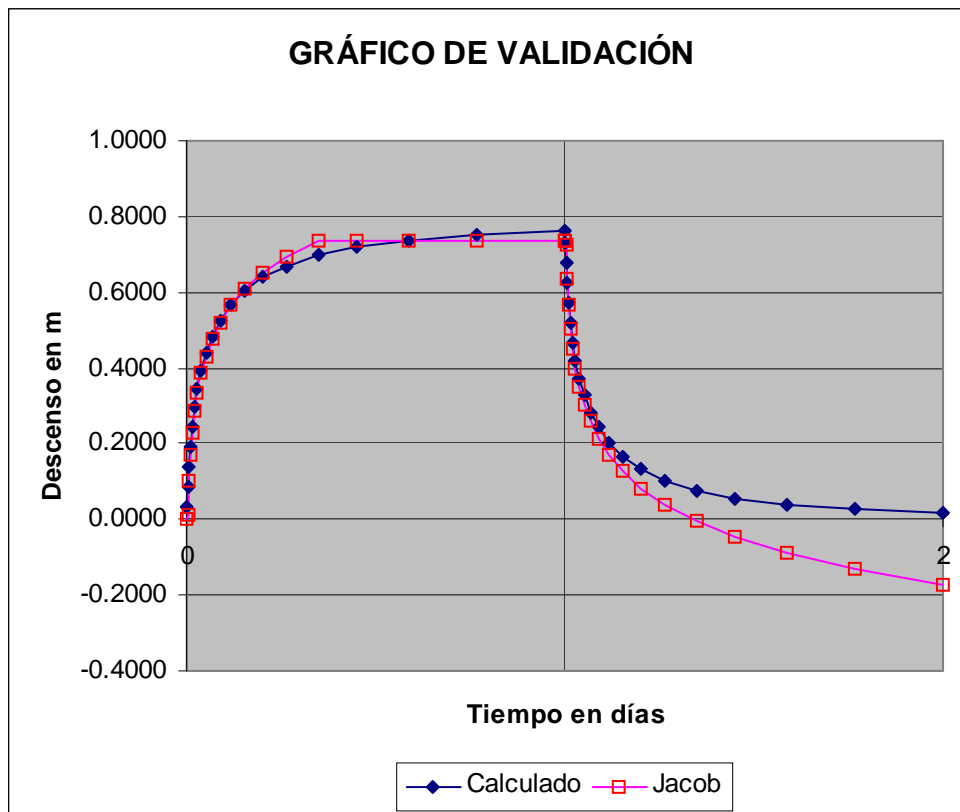
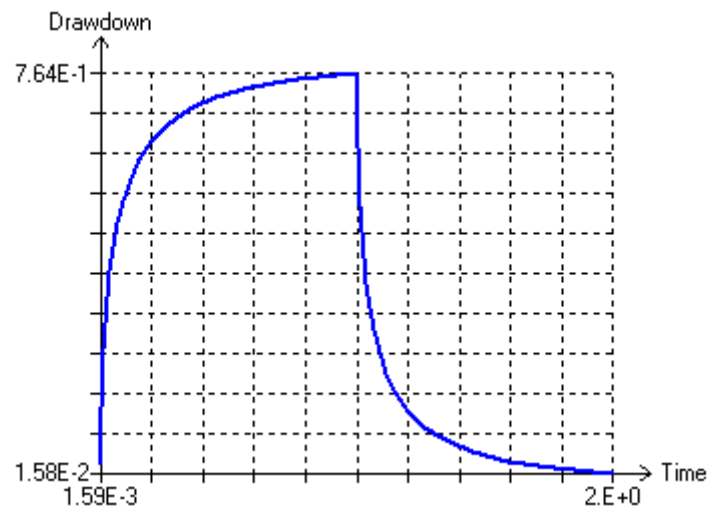


Figura 11. Grafico. En escala métrica.



*Figura 12. Grafico. Descensos Modflow.*

Se observa las discrepancias propias de los periodos de no validez de Jacob al inicio del ensayo y posteriormente cuando entra en contacto con la barrera positiva, una vez superados estos periodos de no validez, los valores obtenidos por el modelo se ajustan a los valores de la “serie de datos reales” que no es otra que la de Jacob modificada por el método de las imágenes.

**Por lo que el modelo para el caso de “Barrera Positiva o Recargas Laterales” queda validado.**

### 5.2.2 Bombeo a caudal crítico.

Se procedió a la validación de las células para el caso de que exista un bombeo a caudal crítico. Dicha validación se efectuó con parando resultados del inverso de los caudales del modelo propuesto enfrentados al inverso de los caudales obtenidos de la “serie de datos reales” que se obtienen de Jacob.

Estos casos suceden cuando la bomba da caudales superiores a los que suministra la captación. Por lo que el nivel de captación desciende hasta el nivel de la bomba, permaneciendo constante en ese punto. Al alcanzado este punto es el caudal el que empieza a disminuir por lo que será el objeto de nuestra investigación a diferencia de los casos estudiados anteriormente.

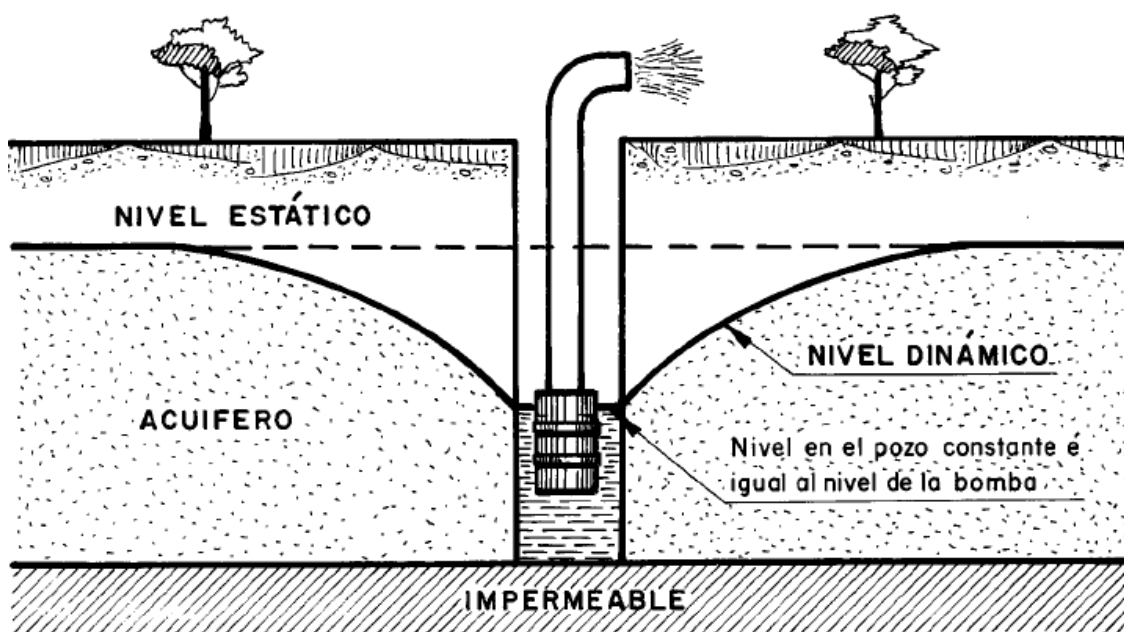


Figura 13. Esquema de los efectos de un bombeo a caudal crítico. (Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.159)

El descenso viene dado por:

$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Por lo que una vez alcanzado el nivel de la bomba “d” no es posible mayores descensos por lo que se despeja el valor de Q que será la variable a calcular.

$$\frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

Esta relación permite observar las variaciones del caudal en función del tiempo.

## Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.

Se ha simulado en el pozo una conductividad hidráulica de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{d}$  y un nivel piezométrico constante de 120 m frente a los 150 m del resto de las celdas del modelo, y para verificar en la investigación que este pozo se mantiene a nivel constante se ubica un piezómetro en el pozo del que se extraen los datos que confirman tal hipótesis.

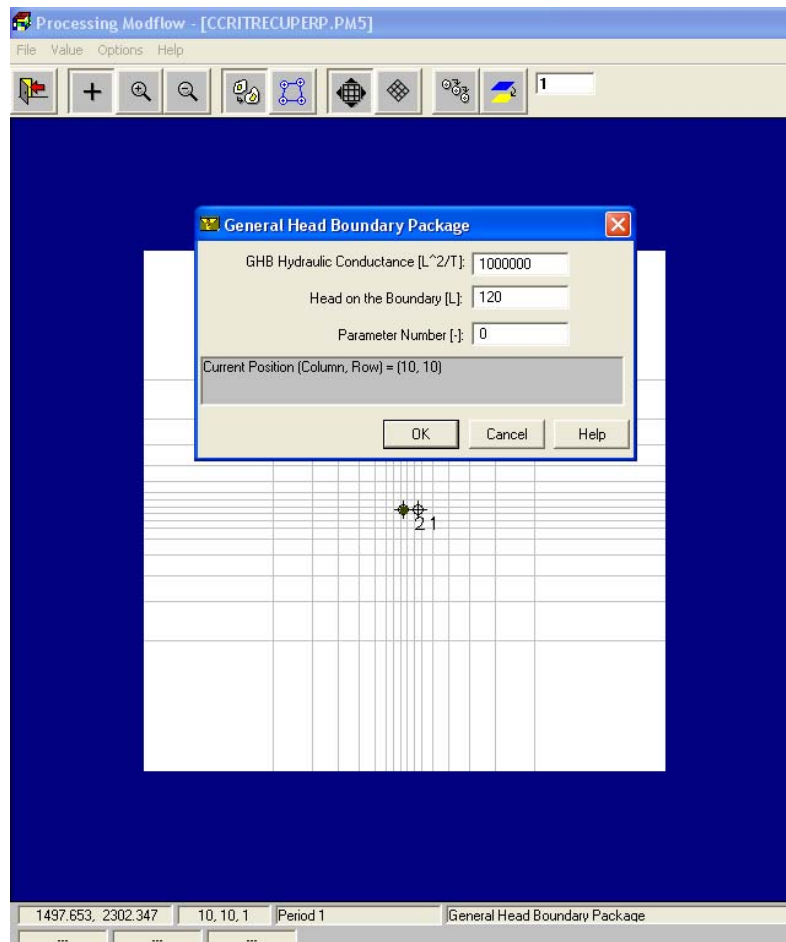


Figura 14. Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio en ensayos de bombeo a caudal crítico.

## Validación.

Se ejecutó el modelo una vez introducido los datos propios de bombeo a caudal crítico y los datos sobre variación de caudal obtenidos del modelo se volcaron en una base de datos (hoja de Excel) donde han sido cotejados con la “serie de datos reales” de variación de caudal la cual no es otra que la serie analítica de Jacob de la cual se ha despejado el valor del caudal.

$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2S} \qquad \frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

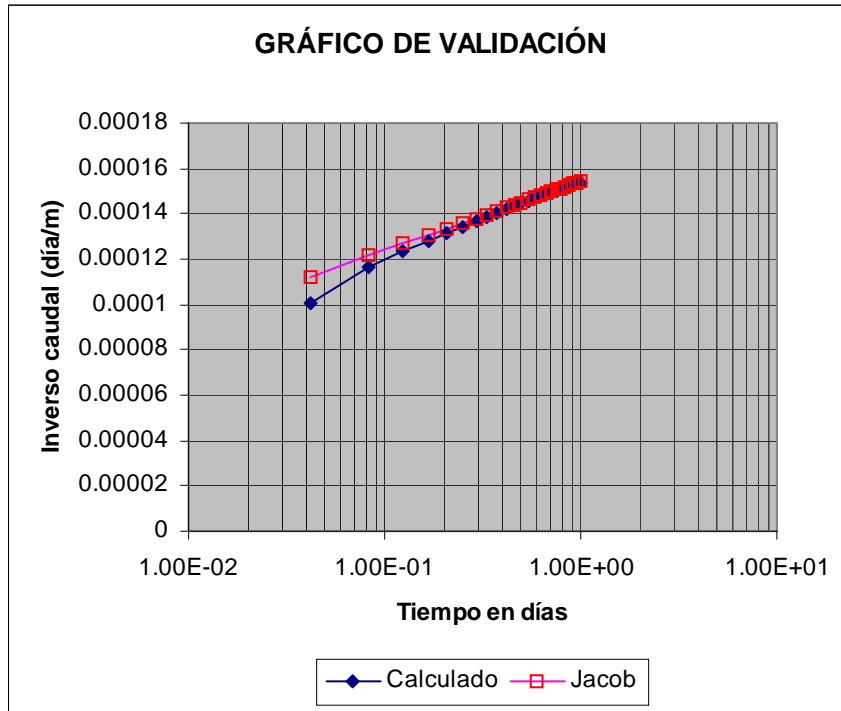


Figura 15 .Gráfico. Inversa del caudal en Bombeo a caudal crítico

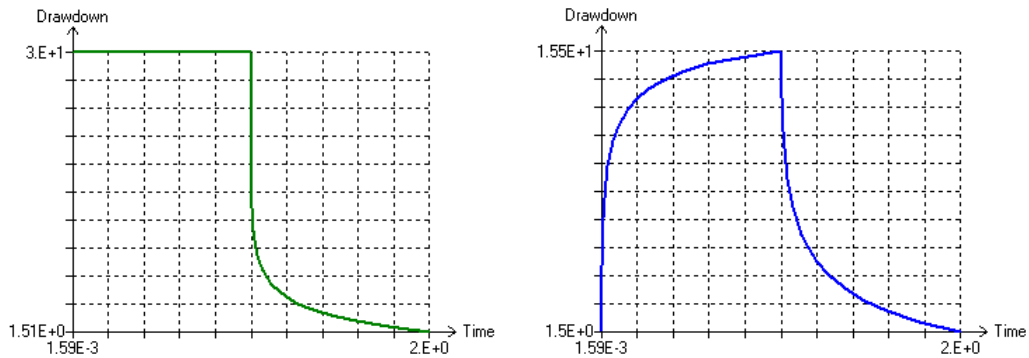


Figura 16. Descensos en el pozo y descenso en el piezómetro. Gráficos de Modflow.

En las curvas de los gráficos se observa que los primeros resultados no se ajustan ello es debido a que nos encontramos en el periodo de no validez, posteriormente los valores del inverso del caudal se ajustan a los valores de la “serie de datos reales” calculados por el modelo.

**Por lo que el modelo para el caso de “Bombeo a Caudal Crítico” queda validado.**

## 6 DISEÑO DE METODOS PARA INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.

Una vez validado el modelo, se va a realizar una serie de simulaciones, tomando una serie de valores en los parámetros hidrogeológicos, y poder ver cual es su variación en función de dichos parámetros, como afectan y las consecuencias que se pueden obtener de ello.

Los datos que se van a emplear resultan de una combinación de valores de Transmisividad (T), y de coeficiente de almacenamiento (S). Los valores de T serán 0.5, 1, 2, 4, 100, 200, y 400 y de S entre 0.001, 0.0001 y 0.0005. Se ha decidido incluir valores de T que no sean propios de medios de baja permeabilidad y así poder observar los efectos de dichas variaciones. De esta combinación se obtienen veintiuna simulaciones que se agrupan en función de la Transmisividad.

Estas simulaciones se pueden agrupar en medios de baja permeabilidad y en medios de alta permeabilidad. El objetivo del estudio se centra en los medios de baja permeabilidad, y se simulan los de alta permeabilidad solo para efectos de contraste.

Medios de baja permeabilidad ( $T < 5 \text{ m}^2/\text{día}$ )

<i>T</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
0.5	0.001	1	0.001	2	0.001	4	0.001
0.5	0.0001	1	0.0001	2	0.0001	4	0.0001
0.5	0.0005	1	0.0005	2	0.0005	4	0.0005

Medios de alta permeabilidad ( $T > 5 \text{ m}^2/\text{día}$ )

<i>T</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
100	0.001	200	0.001	400	0.001
100	0.0001	200	0.0001	400	0.0001
100	0.0005	200	0.0005	400	0.0005

De esta forma se simulan un total de veintidós casos, cuyos resultados son comparados en una tabla de Excel, que se muestra en el Anexo 2

En este anexo se ha incluido el descenso en el pozo de forma que se aprecie el efecto del caudal crítico, este efecto se traduce en un nivel piezométrico constante en el pozo y un caudal variable en la bomba.

Al realizar todas las simulaciones se obtienen un total de 21 curvas de descenso-recuperación, pero al representarlas solo nos aparecen 16, estudiando los datos reflejados en la tabla del anexo 2, se observa que hay determinadas simulaciones en las que los datos de descenso y recuperación, son casi iguales, entrando dentro de la tolerancia a fallos de la simulación.

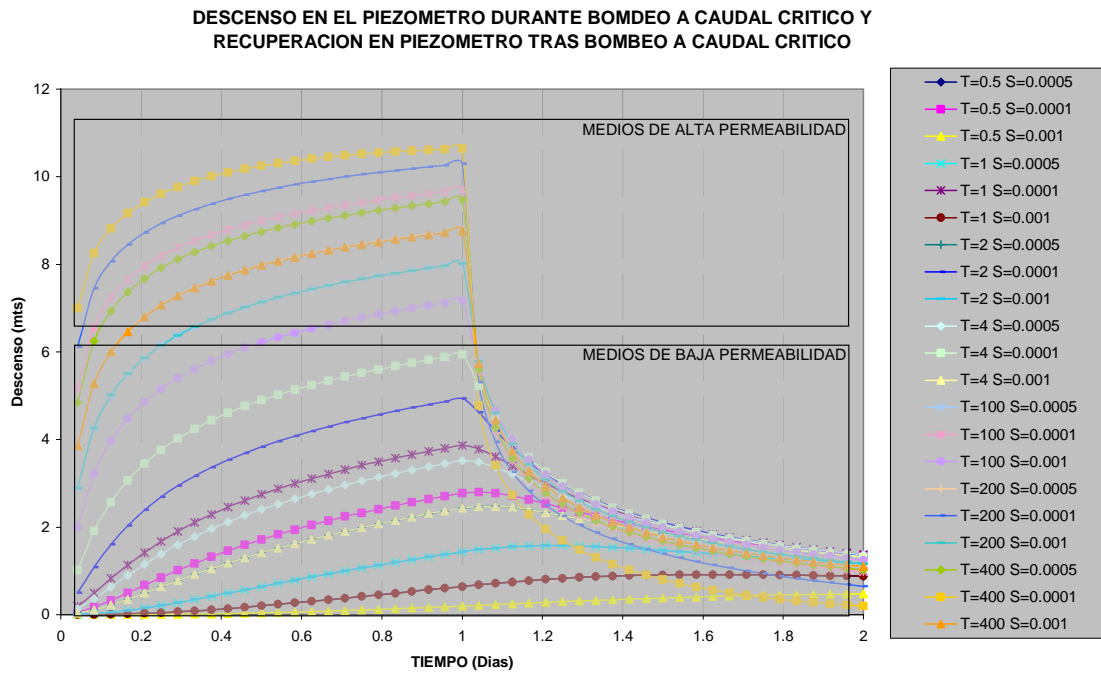


Figura 17. Descensos y recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, con diferentes transmisividades y coeficientes de almacenamiento

En la figura 17 se observa los efectos de los diferentes valores de Transmisividad y Coeficiente de almacenamiento y su influencia en los descensos y recuperaciones. Habiendo una clara separación entre las simulaciones de alta permeabilidad y las de baja permeabilidad. En la figura 18 se muestran las graficas en medios de baja permeabilidad.

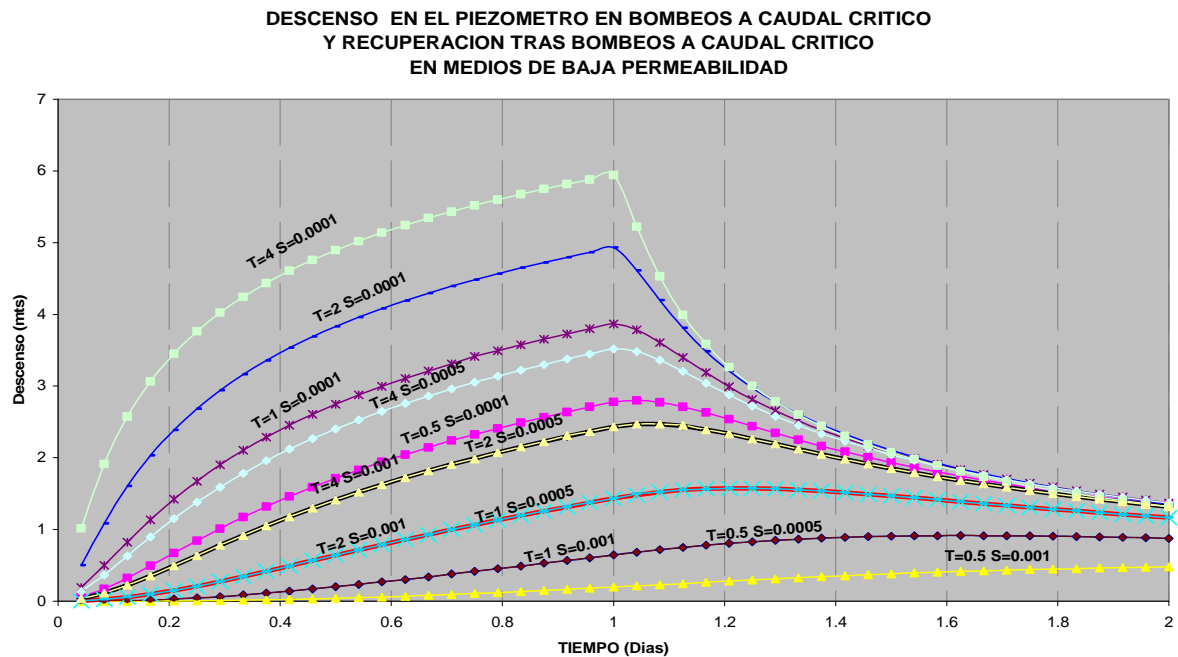


Figura 18. Descensos y recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, con diferentes transmisividades y coeficientes de almacenamiento

Además de esto se observan ciertos fenómenos que los modelos analíticos interpretativos no son capaces de explicar, fenómenos que se detallaran más adelante.

Seria lógico pensar que las graficas se ordenan de mayor a menor transmisividad, pero una inspección mas detallada, demuestra que no es así.

Abordemos ahora el concepto de difusividad (D), entendido como la relación entre la Transmisividad y el Coeficiente de almacenamiento de un acuífero, si ahora se representan los datos de las simulaciones en función de este valor.

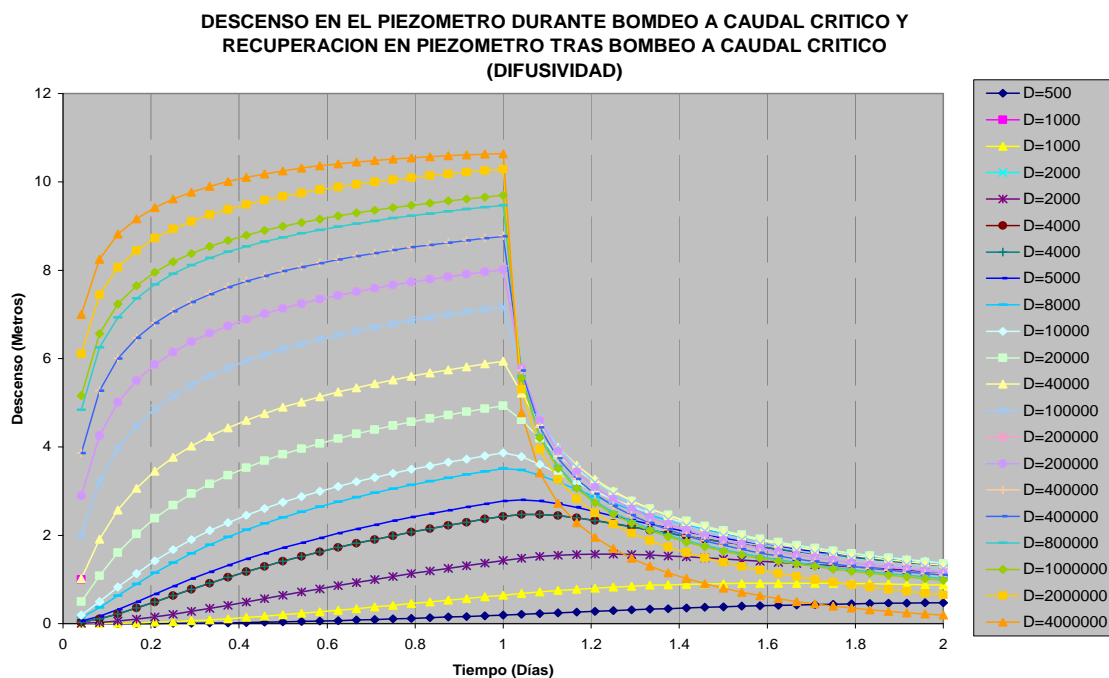


Figura 19 Descensos y recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, en función de la difusividad.

En la figura 19 siguen faltado curvas, pero si se observan los valores de la leyenda se ve como hay valores de difusividad que coinciden, y son las graficas de difusividad igual las que se sobreponen, dejando visible solo una de ellas.

Habiendo dejado claro ya la primera de los fenómenos se procederá a analizar el segundo fenómeno, esta es el desplazamiento de punto máximo de descenso de nivel piezometrico, fuera del intervalo de tiempo fijado para el bombeo, es decir el nivel piezometrico sigue descendiendo aunque la causa que lo produce haya cesado.

Este fenómeno se produce en los medios de baja permeabilidad. En la figura 21 queda mas patente aun este fenómeno. El fenómeno es debido a la inercia del sistema agua-formación acuífera, entendida como una resistencia del mismo a variar su estado de reposo, en este caso la variación se produce en su nivel piezometrico. Como es lógico se esta estudiando el movimiento de una masa en un medio, por lo cual se dan fenómenos que se pueden asociar los fenómenos de la mecánica clásica.



Esta inercia se deduce que es función de la Transmisividad, y del coeficiente de almacenamiento, y por ende de la porosidad.

**DESCENSO EN EL PIEZÓMETRO EN BOMBEO A CAUDAL CRITICO Y RECUPERACIÓN TRAS BOMBEO A CAUDAL CRITICO EN MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD**

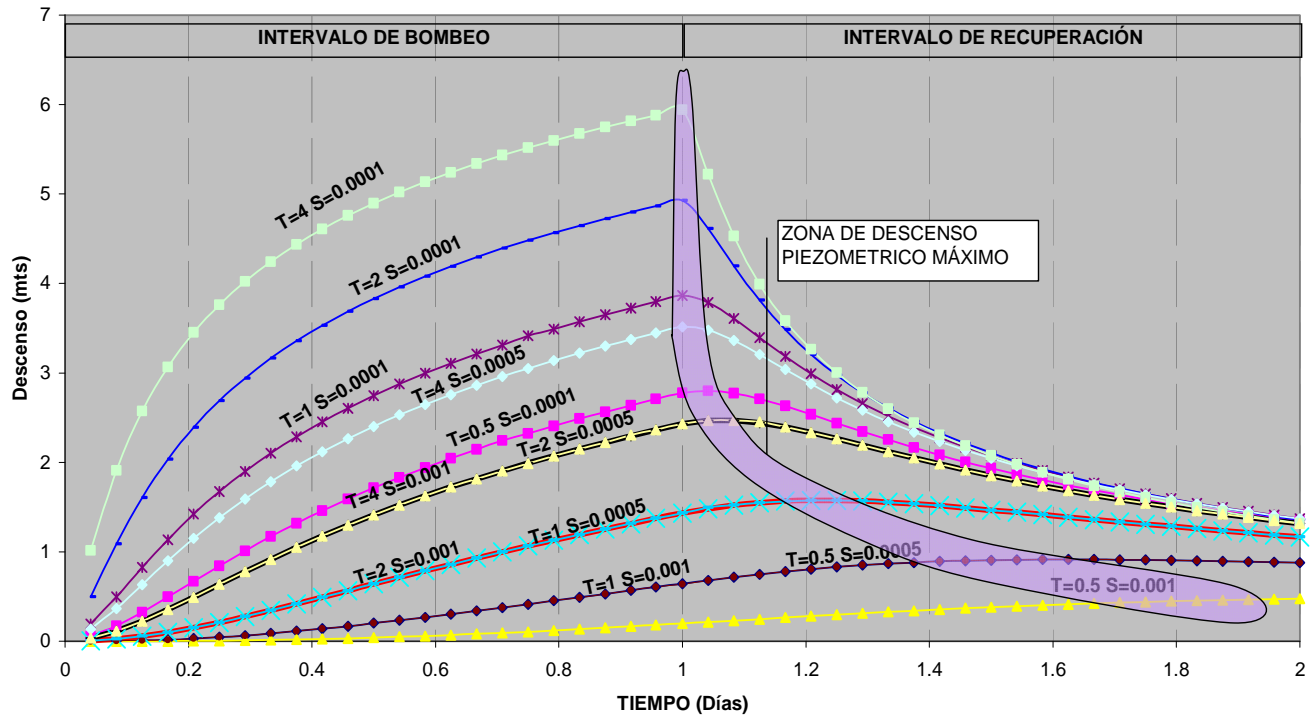


Figura 20. Descensos en un piezómetro durante bombeo a caudal crítico y recuperación tras bombeo a caudal crítico en formaciones de baja permeabilidad.

Una vez analizados estos dos fenómenos podremos entender los datos que la simulación nos da sin la confusión que originarían los fenómenos de la difusividad o de la inercia.

**6.1 Descenso en piezómetro frente a bombeo a caudal crítico**

Las gráficas que se obtienen son similares a las que aparecen en la figura 20 y 21 según sean las escalas logarítmicas o lineales.

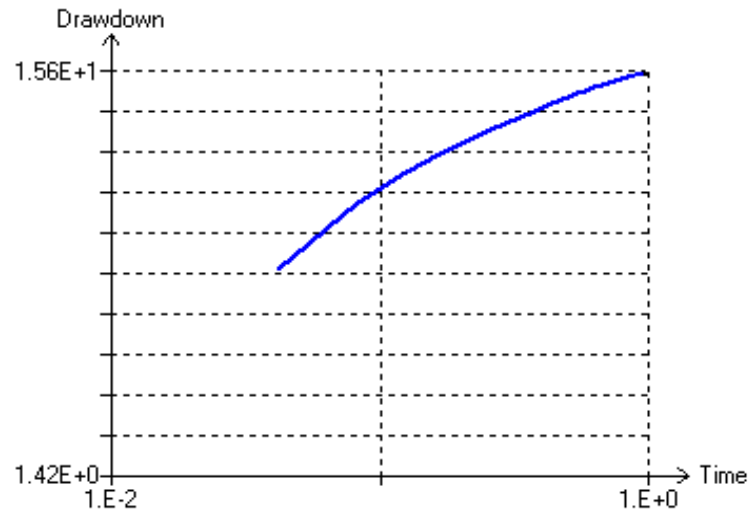


Figura 20 Gráfico típico semilogarítmico correspondiente a la curva de descensos en piezómetro previo a la recuperación

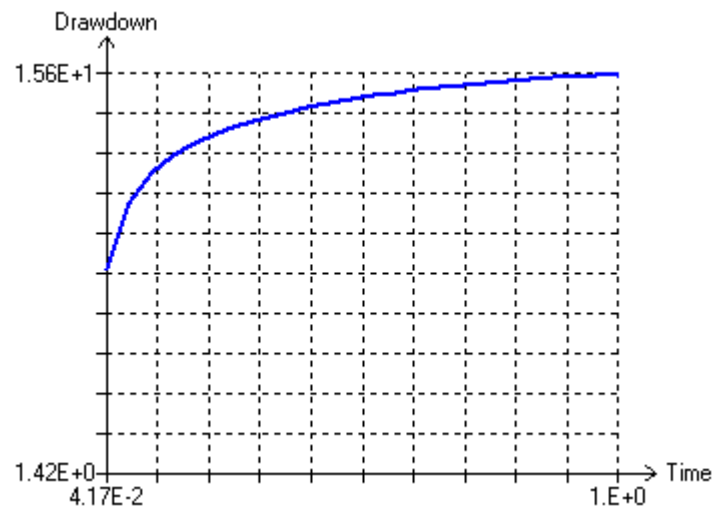


Figura 21 Gráfico típico métrico correspondiente a la curva de descensos en piezómetro previo a la recuperación

Así pues se procede a analizar el descenso en el piezómetro. Estos descensos son los observados en las simulaciones de acuíferos de baja permeabilidad, y servirán para cotejar los descensos observados en un bombeo real, para ello se hace imprescindible conocer tres datos de campo, el caudal obtenido a lo largo del tiempo de bombeo, los niveles piezométricos del piezómetro largo del tiempo en el bombeo, y el descenso observado en el pozo, que en el caso de caudal crítico, es la profundidad de la bomba. Con estos datos se procede de la forma siguiente:

- Comparación de los datos reales de descenso en el piezómetro, con los datos obtenidos en la simulación, esta comparación se realiza en las gráficas de descenso en función de la Difusividad (mejor opción), o en las gráficas de descenso según T y S. Una vez comparados, se obtiene una referencia de los valores aproximados de T y S o de la Difusividad, y a partir de estos realizamos simulaciones con valores arbitrarios de T y S,

hasta conseguir que la grafica simulada, sea igual a la grafica real. Destacar que solo es valido el valor arbitrario de la Difusividad, nunca los valores de T y S introducidos de forma arbitraria.

- Con el caudal obtenido del pozo podemos obtener la Transmisividad según la formula

$$\frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

ya que se conoce también el descenso en el pozo al ser este constante, y conocido. (Profundidad de la bomba)

- Conocida la difusividad, y la Transmisividad, la obtención del coeficiente de almacenamiento, es trivial, teniendo así los datos reales de T y S en el sistema agua-acuífero.

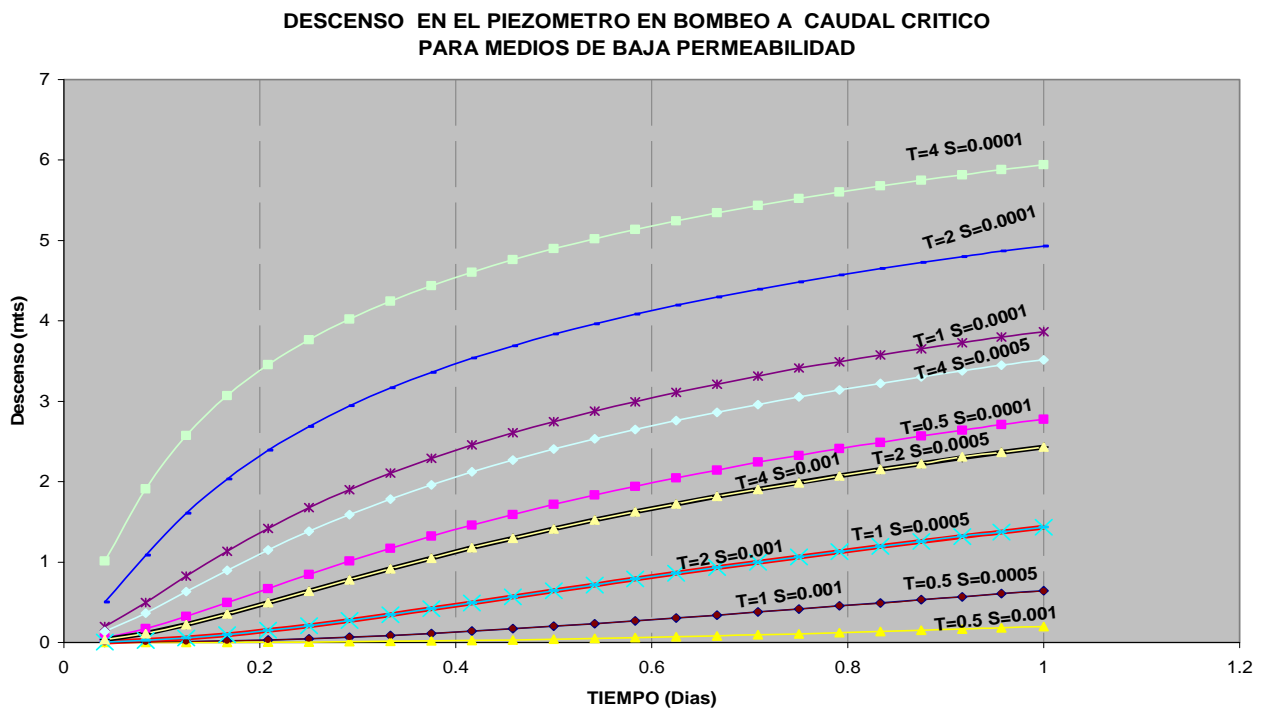


Figura 22. Descensos en un piezómetro durante bombeo a caudal crítico, en formaciones de baja permeabilidad.

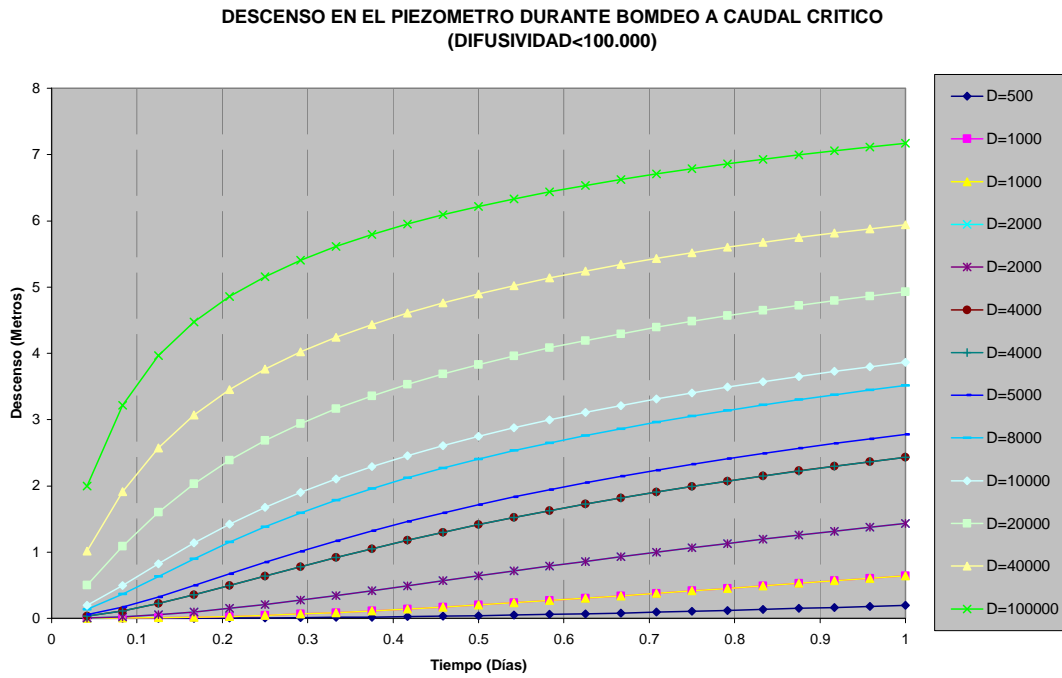
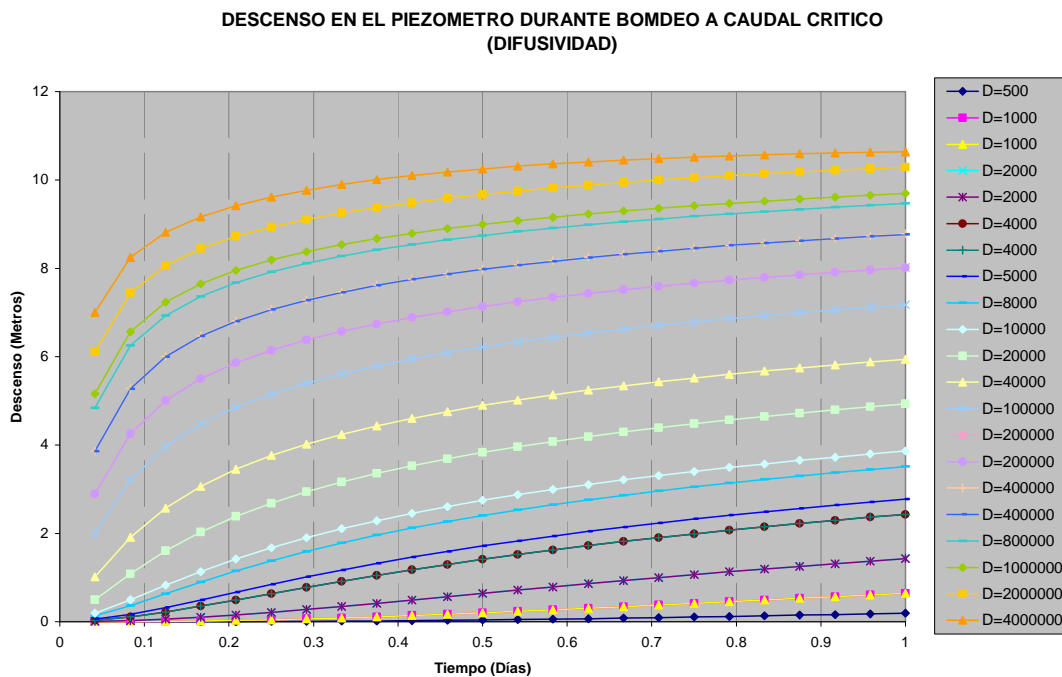


Figura 23. Descensos en un piezómetro durante bombeo a caudal crítico, en formaciones de baja permeabilidad., en función de difusividad.



*Figura 24. Descensos en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, en formaciones de baja permeabilidad., en función de difusividad.*

## 6.2 Recuperación de nivel en piezómetro frente a bombeo caudal crítico.

Para la recuperación del nivel podemos utilizar dos métodos, uno más expeditivo que otro, aunque válidos los dos.

En el primer método, necesitamos conocer los siguientes datos de campo del ensayo o bombeo, el caudal total obtenido en el periodo de bombeo, el nivel piezométrico del pozo, que en el caso del estudio es el descenso que experimenta la bomba desde el momento inicial hasta que finaliza el periodo de bombeo, y los niveles registrados en el piezómetro, durante el intervalo de recuperación. Con estos datos se procede de igual forma que en el caso de descenso en el piezómetro.

- Comparación de los datos reales de recuperación en el piezómetro, con los datos obtenidos en la simulación, esta comparación se realiza en las graficas de descenso en función de la Difusividad (mejor opción), o en las graficas de recuperación según T y S. Una vez comparados, se obtiene una referencia de los valores aproximados de T y S o de la Difusividad, y a partir de estos realizamos simulaciones con valores arbitrarios de T y S, hasta conseguir que la grafica simulada, sea igual a la grafica real. Destacar que solo es válido el valor arbitrario de la Difusividad, nunca los valores de T y S introducidos de forma arbitraria.

- Con el caudal obtenido del pozo podemos obtener la Transmisividad según la formula

$$\frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

ya que se conoce también el descenso en el pozo al ser este constante, y conocido. (Profundidad de la bomba)

- Conocida la difusividad, y la Transmisividad, la obtención del coeficiente de almacenamiento, es trivial, teniendo así los datos reales de T y S en el sistema agua-acuífero.

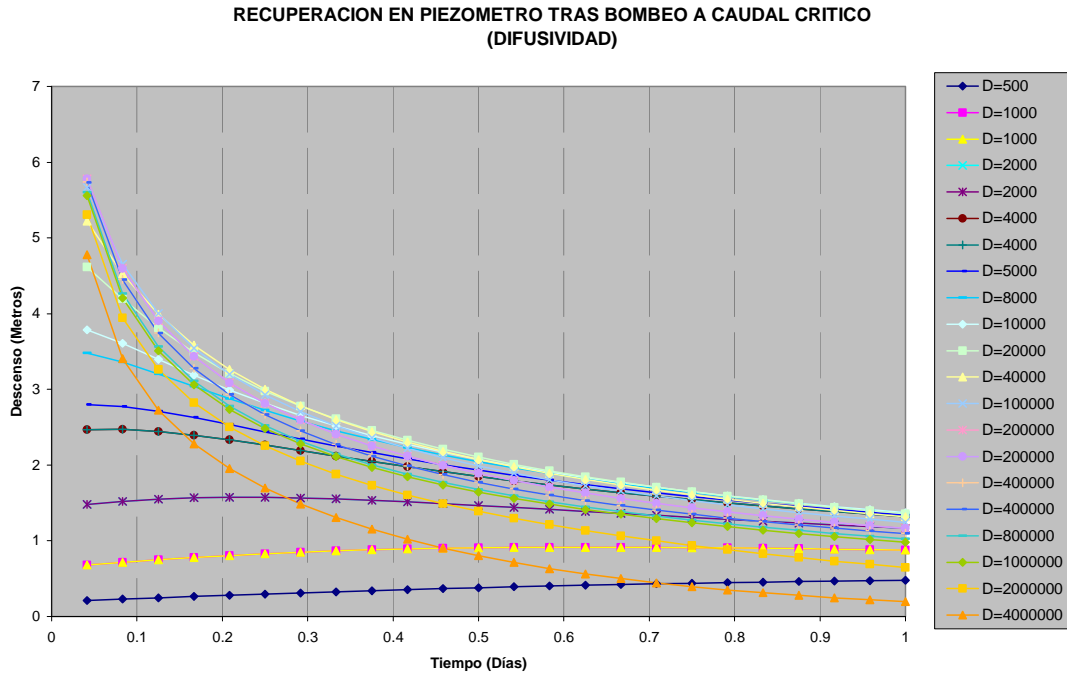


Figura 25. Recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, en función de difusividad

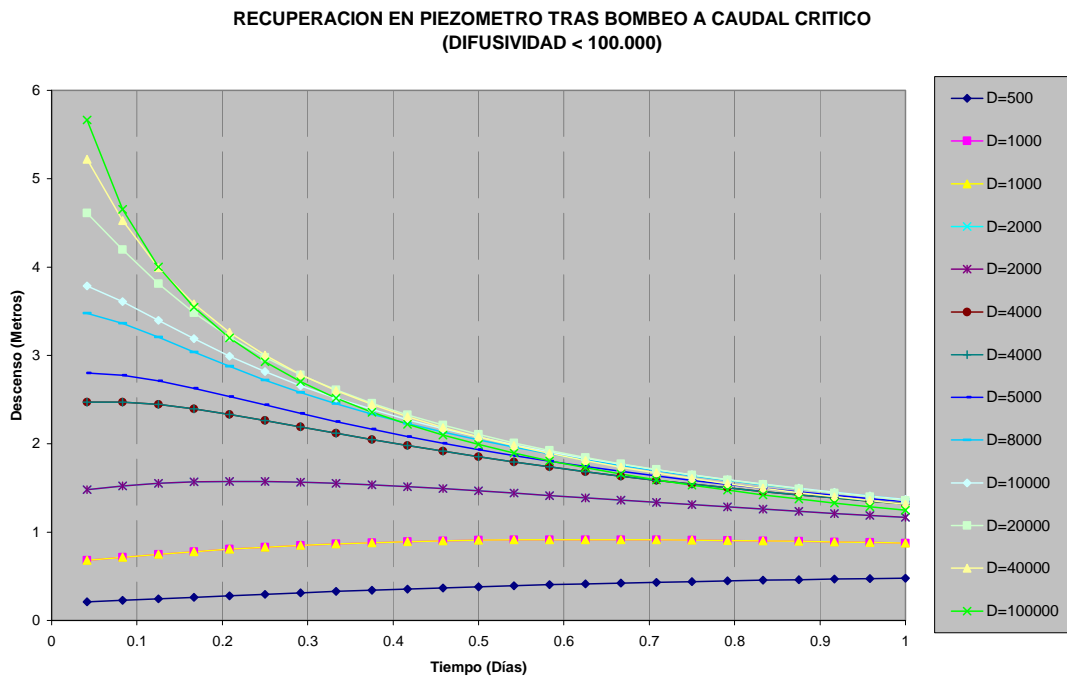


Figura 25. Recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, en formaciones de baja permeabilidad en función de difusividad.

RECUPERACION EN EL PIEZOMETRO DESPUES DE BOMBEO A CAUDAL CRITICO  
PARA MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD

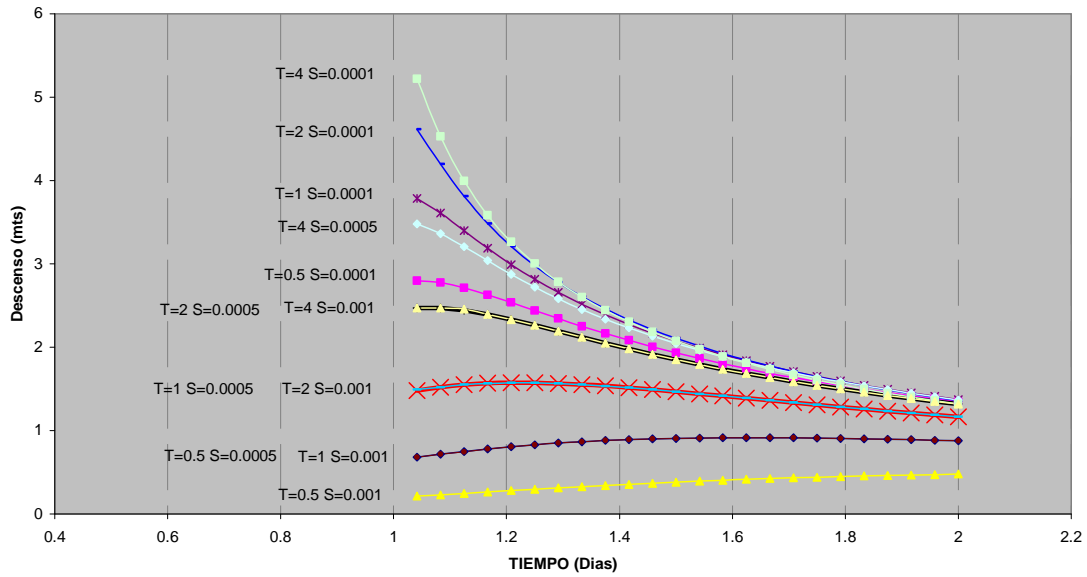


Figura 26. Recuperación en un piezómetro tras bombeo a caudal crítico, en formaciones de baja permeabilidad.

El segundo método, consiste en sustituir el caudal variable a lo largo del periodo de bombeo por el caudal medio ponderado, comprobando previamente que el descenso por intervalo de tiempo en la recuperación, cumple con la condición:

$$d = \frac{0,183Q}{T}$$

Este método queda perfectamente explicado en el trabajo tutelado del Alumno Dº Ignacio Yenes Gallego, el cual ha formado parte de su investigación en la recuperación de niveles en el pozo, después de bombeo a caudal crítico.

## 7 CONCLUSIONES.

Mediante el análisis de descensos y recuperaciones en un piezómetro cuando se ha realizado un bombeo a caudal crítico, es posible la obtención de los valores de T y S del acuífero haciendo uso de los métodos numéricos de simulación y en el caso concreto de esta investigación de la célula diseñada dentro del modelo Modflow.

El método de análisis consiste en tantear de modo ordenado con valores de T y S (guiados por el valor de la difusividad D) y comparar los niveles simulados por el modelo con los valores reales de niveles obtenidos del ensayo en campo hasta lograr una coincidencia asumible. En tal caso los valores de T y S utilizados en la correspondiente pasada de simulación podrán ser tomados como una aproximación de los valores de la formación.

No existían en la literatura científica métodos analíticos que resolvieran el caso de obtener los valores de T y S analizando los descensos y recuperaciones en piezómetros con bombeos a caudal críticos. Sólo era posible la obtención de la T por evolución de caudales en el pozo durante el bombeo y por evolución de niveles en ascenso en la recuperación, también dentro del pozo. Se entiende que en esta investigación se hace una propuesta metodológica nueva para la resolución de este caso de ensayo de bombeo principalmente aplicado a medios de baja permeabilidad, cuyo nivel de éxito y utilidad se podrá definir a medida que se pruebe en campo dicho método.

Se entiende que queda abierta una línea de investigación para la interpretación de ensayos de bombeo por métodos numérico-interpretativos, ampliando así la rica gama existente de métodos analítico-interpretativos.



## BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

ARLEN W HARBAUGH, EDWARD R. BANTA, MARY C. HILL, AND MICHAEL G. MACDONALD. Moddflow-2000, The U.S. Geological survey modular ground – water model – User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, US. Geological Survey Open File Report 00-92.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. 2359 páginas.

DAVIS, S. N. y R. J. M. DE WIELST. 1966. Hydrogeology. Versión en castellano: Hidrogeología, Ediciones Ariel, Barcelona, 1971. 563 pp.

GONZALEZ DE VALLEJO LUIS I. Ingeniería Geológica, Ed. Prentice Hall, Capítulo 5 Hidrogeología, Alfredo Iglesias.

HANTUSH, M.S. 1964. Hydraulics of Wells. In: V.T. Chow (ed.), advances in Hydroscience I; 281-432. Academic Press, New York, London.

IGLESIAS LOPEZ, A. 2006. Apuntes del curso de hidrodinámica subterránea y su aplicabilidad en los estudios de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas. IGME, formación continua. Alfredo Iglesias. Abril de 2006

IGLESIAS LOPEZ, A. 1976. Informe - resumen sobre los ensayos de bombeo realizados por el Instituto Geológico y Minero de España en Baleares. Informe interno IGME. 133 ensayos en Mallorca, 64 ensayos en Ibiza, 42 en Menorca.

IGLESIAS LOPEZ, A. 1977. Métodos teórico - prácticos para la realización de ensayos de bombeo. Apuntes del Curso de Hidrogeología "Noel Llopis".

IGLESIAS LOPEZ, A. 1986. La interpretación de los ensayos de bombeo en los pozos del territorio detrítico de Madrid. Jornadas sobre la explotación de las Aguas Subterráneas en la Comunidad de Madrid. (Ponencia) PIAM nº 12. Comunidad de Madrid. Canal de Isabel II. Páginas. 185-207.

IGLESIAS LOPEZ, A y VILLANUEVA M. M. 1988. Diseño de un método para la selección de rejillas y macizos de gravas. Boletín Geológico y Minero. T. XCIX-I. Páginas 120-124.

JACOB, C.E. 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Am. Geophys. Union Trans. 72:574-586, parte II.

JACOB, C.E. y S.W. LOHMAN. 1952. Non-steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Am. Geophys. Union Trans. 33:559-569.

LOPEZ-CAMACHO, B. y LOPEZ GARCIA, J. 1976. Métodos de ordenador para la evaluación de recursos hidráulicos subterráneos. Servicio Geológico, MOPU. Boletín 141, 127 pp. Es traducción de "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation" de PRICKETT, T.A. y LOONQUIST, C.G. Illinois State Water Survey. 1971.

PEREZ FRANCO, D. 1982. Hidráulica Subterránea. Ed. Científico Técnica. Ciudad La Habana. 424 páginas.

PRICKETT, T.A. y LOONQUIST, C. G. 1971. Selected digital computer techniques for ground-water resources evaluation. Illinois State Water Survey Bull. 55. Urbana, 1971, 62 páginas.

THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union. Vol.16, páginas 519-524.

TRESCOOTT, P.C., PINDER, G. F. y LARSON, S.P. 1976. Finite-Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions with Results of Numerical Experiments. (U.S. Geol. Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 7, Chapter C1.), 116 páginas.

TRESCOOTT, P.C. y LARSON S.P. 1977. Solution to Three-Dimensional Groundwater Flow Equations Using the Strongly Implicit Procedure. Journal of Hydrology, 35: 49-60.

VILLANUEVA MARTINEZ, M. e IGLESIAS LOPEZ, A. 1984. Pozos y Acuíferos Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. ITGE. 426 páginas.

THIEM, G. 1906. Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, 56 p.

WANG H.F & ANDERSON, M.P. Introduction to Groundwater Modeling, Freeman, San Francisco, 237pp, 1982.

WEN-NSING, W OLFANG KI NZELBACH. Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Diciembre 1998.

