

**ABATIMIENTO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO EN
UN ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE ZANJAS
DRENANTES. COMPARACIÓN ENTRE
SOLUCIÓN ANALÍTICA Y SOLUCIÓN NUMÉRICA
MEDIANTE MODFLOW.**

ALUMNO: JOSE ANTONIO CONTRERAS JIMÉNEZ

DIRECTOR: IVÁN ALHAMA MANTECA

...a mi padre

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias principalmente a mi padre, que aunque hace ya unos meses que se fue, sé que me ha dado la fuerza necesaria para superar su pérdida y poder realizar este trabajo y terminar el Grado en Ingeniería Civil.

Además quiero agradecer al director de este trabajo, Iván Alhama, por el tiempo dedicado y por la gran ayuda que me ha ofrecido en todos los problemas que han surgido durante la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS Y ALCANCE	2
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. El agua en el medio poroso. Definición de acuífero y parámetros fundamentales.	3
2.2. Piezometría.	8
2.3. La ley de Darcy.	10
2.4. Ecuación general de flujo: Ecuación de Laplace y ecuación de Poisson.....	12
2.5. Resolución analítica para el diseño de abatimientos mediante zanjas.	17
3. PROGRAMA MODFLOW.....	20
3.1. Descripción general del programa.	20
3.2. Interfaz de comunicación con Modflow: Visual Modflow Premium v.4.2 23	
3.2.1. Introducción de datos (Input).	23
3.2.2. Proceso de simulación (<i>Run</i>).....	24
3.2.3. Visualización de los resultados (<i>Output</i>).....	24
4. APLICACIONES.....	25
4.1. Resolución analítica.	26
4.2. Resolución numérica.....	27
4.2.1. Creación del modelo (<i>Input</i>).	27
4.2.2. Simulación del modelo (<i>Run</i>).....	39
4.2.3. Visualización de resultados (<i>Output</i>).	42
4.2.4. Visualización del modelo en 3D.....	51
4.3. Comparación entre solución analítica y numérica. Discusión de los resultados obtenidos.....	57
5. CONCLUSIONES	65
6. REFERENCIAS.....	66

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se aborda un problema de abatimiento del nivel freático de un acuífero libre mediante el empleo tanto de un método analítico como de un método numérico, realizando una posterior comparación entre ambas soluciones obtenidas. La estructura del documento describe, en primer lugar, los fundamentos y conceptos teóricos del flujo de agua en medios porosos y la solución analítica del problema a resolver. Posteriormente, se realiza una descripción breve del programa Modflow (Langevin et al, 2003), una herramienta numérica utilizada para la resolución de las ecuaciones de gobierno, y del entorno de ventanas de la interfaz *Visual Modflow Professional*, versión 4.2 (www.waterloohydrogeologic.com) que es el software utilizado para obtener la solución numérica. Finalmente se plantea un problema y se aborda la solución analítica y numérica, comentando y comparando los resultados obtenidos.

El interés de este trabajo reside en que se afronta un campo fundamental en ingeniería del terreno, como es la presencia de agua en el suelo, desde el punto de vista de los métodos numéricos. Estas técnicas se han convertido hoy día en una herramienta que facilita la labor del experto en geotecnia. En concreto, el empleo de métodos numéricos para la resolución de problemas de flujo en medios porosos es, en ocasiones, exigido en los pliegos de prescripciones técnicas de obras de cierta relevancia ofertadas por organismos públicos.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

1. OBJETIVOS Y ALCANCE

Este proyecto específico tiene por finalidad principal la familiarización con el manejo del software *Visual Modflow Professional* versión 4.2. Este programa permite la resolución numérica de problemas de flujo de agua subterránea en medios porosos y su aplicación a problemas de geotecnia, como es el de la filtración.

El caso de estudio planteado en este trabajo permitirá, como objetivo secundario, adquirir las técnicas, ya sean analíticas o numéricas, para el diseño de un abatimiento del nivel freático para una excavación. La comparación de los resultados aportará una visión profunda del problema y de las técnicas de resolución.

Además, la revisión de los aspectos teóricos del flujo de agua en medios porosos pondrá al alumno en disposición de controlar y entender los parámetros que se introducen en el *Input* de Modflow e interpretar los resultados del *Output* del mismo.

Pese a la simplificación del escenario planteado, se adquirirán los conocimientos básicos necesarios para abordar problemas más complejos, como pueda ser el de acuíferos multicapa, heterogéneos o confinados.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. El agua en el medio poroso. Definición de acuífero y parámetros fundamentales.

Se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica subterránea que es capaz de almacenar agua y de transmitirla (del latín aqua = agua y fero = llevar). Un acuífero se forma cuando el agua existente en superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con un estrato impermeable sobre el que empieza a acumularse llenando los poros y fisuras existentes. Esta situación da lugar a una zona de saturación, es decir, una zona donde los poros están ocupados totalmente por agua. El agua subterránea puede brotar de manera natural formando manantiales o fuentes, o bien puede ser extraída mediante distintos sistemas de captación. El hombre puede aprovechar el agua de los acuíferos para subvenir sus necesidades.

Las características de un acuífero son fundamentalmente tres: la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reservas y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema.

En función del comportamiento hidráulico del agua, los acuíferos pueden ser clasificados en:

- **Acuíferos libres:** aquellos en los que el nivel de agua no está limitado superiormente por un techo impermeable, de forma que existe un nivel freático a una cierta profundidad. En el momento en el que una perforación alcanza este nivel aparece un cierto volumen de agua libre. Estos acuíferos se pueden recargar, como se ha comentado anteriormente, a partir del agua superficial mediante una fracción de la pluviometría o excedentes de riego. (Figura 2.1)
- **Acuíferos confinados:** aquellos acuíferos que están limitados superiormente por un techo impermeable, de forma que el agua se encuentra a presiones superiores a la atmosférica en todos los puntos. Cuando una perforación llega al techo del acuífero, el agua asciende rápidamente por el tubo hasta que se estabiliza a una altura correspondiente a su nivel piezométrico. La recarga de este tipo de acuíferos se produce lateralmente. (Figura 2.1)
- **Acuíferos semiconfinados:** aquellos acuíferos de tipo confinado que se diferencian de estos porque están limitados superiormente por un estrato muy poco permeable pero que es capaz de producir la recarga superficial del acuífero. (Figura 2.1)

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

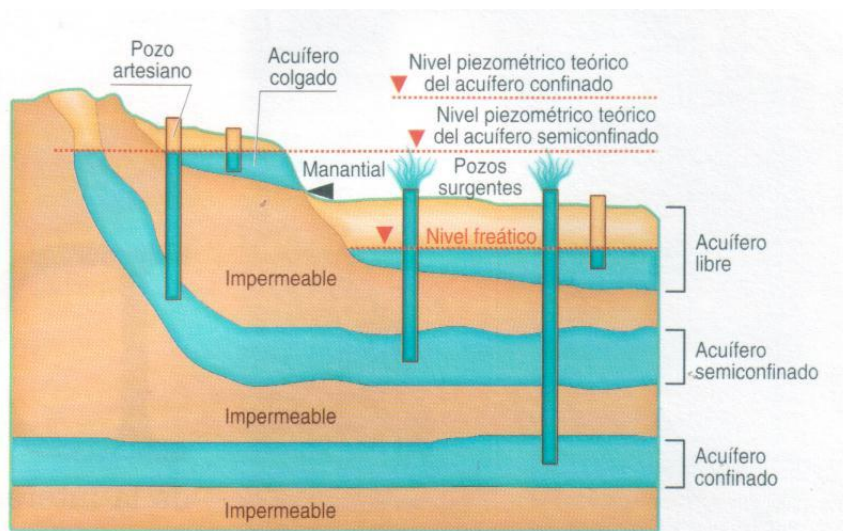


Figura 2.1. Tipos de acuíferos con sus respectivos niveles (Fuente: <http://www.areaciencias.com/ecologia/aguas-subterranas.html>)

La capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrológico. Por ello, se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos en cuanto a su comportamiento respecto al agua que puedan contener y transmitir. Estos cuatro parámetros hidrogeológicos característicos de las formaciones geológicas son:

- **Porosidad:** se define como la relación entre el volumen de huecos (ocupados y/o vacíos) y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional que depende solamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza. Según el tipo de formación, los poros pueden ser debidos a espacios intergranulares o a grietas y fisuras (en el caso de rocas fisuradas o cársticas); el concepto de porosidad puede asociarse a unas y otras. La porosidad de una formación puede estar ligada únicamente a la textura de esta, o bien puede depender además de las características del fluido que se mueve en su interior.

La primera de ellas es la porosidad total n , referida al volumen total de poros, independientemente de que el fluido tenga o no la capacidad de circular entre ellos. Se define como:

$$n = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen total}}$$

El segundo concepto es la porosidad eficaz n_e , también llamada porosidad cinemática, referida al volumen de poros conectados, por los

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

que el transporte de fluido es posible. Esta queda ligada además de a la textura de la formación, también a las características del fluido:

$$n_e = \frac{\text{Volumen de poros conectados}}{\text{Volumen total}}$$

- Coeficiente de almacenamiento:** representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma (Figura 2.2) de base unitaria y de altura igual a la del acuífero, cuando el nivel piezométrico desciende 1 metro. Es un parámetro físico referido al volumen de agua cedido por unidad de volumen de acuífero y que, al igual que la porosidad, es adimensional. La forma en que las formaciones geológicas permeables liberan agua es distinta según su situación en la naturaleza y el estado de sus niveles piezométricos. Así, cabe distinguir formaciones o acuíferos en funcionamiento confinado o acuíferos en funcionamiento libre.

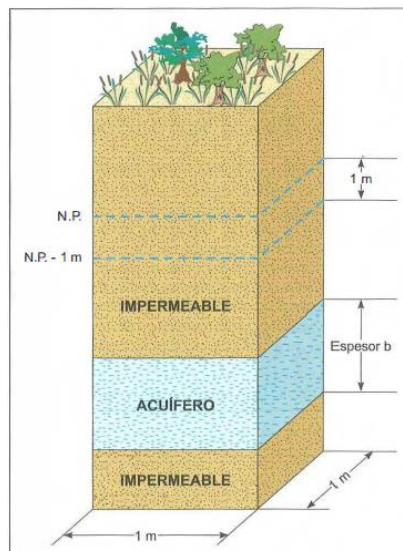


Figura 2.2 Esquema para el cálculo del coeficiente de almacenamiento. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

- Permeabilidad:** Es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de su textura, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Intrínsecamente en este concepto, se encuentran definidos otros dos:

Por un lado, la permeabilidad que está ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, se denomina permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica y se representa por el coeficiente de permeabilidad k .

Por otro lado, la denominada permeabilidad intrínseca, representada como K , es solo dependiente de las características internas de la formación permeable.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Así pues, la permeabilidad efectiva k se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende, en consecuencia, tanto de las características del medio físico (acuífero), como de las del fluido que lo atraviesa (agua). Por razones de su definición (caudal por unidad de superficie), las dimensiones de la permeabilidad efectiva pueden establecerse como:

$$[k] = \frac{L^3 T^{-1}}{L^2} = LT^{-1}$$

Se usan cm/s y m/día como unidades más habituales (m/día se utiliza normalmente en hidrogeología y cm/s en ingeniería).

La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del fluido, pudiendo utilizar las siguientes expresiones:

$$k = K \frac{\gamma}{\mu}$$

O bien:

$$k = K \frac{g}{\eta}$$

Donde:

k = permeabilidad efectiva [LT^{-1}]

K = permeabilidad intrínseca

γ = peso específico del agua [$ML^{-2}T^{-2}$]

μ = viscosidad dinámica del fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]

η = viscosidad cinemática [L^2T^{-1}]

g = aceleración de la gravedad [LT^{-2}]

Y en consecuencia:

$$[K] = \left[k \frac{\mu}{\gamma} \right] = \frac{LT^{-1} * ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-2}T^{-2}} = L^2$$

No ha sido posible encontrar una relación capaz de definir, con carácter generalista, la permeabilidad intrínseca en función del medio, a pesar de los esfuerzos de diversos investigadores. En cualquier caso, no influye solamente el tamaño de las partículas que conforma el medio sino también su forma y superficie, no admitiendo generalización estas dos últimas características. Diversos autores de esta temática han establecido las siguientes relaciones:

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

$$K = c d^2 \quad \rightarrow \quad \text{Hazen.}$$

$$K = c m d^2 \quad \rightarrow \quad \text{Slichter.}$$

$$K = \lambda * \left(\frac{m-0.13}{(1-m)^{1/3}}\right)^2 * d^2 \quad \rightarrow \quad \text{Terzaghi.}$$

La variable d es el denominado diámetro eficaz que, para el caso más general es el d_{10} de la curva granulométrica de la muestra; es decir, el tamaño de abertura de tamiz que permite el paso del 10% en peso de la muestra de material granular. Por su parte, los coeficientes c , m , n y λ dependen de las características geométricas y de fricción de los granos, pudiendo por ello admitirse que para cualquier caso:

$$K = cte * d^2$$

Y por tanto:

$$K = cte * d_{10}^2$$

Esto se da para un mismo fluido a una misma temperatura.

La permeabilidad, al contrario que ocurría con la porosidad, sí depende del tamaño del grano; tal y como se ha visto, del valor d_{10} condiciona el valor de la permeabilidad.

En definitiva, la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva k nos da una idea de la relación existente entre el caudal por unidad de sección y el gradiente hidráulico. A mayor conductividad hidráulica, mayor caudal o menor gradiente hidráulico se precisa para un mismo caudal. Este parámetro guarda relación con otros parámetros que intervienen en otros procesos físicos, como la conductividad eléctrica (inverso de la resistividad) y depende de las características del medio poroso y del fluido.

Por su parte, la permeabilidad intrínseca nos da una idea de las características del terreno, y al medirse en unidades de superficie y tener valores tan bajos, podemos considerarla como “una medida de la superficie del poro”.

- **Transmisividad:** es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta además de la textura del acuífero y características del fluido, las características estructurales o geométricas. Este parámetro, representado por la letra T, se define como el producto de la conductividad hidráulica k y el espesor del acuífero b :

$$T = kb$$

Acuíferos muy permeables pero de bajo espesor pueden no ser aptos para una eficaz transmisión del agua debido a su bajo espesor, y por

tanto estos tienen una baja transmisividad, a pesar de sus excelentes características de textura.

2.2. Piezometría.

El movimiento del agua en las formaciones geológicas se ve condicionado por la capacidad de realizar trabajo de sus partículas elementales, es decir, por su energía. Esta energía depende, en una parte, del campo de fuerzas al que está sometido el fluido y del agente sensible a dicho campo; en otra parte, depende del tipo de energía en sí o forma en que el cuerpo tenga almacenada su capacidad de desarrollar trabajo. Así, los tres tipos de energía que pueden incidir sobre el agua que se mueve en el seno de una formación permeable son las siguientes:

Energía potencial: $Eh = mgz$

Energía cinética: $Ec = \frac{1}{2}mv^2$

Energía de presión: $Ep = pV$

Donde el término g representa la intensidad del campo gravitatorio, m representa la masa o agente sensible al campo gravitatorio, z es la altura respecto a una cota tomada como referencia, v es la velocidad del agua, p es la presión a que está sometido el fluido y V es el volumen.

Por el principio de conservación de la energía, ésta va a permanecer constante a lo largo de una línea de corriente, y por tanto:

$$E = Eh + Ec + Ep = cte$$

O bien:

$$mgz + \frac{1}{2}mv^2 + pV = cte$$

Sacando mg factor común, resulta:

$$mg \left(z + \frac{v^2}{2 * g} + \frac{p}{\rho * g} \right) = cte$$

Siendo ρ la densidad del agua.

Ante un mismo fluido y un mismo campo gravitatorio, el terrestre, se tiene:

$$\left(z + \frac{v^2}{2 * g} + \frac{p}{\rho * g} \right) = cte$$

Que no es más que la expresión del teorema de Bernoulli, en la que todos sus términos tienen dimensiones de longitud como se ve a continuación:

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

$$(z) = L$$
$$\left(\frac{v^2}{2g}\right) = \frac{L^2T^{-2}}{LT^2} = L$$
$$\left(\frac{p}{\rho g}\right) = \frac{MLT^{-2}L^{-2}}{ML^{-3}LT^{-2}} = L$$

En consecuencia de esto, los términos de la ecuación son denominados alturas. Así pues, se tiene:

$z \rightarrow$ **Altura de posición**

$\frac{v^2}{2g} \rightarrow$ **Altura de velocidad**

$\frac{p}{\rho g} \rightarrow$ **Altura de presión**

El término $v^2/2g$ (altura de velocidad) en el caso del movimiento del agua en el seno de un medio permeable puede ser despreciado frente a la altura de presión y la altura de posición, dado lo bajo del valor de la velocidad del agua en dichos medios. Por tanto, la capacidad para realizar trabajo por parte del agua en un punto A de un acuífero vendrá dada por su nivel piezométrico, o suma de las alturas de posición y presión:

$$h_a = z_a + \frac{p_a}{\gamma}$$

Siendo γ el peso específico del agua.

Al nivel piezométrico se le suele denominar también altura piezométrica, cota piezométrica o carga hidráulica. El nivel piezométrico se mantiene constante en la vertical de un almacenamiento de agua libre o en la vertical de un medio permeable saturado cuando éste es homogéneo e isótropo.

Tal y como se ve en la Figura 2.3., el punto A está a presión atmosférica y por tanto su nivel piezométrico, h_a , es igual a la altura de posición z_a . El punto B tiene un nivel piezométrico, h_b , que se quiere comparar con h_a .

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

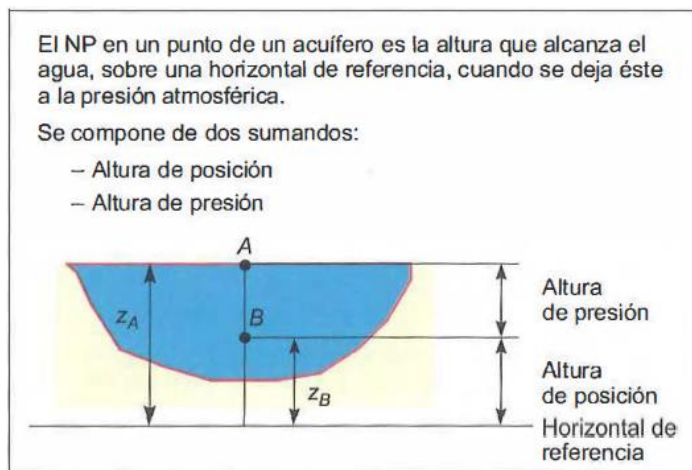


Figura 2.3. Nivel piezométrico y alturas en un acuífero. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

Sea P_b la presión en el punto B y z_b su altura de posición, entonces h_a se define:

$$h_a = z_a$$

Y, por su parte, h_b se define como:

$$h_b = z_b + \frac{P_b}{\gamma} = z_b + \frac{(z_a - z_b) * \gamma}{\gamma} = z_a = h_a$$

Por lo que se puede afirmar que el nivel piezométrico es el mismo en los puntos A y B.

2.3. La ley de Darcy.

La denominada Ley de Darcy fue enunciada por el ingeniero francés Henry Darcy en 1856 tras varios trabajos y experimentaciones. Esta ley establece que el caudal que es capaz de atravesar un medio permeable es proporcional al área de paso normal al flujo de este medio permeable, y es proporcional también al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable. La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio en la que quedan incluidas las características del fluido; la denominada permeabilidad efectiva, conductividad hidráulica o conductividad de Darcy.

En consecuencia y con carácter global, se define como:

$$Q = -kAi$$

donde:

$$Q = \text{Caudal de paso } [L^3T^{-1}]$$

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

k = Permeabilidad de Darcy [LT^{-1}]

A = Área de paso [L^2]

i = Gradiente piezométrico

Como es conocido, el gradiente de un escalar es un vector y queda definido por su módulo, dirección y sentido. El módulo es la derivada direccional de la función escalar; la dirección es la normal a las curvas de nivel de la función escalar; y el sentido es el del aumento en el valor de la función. Al moverse el flujo de zonas de mayor a menor nivel piezométrico la función escalar, el flujo y el gradiente tienen direcciones distintas. Así, se justifica el signo negativo en el segundo término en la expresión de Darcy.

Si llamamos h al nivel piezométrico y x al espacio en el sentido de flujo, la ecuación puede expresarse en forma diferencial considerando la variación de niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por el medio poroso. Queda:

$$Q = -kA \frac{dh}{dx}$$

En la Figura 2.4. se aprecia un experimento en el cual se mantienen constantes los niveles h_a y h_b . Además, al ser k y A constantes para todo el medio permeable, se establece la forma más sencilla de la ecuación de Darcy:

$$Q = kA \frac{h_a - h_b}{L}$$

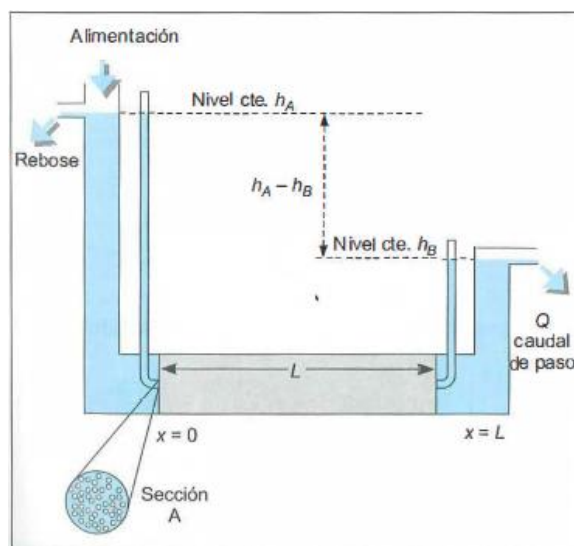


Figura 2.4. Experimento para deducir la ley de Darcy. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

La ley de Darcy solamente es válida para el caso de régimen laminar. Para evaluar si el régimen existente es laminar hay que conocer el valor del

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

denominado Número de Reynolds. Este valor representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido. Se define como:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

donde:

v = Velocidad del fluido

d = Tamaño medio de las partículas, se considera el d_{10} en medios granulares y $2e$ en medios fisurados, siendo e el ancho medio de las fisuras.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad dinámica.

El Número de Reynolds es adimensional. Un valor de este comprendido entre 1 y 10 denota un régimen laminar en el que puede considerarse aplicable la ley de Darcy, aunque es particularmente fiable para valores inferiores a 4. Por su parte, el régimen se manifiesta totalmente turbulento para valores de 60 a 180 del Número de Reynolds. En los valores intermedios el régimen puede ser considerado cuasi-turbulento no siendo aplicable la ley de Darcy en este rango.

2.4. Ecuación general de flujo: Ecuación de Laplace y ecuación de Poisson.

ECUACIÓN DE LAPLACE

La ecuación de Laplace es la primera de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el flujo en medios porosos (permeables en general). Esta ecuación se refiere al flujo en condiciones de régimen permanente y en ausencia de fuentes y sumideros.

Esta ecuación, al igual que todas las ecuaciones del flujo en medios porosos, es resultado de la aplicación conjunta de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy. El flujo se estudia aceptando, de una parte que la masa entrante debe ser igual a la saliente y que ambas, dentro del medio poroso, están condicionadas por los planteamientos de Darcy. De este modo, se tiene la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Y se tiene que:

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Substituyendo, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Si se considera que el medio es homogéneo y también que es isótropo entonces:

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$$

Y por tanto, nos queda la ecuación de Laplace (régimen permanente, medio homogéneo e isótropo, y ausencia de fuentes y sumideros):

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

Hay dos tipos característicos de condiciones de contorno:

- Condiciones de Dirichlet: nivel piezométrico conocido en frontera.
- Condiciones de Neuman: flujo conocido en frontera.

La resolución de la ecuación solo es posible por métodos analíticos en sistemas físicos sencillos, como puede ser el caso de flujo hacia pozos y algunos problemas de flujo entre zanjas. Para casos reales más complejos se debe acudir a métodos aproximados de resolución numérica o a métodos gráficos, como son las redes de flujo.

ECUACIÓN DE POISSON

Como se ha comentado anteriormente, la ecuación de Laplace no integra en sus planteamientos la existencia de fuentes y sumideros. Sin embargo, y aún en problemas de régimen permanente, es preciso incluir bombeos y recargas (fuentes y sumideros) asociados a problemas reales.

La ecuación de Poisson de flujo en medios porosos en régimen permanente puede desarrollarse con la ayuda del esquema de la Figura 2.5., permitiendo la posibilidad de integrar bombeos y recargas.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

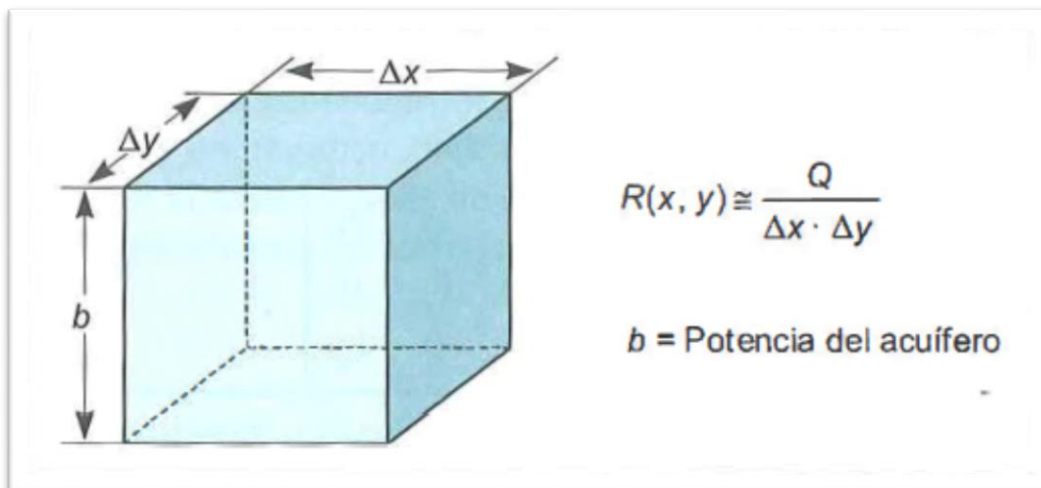


Figura 2.5. Esquema para la deducción de la ecuación de Poisson. Fuente: Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

Se considera una recarga $R(x,y)$ por unidad de área y unidad de tiempo. Aplicando las condiciones de flujo estacionario, se obtiene:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) = \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y) \Delta x \Delta y$$

Aplicando la ley de Darcy con hipótesis de homogeneidad e isotropía:

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$$

y siendo:

$$T = kb$$

se obtiene la ecuación de Poisson en régimen permanente, presencia de fuentes y sumideros, y permeabilidad homogénea e isótropa:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -\frac{R(x, y)}{T}$$

En esta ecuación se tiene:

- Si $R(x,y) = 0 \rightarrow$ Coincidente con la ecuación de Laplace.
- Si $R(x,y)$ es positiva \rightarrow Recarga.
- Si $R(x,y)$ es negativa \rightarrow Bombeo.

Todo lo dicho anteriormente para la resolución de la ecuación de Laplace es válido para la ecuación de Poisson. Sin embargo, esta última es más realista y completa, y se ajusta mejor a la mayoría de los problemas reales que suelen presentarse. Establece de modo simplista que la suma de entradas y salidas de agua en un recinto acotado debe ser igual al bombeo o recarga que incida sobre tal recinto, siempre en condiciones de régimen permanente⁶ (no variación de los niveles piezométricos en el recinto) y de medio homogéneo e isótropo en cuanto a la permeabilidad.

ECUACIÓN DEL FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.

Para flujo en régimen permanente se obtienen soluciones de equilibrio para un fenómeno concreto. No se trata de cómo ni cuándo alcanza este equilibrio, solamente se trata de calcular la solución de equilibrio.

Si un sistema está en equilibrio, para cambiar esta situación se requieren ciertas acciones sobre el sistema, como pueden ser bombeos o recargas. El sistema evoluciona hasta alcanzar de nuevo la situación de equilibrio correspondiente; mientras esta nueva situación es alcanzada, se suceden un conjunto de situaciones a lo largo del tiempo, lo que se denomina régimen transitorio. Los niveles van variando y en consecuencia se va almacenando o desalmacenando agua en el recinto. En este caso, la ecuación de la continuidad en régimen transitorio se aplica al recinto según:

$$\text{Volumen saliente} = \text{Volumen entrante} - \text{Volumen desalmacenado}$$

(En un intervalo de tiempo Δt)

En el intervalo Δt , el nivel varía Δh , como indica la Figura 2.6. El volumen de roca vaciado vendrá dado por $\Delta h * \Delta x * \Delta y$, y el volumen de agua contenido en este volumen de roca vendrá dado por $S * \Delta h * \Delta x * \Delta y$. El volumen desalmacenado en el tiempo Δt será $S * \Delta h * \Delta x * \Delta y / \Delta t$. Introduciendo este término en la ecuación de la continuidad en presencia de fuentes y sumideros, es decir, incluyendo el término del volumen desalmacenado en la unidad de tiempo en el término de recargas, se tiene:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y, t) \Delta x \Delta y - S \frac{\partial h}{\partial t} (\Delta x \Delta y)$$

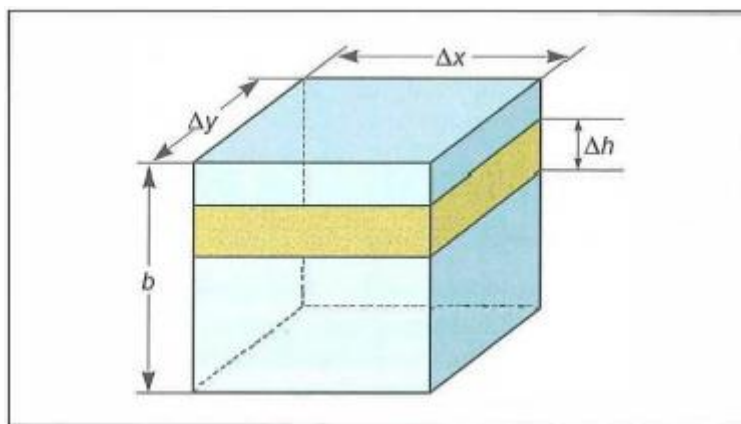


Figura 2.6. Esquema para la deducción de la Ecuación General de Flujo Transitorio. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Aplicamos la ley de Darcy como en anteriores ecuaciones:

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Y asumiendo una vez más condiciones de homogeneidad e isotropía ($k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$), discretización cuadrada ($\Delta x = \Delta y$) y $T = kb$, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T}$$

Así pues, se tiene que esta última es la Ecuación General del Flujo en Régimen Transitorio, con permeabilidad homogénea e isotrópica, y con presencia de fuentes y sumideros.

Los términos de la ecuación obtenida tienen el siguiente significado:

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$: Suma de caudales entrantes por caras laterales.

$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$: Volúmenes desalmacenados por unidad de tiempo.

$\frac{R(x, y, t)}{T}$: Bombeos o recargas por unidad de tiempo.

En definitiva, la ecuación general del flujo en régimen transitorio indica que el balance de caudales entrantes y salientes en un recinto debido a gradientes piezométricos, sumado a las recargas externas al sistema tales como bombeos o recargas, debe ser igual a los caudales de llenado o vaciado del recinto.

Como se puede observar, si $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$, se obtiene la ecuación de Poisson de régimen permanente con fuentes y sumideros.

Además, se aprecia que si $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$ y $\frac{R(x, y, t)}{T} = 0$, se obtiene la ecuación de Laplace.

Se puede concluir este apartado comentando que la Ecuación General del Flujo, así como su resolución para cada caso concreto con sus adecuadas condiciones de contorno, es de uso general en los problemas de hidrogeología e ingeniería geológica.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

2.5. Resolución analítica para el diseño de abatimientos mediante zanjas.

Existen muchos problemas en ingeniería geológica en los que es preciso un cálculo riguroso del flujo en materiales naturales o de construcción bajo determinadas condiciones de contorno. Las leyes que controlan el flujo de aguas subterráneas en medios permeables han sido estudiadas en puntos anteriores. Existe una dificultad considerable en la resolución de las ecuaciones diferenciales características de cada fenómeno. La posibilidad de resolverlas satisfactoriamente depende de la complejidad del problema y, especialmente, de las condiciones de contorno. Los problemas pueden presentarse en régimen permanente o transitorio.

Existen tres métodos clásicos para abordar la resolución de estos problemas:

- **Métodos analíticos:** Se basan en la resolución matemática del problema mediante cálculos manuales. Presentan muchas limitaciones y solo pueden resolver problemas en régimen permanente con configuraciones simples del medio físico, y unos pocos casos en régimen transitorio.
- **Redes de flujo:** Se basan en la resolución gráfica del problema. Pueden emplearse para resolver problemas de régimen permanente con configuraciones muy simples del medio físico y con condiciones de nivel constante perfectamente delimitadas.
- **Métodos numéricos:** Se basan en la resolución del problema mediante computación. Proporcionan soluciones aproximadas. Son los más completos, pues permiten abordar problemas de régimen permanente o transitorio, en dos y tres dimensiones, con parámetros hidrogeológicos variables en el espacio e incluso en el tiempo y con condiciones de borde diversas. De hecho, son el único método disponible para el análisis de sistemas complejos.

Aunque los métodos numéricos requieren un cierto grado de especialización matemática e informática, actualmente existe una disponibilidad de aplicaciones de modelos de flujo y transporte orientados al usuario que no requieren una alta especialización en materias ajenas a la hidrogeología y la ingeniería geológica. Esto hace que estas técnicas se utilicen cada vez con un carácter más general.

Veamos un ejemplo práctico para comprender mejor la aplicación del método analítico. Como se aprecia en la Figura 2.7., se tienen dos zanjas A y B con niveles constantes en ambas: $h_a = 12$ metros y $h_b = 5$ metros. Las zanjas están en un acuífero libre con permeabilidad $k = 1$ m/día y penetran de forma total en la formación, además están separadas por una distancia $L = 23$ metros.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

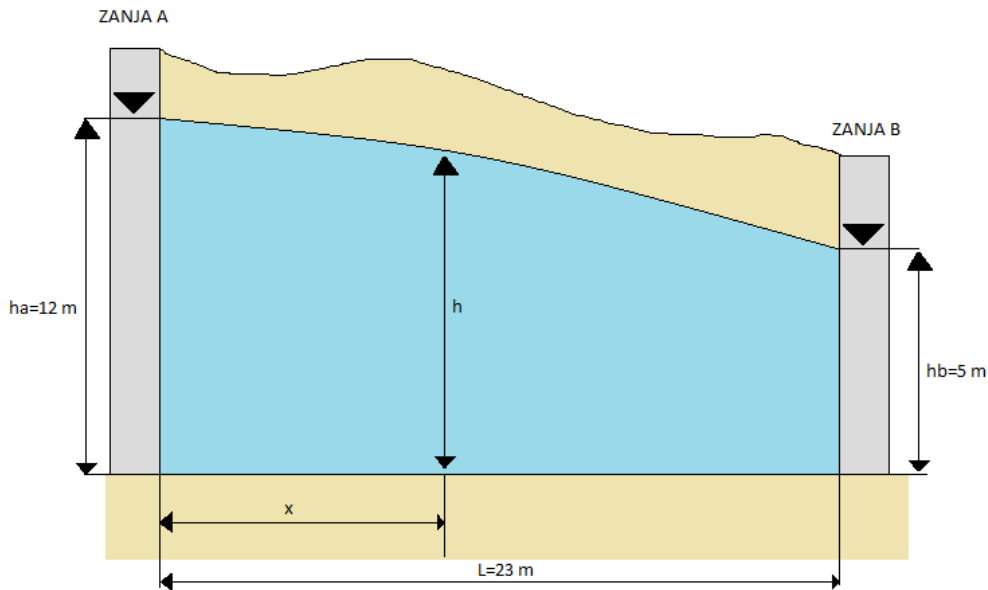


Figura 2.7. Esquema aproximado problema zanjas. Método analítico

Se van a estudiar en este caso planteado los caudales que circulan entre ambas zanjas por metro lineal de zanja, y la forma de la superficie piezométrica. Para ello, se va a intentar llegar a una expresión que permita calcular el caudal circulante.

El caudal por metro de zanja no pasa por una sección constante $b*1$, sino que lo hace por una sección variable $h*1$. Al ser libre, el acuífero no tiene un espesor constante, sino que depende del espesor saturado en cada punto situado a una distancia x de la zanja A y que vendrá dado por el nivel piezométrico h en ese punto (Figura 2.7). El caudal Q que pasa por un punto x genérico para 1 metro de longitud de zanja es:

$$Q = -kA \frac{dh}{dx}$$

Donde:

$A = h*1 =$ área de paso

$k =$ coeficiente de permeabilidad

Queda:

$$Q = -kh \frac{dh}{dx} \rightarrow \frac{Q}{k} dx = -h dh$$

Cuando x varía entre 0 y L , h variará entre h_a y h_b . Entonces:

$$\frac{Q}{k} \int_0^L dx = - \int_{h_a}^{h_b} h dh$$

Operando:

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

$$\frac{Q}{k} [x]_0^L = \left[\frac{h^2}{2} \right]_{ha}^{hb}$$

Queda:

$$\frac{QL}{k} = \frac{1}{2} (h_a^2 - h_b^2)$$

Finalmente, el caudal de transferencia por metro de zanja vendrá dado por:

$$Q = \frac{k}{2L} (h_a^2 - h_b^2)$$

En nuestro caso, se tiene una $k = 1 \text{ m/día}$; $ha = 12 \text{ m}$; $hb = 5 \text{ m}$; $L = 23 \text{ m}$.
Substituimos y queda:

$$Q = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{día}}}{2 * 23 \text{ m}} (12^2 \text{ m} - 5^2 \text{ m}) = \mathbf{2,28 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Por otro lado, la ecuación de la superficie piezométrica podría obtenerse buscando la relación que diera el valor del nivel piezométrico h en función de la situación x . Para ello, habría que establecer la integración entre la zanja A y la zanja B para eliminar Q entre las dos ecuaciones.

Así, para el caso de acuífero libre:

$$\frac{Q}{k} dx = -h dh$$

Operamos integrando entre 0 y x :

$$\frac{Q}{k} \int_0^L dx = - \int_{ha}^h h dh$$

Resulta:

$$\frac{Qx}{k} = \frac{h_a^2 - h^2}{2}$$

Integramos también entre x y L :

$$\frac{Q}{k} \int_x^L dx = - \int_h^{hb} h dh$$

Resulta:

$$\frac{Q}{k} (L - x) = \frac{h^2 - h_b^2}{2}$$

Eliminando Q por cociente entre las dos ecuaciones, resulta:

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

$$\frac{L-x}{x} = \frac{h^2 - h_b^2}{h_a^2 - h^2} \rightarrow \left(\frac{L}{x} - 1\right)(h_a^2 - h^2) = h^2 - h_b^2$$

Operando y simplificado queda:

$$h^2 = \frac{h_a^2 - h_b^2}{L}x + h_a^2$$

Se puede comprobar que la forma de la superficie piezométrica es independiente de la permeabilidad y del espesor del acuífero, siendo su ecuación una parábola que depende únicamente de las condiciones en los bordes.

3. PROGRAMA MODFLOW

3.1. Descripción general del programa.

Modflow es un programa tridimensional para agua subterránea el cual trabaja bajo una expresión de diferencias finitas de aproximación. Este fue desarrollado por el USGS de los Estados Unidos de América bajo el sistema de Fortran 88 y documentado en los años 1995 – 1996. El programa fue generado por un proceso matemático de matrices complejas bajo la ley de Darcy y sus resultados finales presentaban una calidad muy pobre. Posteriormente la Universidad de Waterloo logró codificar un módulo para una mejor calidad visual en los resultados el cual le dieron el nombre de Visual Modflow. Hoy en día se han estructurado diferentes módulos codificados para otras aplicaciones particulares y otras nuevas compatibilidades.

Actualmente, Modflow se considera un estándar internacional para simular y predecir las condiciones de las aguas subterráneas, además de las interacciones de estas con las aguas superficiales. En la Figura 3.1. se puede observar la interfaz tipo del programa.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

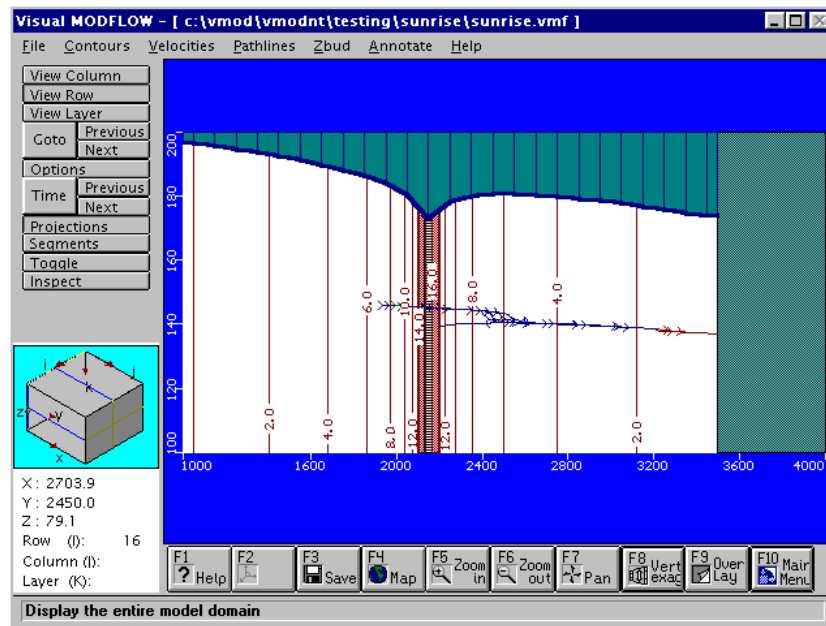


Figura 3.1. Interfaz tipo Visual Modflow (Fuente: Visual Modflow User's Manual)

Modflow puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando varios tipos de capas, así como acuíferos confinados y semiconfinados. También puede calcular el movimiento de una partícula, es decir, se pueden realizar modelos de transportes de contaminantes. El modelo puede requerir de varios parámetros, dependiendo de cuál sea su aplicación. Este necesita datos como: caudal de pozos de extracción o de inyección, área de recarga, flujos y drenes, conductividad hidráulica, topografía, flujos de entrada y salida, coeficiente de almacenamiento, condiciones de fronteras, coordenadas para capas horizontales, geometría del acuífero, etc.

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las suposiciones y las soluciones son de compromiso, debido a las limitaciones en la capacidad de cómputo y, sobre todo, a la insuficiencia de los datos de entrada

Las limitaciones de Modflow se basan en que los datos de entrada afectan a la precisión y aplicabilidad de los modelos. En este sentido, la arquitectura del modelo resulta esencial: el tamaño de la malla y el número de capas. Los primeros modelos matemáticos estaban limitados por la capacidad de cómputo y la poca disponibilidad de información hidrogeológica, por lo que el tamaño de la malla era grueso y los datos eran limitados. Hoy en día, el tamaño de las celdas puede ser mucho más pequeño debido a que los sistemas de cómputo se encuentran muy avanzados, tanto en su capacidad como en memoria.

Sin embargo, la información hidrogeológica no ha aumentado a la misma velocidad que la capacidad de simular la presencia y el movimiento del agua subterránea utilizando celdas muy pequeñas. Actualmente el tamaño de la celda está limitado más bien por el objetivo del modelo y los datos hidrogeológicos, y no por el tiempo de cómputo.

Los objetivos de un modelo matemático, tomando en cuenta la conservación del acuífero, son principalmente tres:

1. Implementar un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero para hacer balances.
2. Elaborar escenarios de manejo del acuífero.
3. Hacer recomendaciones para la administración del agua subterránea, operando los escenarios de incremento paulatino de extracción.

Así pues, Modflow resuelve las ecuaciones diferenciales parciales usando el método de diferencias finitas, donde cada celda es un volumen unitario.

En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Modflow es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica para los ejes x , y , z (L/T).

h es la pérdida de carga hidráulica.

W es el flujo volumétrico por unidad de volumen representada como el suministro o descarga de agua, donde los valores negativos indican extracción de agua y los positivos, inyección de esta (L^{-1}).

S_S es el almacenamiento específico del medio poroso (L^{-1}).

t es el tiempo (T).

Por otro lado, la forma de la diferencial parcial por diferencias finitas en un espacio discretizado del dominio del acuífero representado por filas, columnas y capas es:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} \\ & = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \end{aligned}$$

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Donde:

$h_{i,j,k}^m$ es la pérdida de carga hidráulica en la celda i,j,k al paso del tiempo m .

CV , CR y CC representan la conductancia hidráulica, o un pedazo de conductancias entre los nodos i,j,k y un nodo vecino $P_{i,j,k}$ es la suma de los coeficientes de la pérdida de carga de las fuentes y de las descargas.

$Q_{i,j,k}$ es la suma de las constantes de los términos de las fuentes y las descargas. Cuando $Q_{i,j,k} < 0.0$ es el flujo del sistema de agua subterránea (como el bombeo) y $Q_{i,j,k} > 0.0$ es el flujo en superficie (como la inyección).

t^m en el paso del tiempo m .

3.2. Interfaz de comunicación con Modflow: Visual Modflow Premium v.4.2

Cuando se va a crear un modelo, lo primero que se debe hacer es crear una carpeta para guardar la información de cada modelización. El programa genera más de 37 archivos de los cuales hace uso durante sucesivas modelizaciones del mismo escenario. Es importante crear una copia de la carpeta y trabajar con ella cada vez que se desee crear nuevos escenarios a partir de uno existente. De esta forma nos aseguramos de que siempre tendremos un archivo base al que recurrir (contenido en la carpeta inicial) para poder recuperar las simulaciones y los datos iniciales.

Los tipos de archivos que genera el programa se clasifican:

- **Archivos de *Input*:** Introducción de datos en el modelo, tales como geometría, parámetros físicos, parámetros químicos, tiempos, etc.
- **Archivos de ejecución *Run*.**
- **Archivos de *Output*:** Resultados de la modelización.

Una vez se ha ejecutado el modelo Visual Modflow Premium, se permite visualizar cualquiera de estos archivos.

3.2.1. Introducción de datos (Input).

Una vez indicada la ruta de acceso a la carpeta, el programa crea el archivo *input*. Lo primero que solicita es el tipo de simulación (flujo, flujo y transporte de sal, flujo en zona no saturada o transporte de contaminantes, unidades) y el tiempo de simulación real. Generalmente se escoge un tiempo más que suficiente para el problema que se vaya a solucionar, de forma que se pueda alcanzar el régimen estacionario. No obstante, el programa permite forzar el régimen estacionario y generar un único archivo temporal de resultados.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Visual Modflow Premium ofrece la posibilidad de introducir parámetros hidrogeológicos en esta primera fase, aunque es recomendable hacerlo en la segunda fase del *input*.

Para acabar con esta primera fase, el programa pide los datos geométricos del problema. En este punto se fija la extensión máxima en las tres direcciones espaciales y se establece el número de capas (dirección z), número de columnas (dirección x) y número de filas (dirección y). Al reticular de esta manera, dejamos prefijada la malla y el número de celdas en que ha quedado dividido el dominio espacial. Existe la posibilidad de reticular con más celdas en la segunda fase del *input*, pero la extensión geométrica no podrá ser modificada más adelante.

Una vez queda finalizada esta primera etapa, se despliega la pantalla de acceso a la segunda fase de introducción de datos. Para este proyecto se ha hecho uso de las ventanas de refinados de malla (para delimitar el espesor del muro pantalla), conductividad (para los valores de la conductividad hidráulica anisótropa), condiciones iniciales (piezometría), condiciones de contorno (establecimiento de un gradiente hidráulico), pozos de extracción y simulador de partículas.

3.2.2. Proceso de simulación (*Run*).

En este paso del proceso, se le especifica al programa qué paquetes se van a ejecutar (Figura 3.14). En el caso estudiado únicamente se hará uso de Modflow (flujo de agua), Modpath (simulador de partículas) y Zone Budget (balances hídricos). Dentro del paquete Modflow se precisa concretar cuantos datos de salida queremos que se generen en el *output*. En general, se suele pedir que guarde información de cada uno de los *time steps* (intervalos de tiempo) en los que se divide temporalmente el escenario. La definición de los intervalos de tiempo y de los *stress periods* (pasos dentro de cada intervalo) guarda relación con los cambios en las variables de contorno que generamos en el *Input*. Para el caso estudiado, estas variaciones vienen determinadas por los caudales de extracción.

3.2.3. Visualización de los resultados (*Output*).

La pantalla para la visualización de resultados es similar a la que se despliega en la segunda fase del *input*. Los resultados que se han empleado en este trabajo son los de piezometría, trayectoria de partículas y descenso del nivel piezométrico.

Más adelante, en concreto en el apartado 4.2., se explica más extensamente el manejo de Modflow.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

4. APLICACIONES

El caso a resolver consiste en una excavación con taludes laterales de pendiente 1/3 que debe llevarse hasta una profundidad de 12 metros en un depósito de 30 metros de espesor de arena gruesa ($k = 1.17 \times 10^{-3}$ m/s) situado sobre una arcilla impermeable. El área de excavación mide 160 x 40 metros. Se tiene flujo proveniente de una fuente circular y existe el problema de que, cualquier intento por hacer una excavación bajo el nivel freático en un suelo libremente drenante, traerá como resultado filtraciones de agua en cantidades incontrolables hacia la excavación, los cuales no solo dañarían las condiciones de trabajo en la excavación, sino que también la filtración asociada comprometería la estabilidad de los taludes laterales. Una solución válida para esta problemática consiste en abatir el nivel freático hasta una posición por debajo de la base de la excavación propuesta mediante la construcción y operación de un sistema de zanjas de drenaje o zanjas de desagüe que penetren completamente en el estrato arenoso, instaladas alrededor del perímetro de la excavación. La geometría típica se muestra en la Figura 4.1. El abatimiento necesario está definido por la profundidad de la excavación y el nivel freático original.

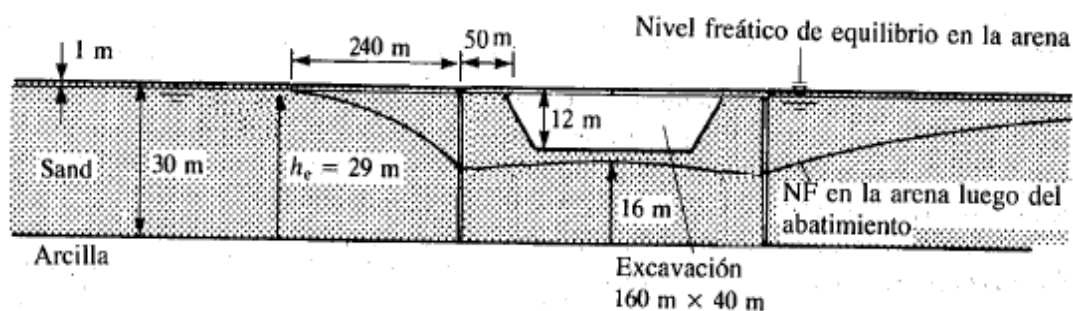


Figura 4.1. Representación esquemática del perfil del caso a resolver (Fuente: Mecánica de Suelos. Peter L. Berry & David Reid, 1993)

Como se aprecia en la Figura 4.1, se tiene un espesor de arenas de 30 metros de espesor que alberga un acuífero con nivel piezométrico situado 1 metro por debajo de la superficie del terreno. Se tendrá este nivel piezométrico constante hasta una distancia de 240 metros de la zanja. A su vez, las zanjas se colocarán a 50 metros del borde de la excavación rodeando ésta por sus cuatro costados. El objetivo de la solución planteada es conseguir un abatimiento del nivel piezométrico del acuífero hasta los 14 metros bajo la superficie del terreno, quedando 2 metros bajo el fondo previsto de la excavación.

4.1. Resolución analítica.

Para la resolución analítica del problema habría que acudir al ejemplo de flujo entre dos zanjas que se ha dado en el apartado 2.5. Hemos de plantear el caso de estudio de forma que lo podamos simplificar como un flujo entre dos zanjas. Para ello se plantean dos zanjas, la Zanja 1 y la Zanja 2. La Zanja 1 es una zanja imaginaria en la cual el nivel de agua es el nivel real que tiene el acuífero antes de realizar el abatimiento, es decir, se tienen 29 metros de agua. Por su parte, la Zanja 2 es la zanja real del caso vista en perfil. En esta zanja, se tiene el nivel de agua objetivo del abatimiento del caso planteado, se tienen 16 metros de agua. En la Figura 4.2. se aprecia el esquema de forma gráfica de la simplificación realizada.

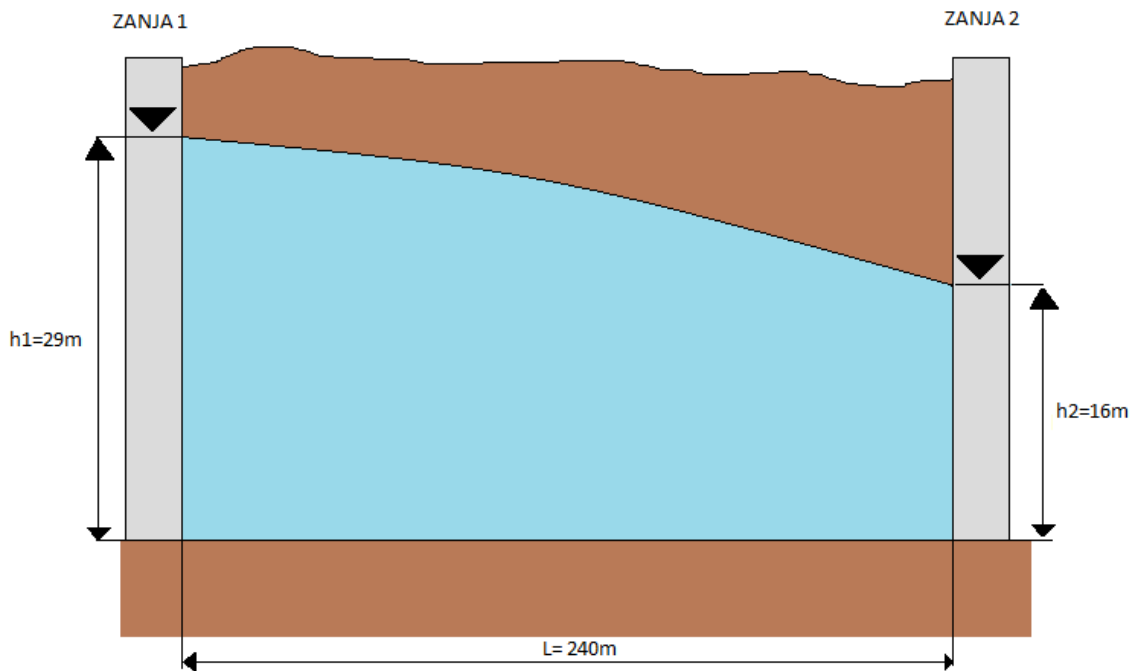


Figura 4.2. Esquema de la simplificación para el cálculo de flujo entre dos zanjas

Como dato adicional se tiene que la arena tiene un coeficiente de permeabilidad $k = 1.17 \times 10^{-3}$ m/s

Se va a proceder a obtener el caudal Q por metro lineal de zanja que será necesario extraer para realizar el abatimiento del nivel freático del acuífero satisfactoriamente. Para ello utilizaremos la ecuación de deducida anteriormente en el apartado 2.5., y que se define como:

$$Q = \frac{k}{2L} (h_1^2 - h_2^2)$$

Donde:

$$k = 1.17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$L = 240 \text{ metros.}$$

$h_1 = 29$ metros.

$h_2 = 16$ metros.

Substituyendo y operando, resulta que:

$$Q = \frac{1.17 \times 10^{-3} \frac{\text{metros}}{\text{segundo}}}{2 * 240 \text{ metros}} (29^2 \text{ metros} - 16^2 \text{ metros}) = 1.426 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$$

El caudal obtenido se da por cada metro lineal de zanja. Atendiendo al enunciado del problema, se aprecia que se tienen zanjas rodeando los cuatro costados de la excavación y distanciadas 50 metros de la misma. Se conoce que la excavación tiene 160 x 40 metros, por lo que con un sencillo cálculo se obtiene que las zanjas abarcan un área de 260 x 140 metros. En total se suman 800 metros lineales de zanjas rodeando la excavación.

Por tanto:

$$Q_t = 1.426 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{seg} * \text{metro lineal}} \times 800 \text{ metros lineales} = 1.1408 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Y en días será:

$$Q_t = 98565.12 \text{ m}^3/\text{día}$$

4.2. Resolución numérica.

4.2.1. Creación del modelo (*Input*).

Lo primero que hay que hacer para crear un modelo con Modflow es, tal como se indicó en el apartado 3.2., crear una carpeta (Figura 4.3.) para guardar la información de la modelización que se va a crear.

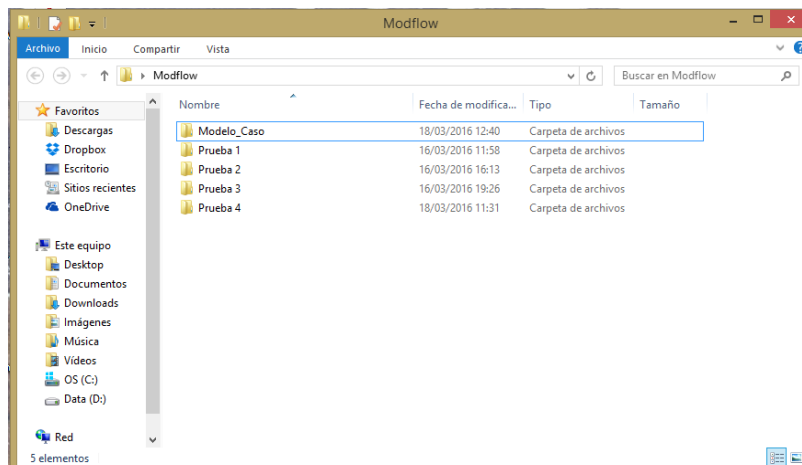


Figura 4.3. Carpeta en la que se guarda la modelización de Modflow

Seguidamente se ejecuta el programa y se indica en que carpeta se va a guardar el conjunto de archivos que el programa va a generar para ejecutar el modelo. Una vez hecho esto, comenzamos con la modelización propiamente dicha.

En la primera pantalla que aparece, la cual se muestra en la Figura 4.4., se introduce el nombre y, opcionalmente una pequeña descripción del proyecto. Además se pueden ajustar las unidades, las cuales en nuestro caso quedarán como se muestra en la parte derecha de la Figura 4.4. Por último, se ha de ajustar el tipo de flujo, el cual en el caso que se está tratando se debe seleccionar el tipo *Saturated (Constant Density)* como se observa en la figura de abajo.

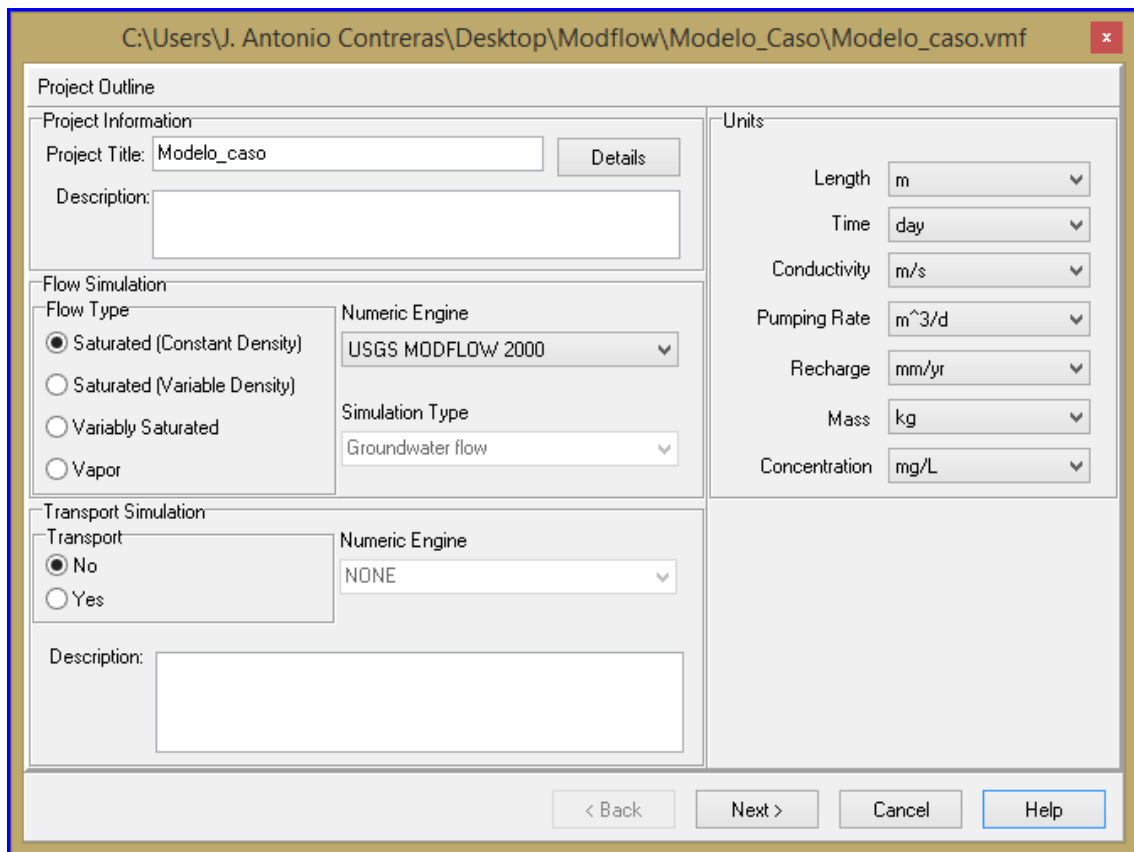


Figura 4.4. Ventana de ajuste de unidades y tipo de flujo

Para continuar con la modelización, se hace click en *Next* y aparece la ventana que se puede apreciar en la Figura 4.5. En esta ventana se ha de introducir el tiempo total para el que se va a realizar la simulación, este tiempo ha de ser suficiente para llegar a un estado permanente. En el caso que se está estudiando se elige el valor de 10 años, o lo que es lo mismo, 3650 días. Los demás valores, por el momento, no se ajustan.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Parameter Name	Value	Units
Kx	0.0001	m/s
Ky	0.0001	m/s
Kz	1E-5	m/s
Ss	1E-5	1/m
Sy	0.20	
Eff. Por.	0.15	
Tot. Por.	0.30	
Recharge	0	mm/yr
Evapotranspiration	0	mm/yr
Extinction Depth	0	m

Figura 4.5. Ventana de ajuste de tiempo y datos hidrogeológicos

Se prosigue con la creación del modelo clicando en *Next* y aparece una ventana como la que se puede ver en la Figura 4.6. Esta ventana es en la que se ajustan las dimensiones del mallado que va a conformar el modelo. En el caso en el que se está trabajando se van a colocar 40 columnas (*columns*) y 40 filas (*rows*). También se introducen las dimensiones globales del modelo, siendo en el caso en cuestión de 1000 metros x 1000 metros. Otro dato a introducir en esta ventana son las coordenadas en el eje Z, atendiendo al enunciado del caso, se tienen 30 metros de profundidad en el acuífero. Tomando como referencia la superficie del terreno, se colocan $Z_{max}=0$ y $Z_{min}=-30$ metros. Por último, se ha de especificar el número de capas en las que queremos dividir los 30 metros de profundidad, siendo en este caso solo una capa (*Layer*)

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

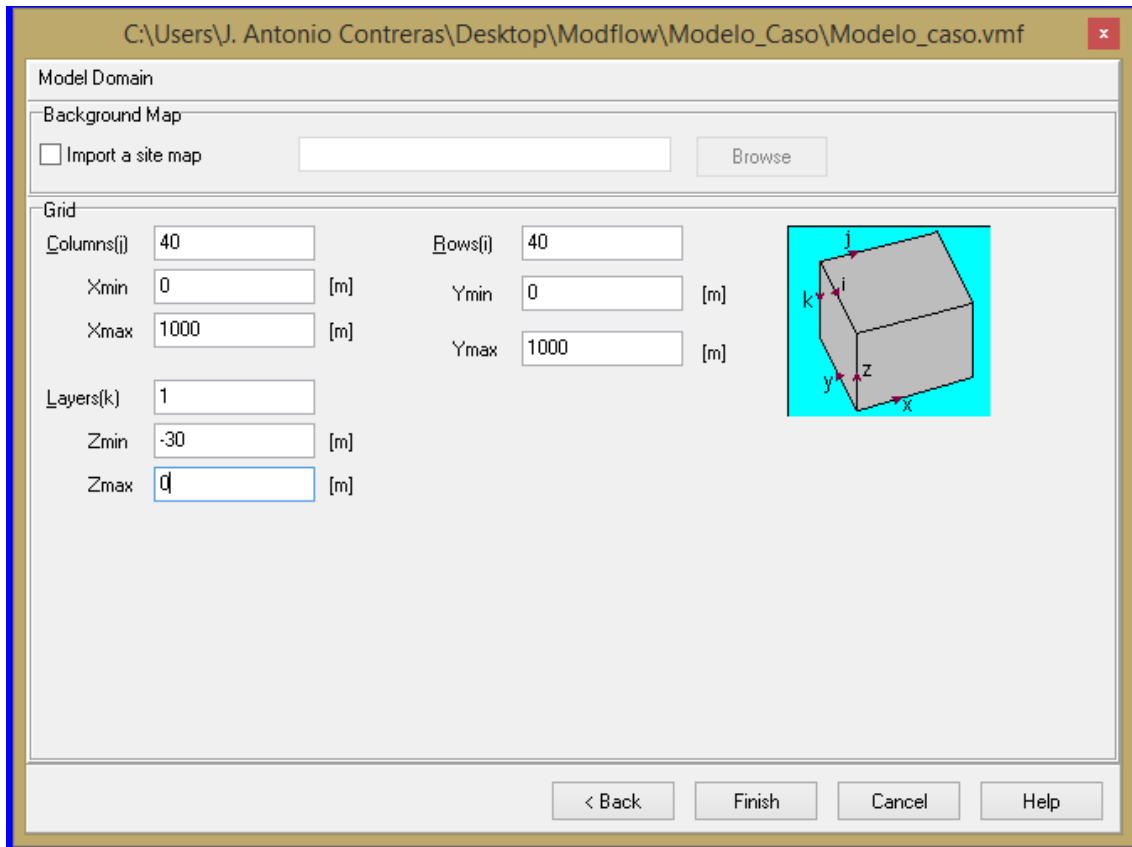


Figura 4.6. Ventana de ajuste de las dimensiones del mallado

Si se le clicca a *Finish*, se finaliza el proceso preliminar de introducción de datos y se obtiene una vista como la de la Figura 4.7. En esta pantalla se tiene una vista en planta del mallado con las dimensiones especificadas, aunque esta vista se puede modificar en el menú de la parte izquierda. En este menú, haciendo clic en los botones *View Column*, *View Row* o *View Layer*, se puede mover la vista por cada fila y/o columna del mallado.

Además se tiene otro panel de botones en la parte izquierda en el que aparece un desplegable con las distintas funciones que tiene el programa.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

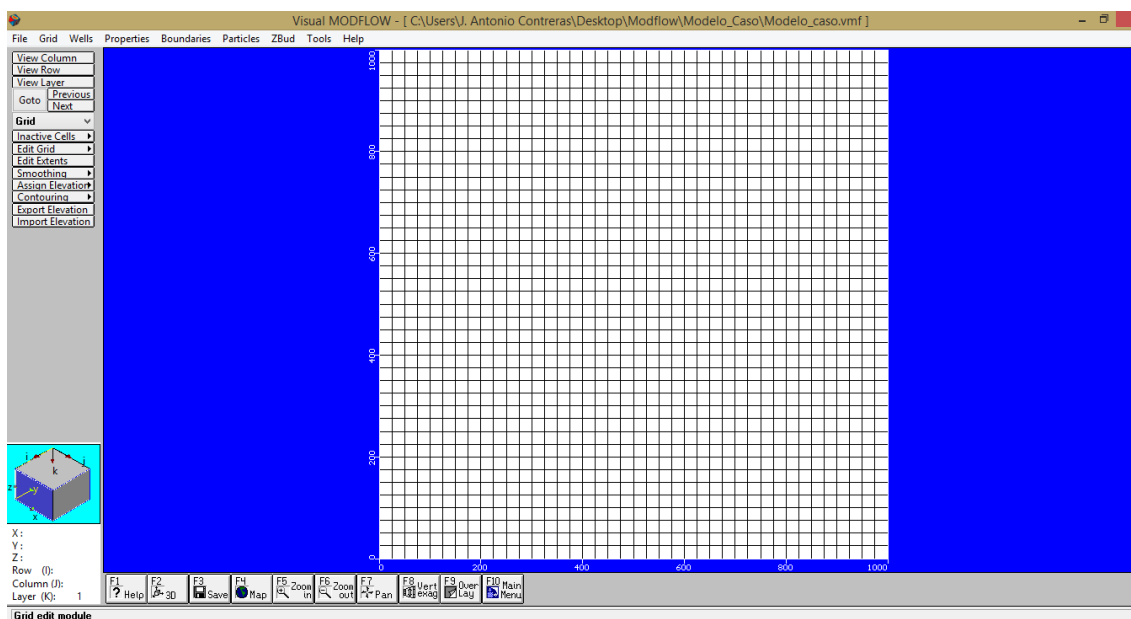


Figura 4.7. Pantalla principal de *Input* con vista en planta del mallado

El siguiente paso a dar en la creación del modelo buscado es ajustar la conductividad. Si se clicla en el menú desplegable de la izquierda y una vez ahí se selecciona *Conductivity* y aparece una ventana como la de la Figura 4.8. En esta ventana se ha de introducir el valor dado de la conductividad del suelo en cuestión, siendo este valor de 0.00117 m/s en los ejes tanto X como Y. Como valor de la conductividad en el eje Z se toma un valor aproximado de la décima parte de la conductividad en los ejes X e Y, o sea un valor de 0.000117 m/s.

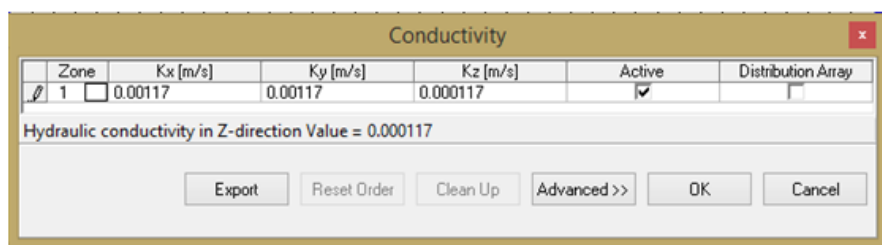


Figura 4.8. Ventana de ajuste de la conductividad

Seguidamente se ha de ajustar el nivel de la piezometría inicial. Para ello se selecciona *Initial Heads* y aparece una ventana como la de la Figura 4.9. Se introduce el valor indicado en el enunciado del caso, es decir, un metro bajo la superficie del terreno.

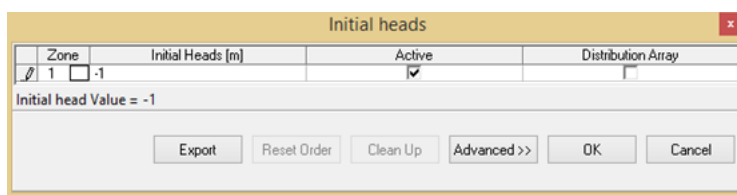


Figura 4.9. Ventana de ajuste de la piezometría inicial

Una vez hecho esto, se puede proceder a refinar el mallado para poder colocar los distintos elementos que componen el modelo. Si se selecciona la función

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Grid del menú desplegable de la izquierda, se pueden colocar, borrar o mover tanto las columnas como las filas que sean necesarias. Se va a colocar la excavación, con las dimensiones especificadas de 160 x 40 metros. Queda con la forma que se aprecia en la parte central de las Figuras 4.10 y 4.11.

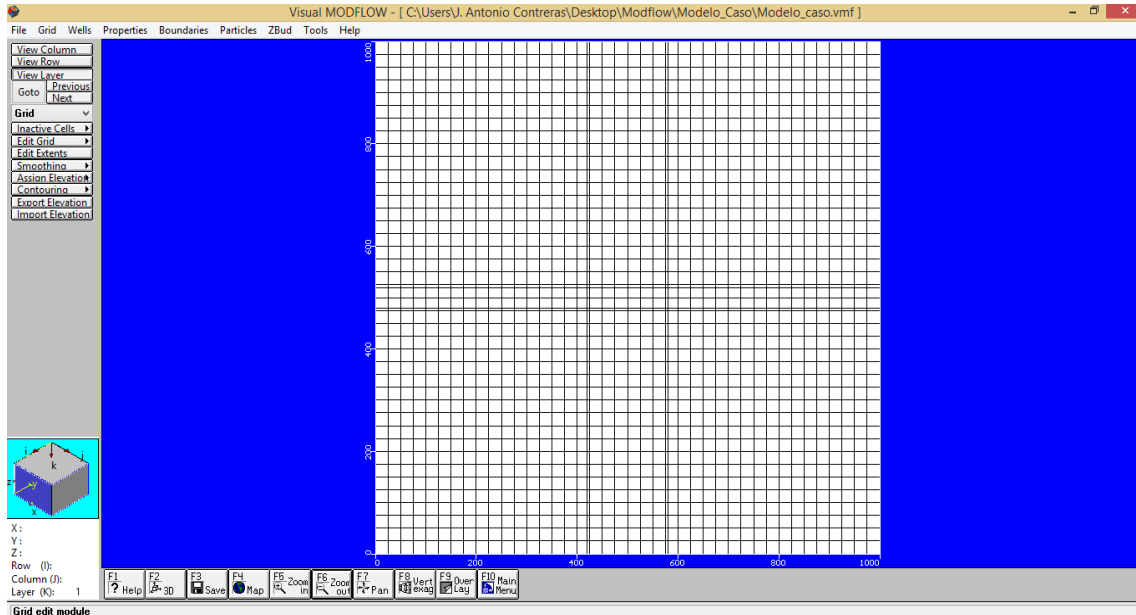


Figura 4.10. Situación de la excavación en el mallado

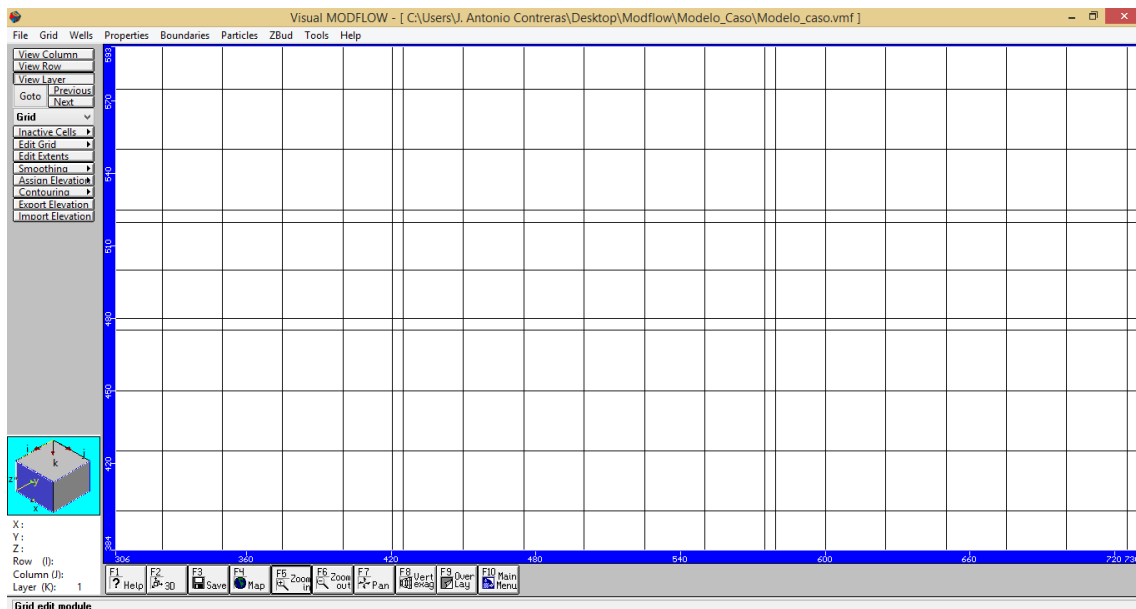


Figura 4.11. Detalle ampliado de la situación de la excavación en el mallado

También se colocarán las zanjas, que se proponen de 1 metro de anchura y que van colocadas a 50 metros de los bordes de la excavación, rodeando a esta por sus cuatro costados. En las Figuras 4.12 y 4.13 se aprecia cómo queda la situación de las zanjas en la malla.

Jose Antonio Contreras Jiménez

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

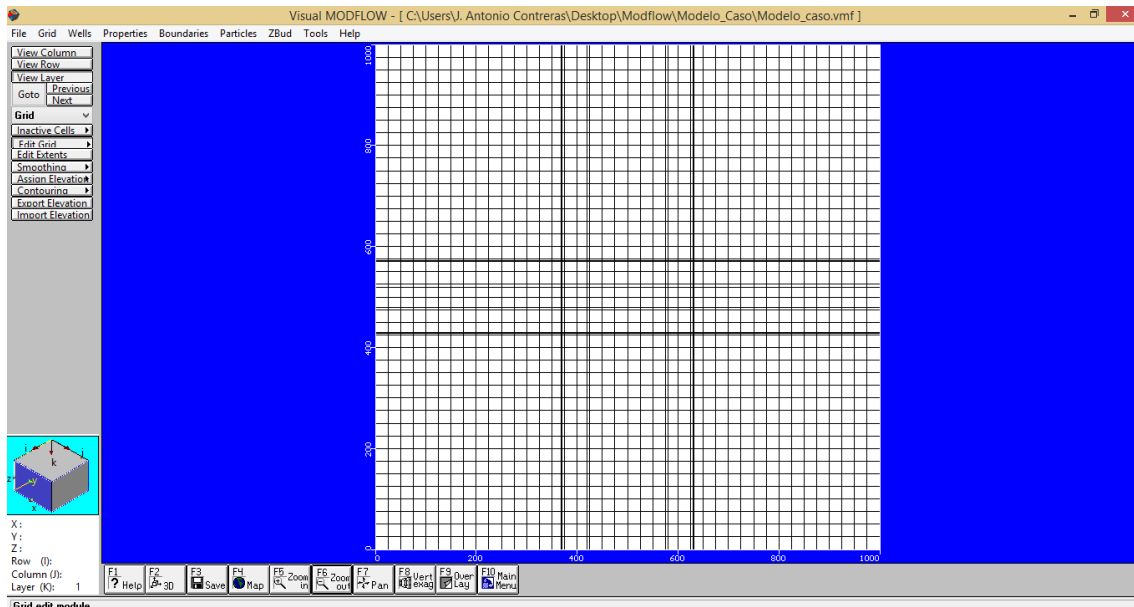


Figura 4.12. Situación en planta de las zanjas en el mallado

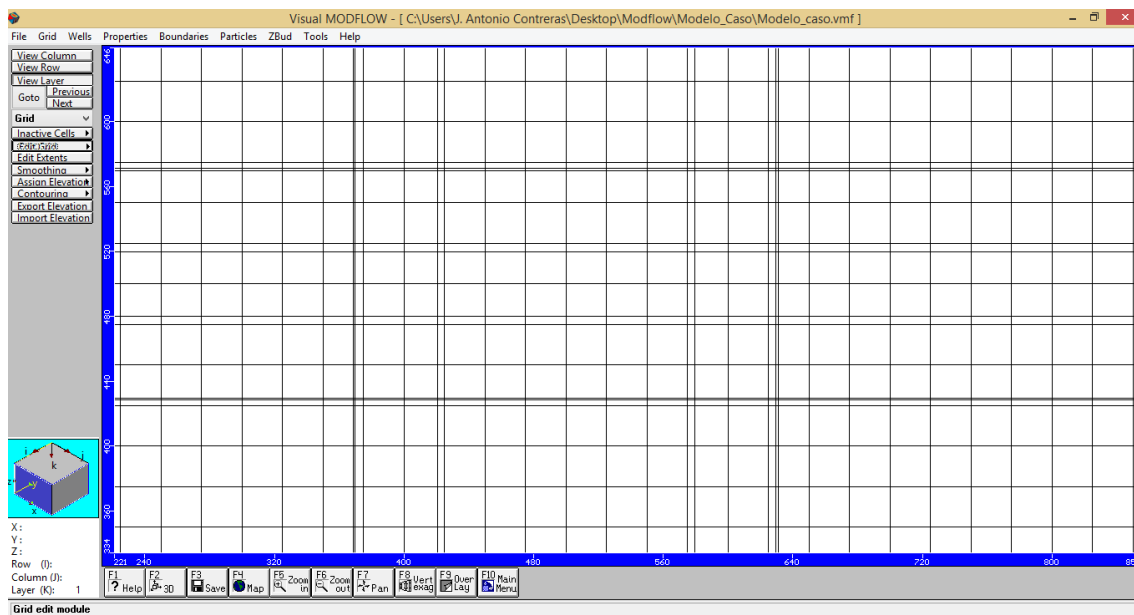


Figura 4.13. Vista ampliada de la situación de las zanjas en el mallado

Siempre, para colocar los elementos en las dimensiones y situación adecuada, se ha de tener en cuenta las coordenadas. Estas coordenadas se pueden leer en la parte inferior izquierda de la pantalla, donde aparece una ventana como la de la Figura 4.14.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

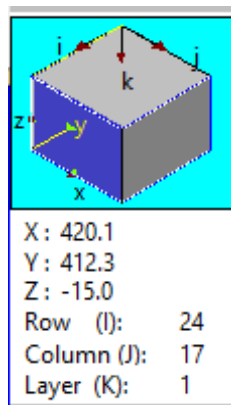


Figura 4.14. Ventana donde se indican las coordenadas por las que se mueve el cursor

A continuación, se definen las características de las zanjas. Si en el menú de funciones desplegable de la izquierda se clic en *Drain* y se selecciona la zona que se ha dispuesto para albergar estas zanjas, se desplegará una ventana como la que se puede ver en la Figura 4.15. En esta figura, la zona coloreada de rosa es la zona seleccionada donde se van a colocar las zanjas. Se va a optar porque las zanjas trabajen en dos fases o periodos. Un periodo, el primer año, de 365 días en el que el nivel en las zanjas será el nivel piezométrico del acuífero, o sea 1 metro bajo la superficie. El segundo periodo de funcionamiento de las zanjas drenantes abarcará los nueve años restantes, en los que el nivel de agua en esta zanjas será el objetivo, 14 metros bajo la superficie del terreno.

Un parámetro importante que aparece en esta fase del proceso es la conductancia, definida como un parámetro numérico que representa la resistencia al flujo entre el nivel de agua y las condiciones del modelo. Este valor se mide en $m^2/día$ y se calcula como el producto del valor de la conductancia por unidad de longitud ($m/día$) y la longitud en metros lineales de la zanja. La conductancia por unidad de longitud es un valor que se debe medir a partir de las características de la zona. Para la modelización de este caso teórico se ha calibrado el modelo hasta conseguir el valor del abatimiento deseado.

Jose Antonio Contreras Jiménez

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

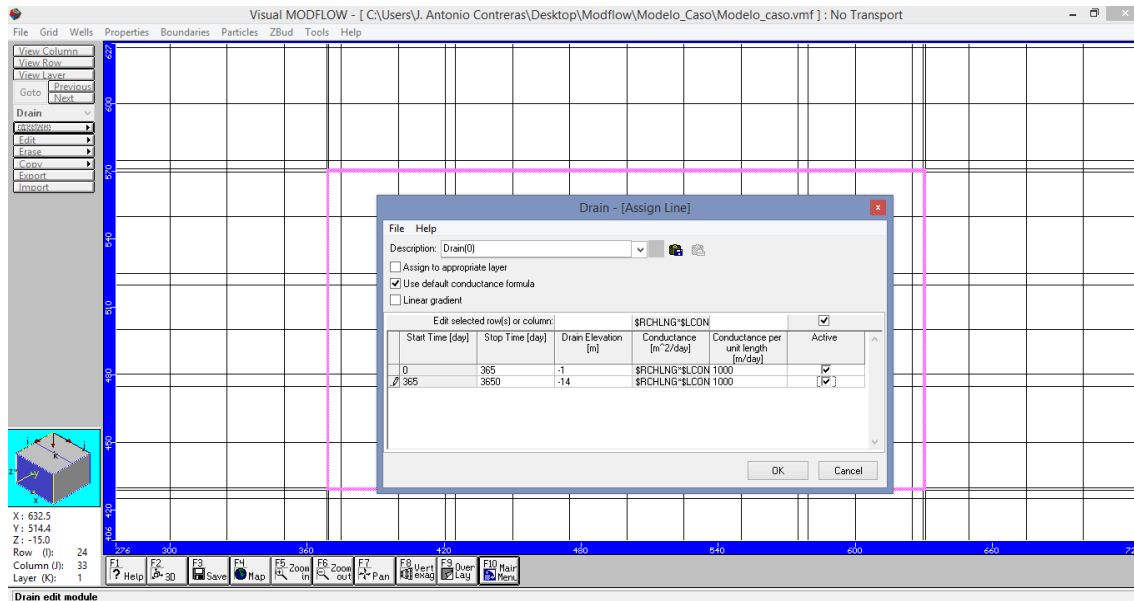


Figura 4.15. Ventana de ajuste de las características de las zanjas

Seguidamente, se han de definir las zonas en las que la piezometría va a permanecer constante. Atendiendo al enunciado del problema, se aprecia que esta zona está a 240 metros del borde exterior de las zanjas. En el menú de desplegable de la izquierda se selecciona la función *Constant Head*, se delimita la zona deseada y aparece una ventana como la de la Figura 4.17. En esta ventana se indica que, durante los 10 años de la simulación, en la zona seleccionada el nivel freático del acuífero permanecerá constante a 1 metro bajo la superficie del terreno.

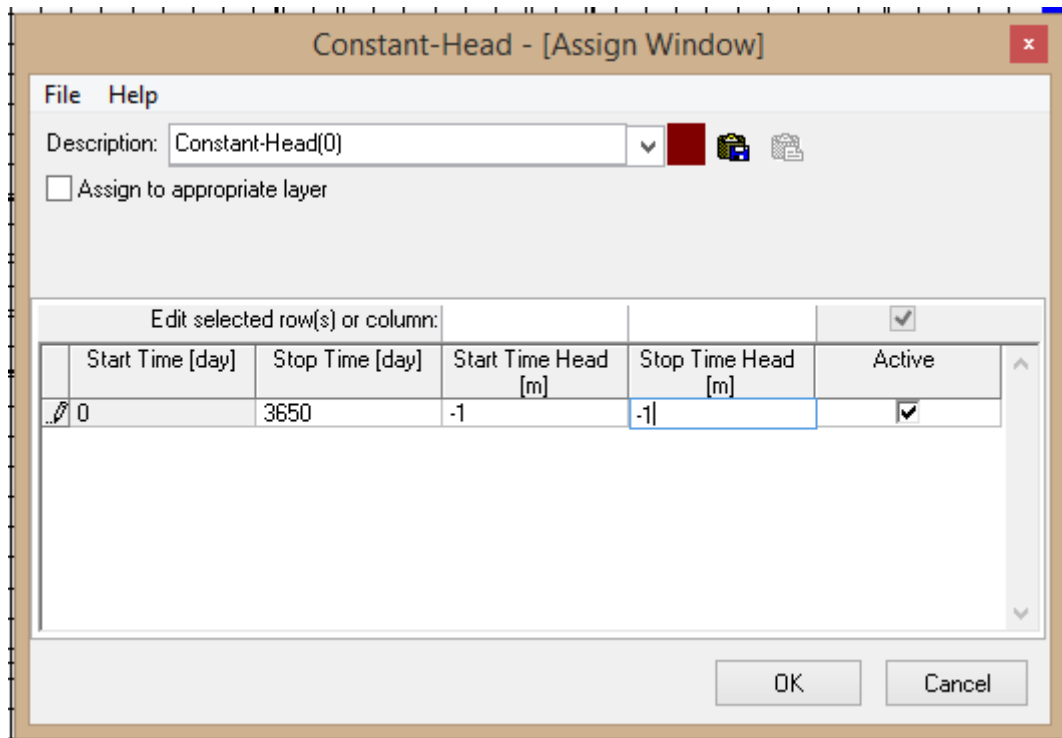


Figura 4.17. Ventana de ajuste de la piezometría constante

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

En el caso de estudio, la zona coloreada de rojo en la Figura 4.18. es la zona con piezometría constante.

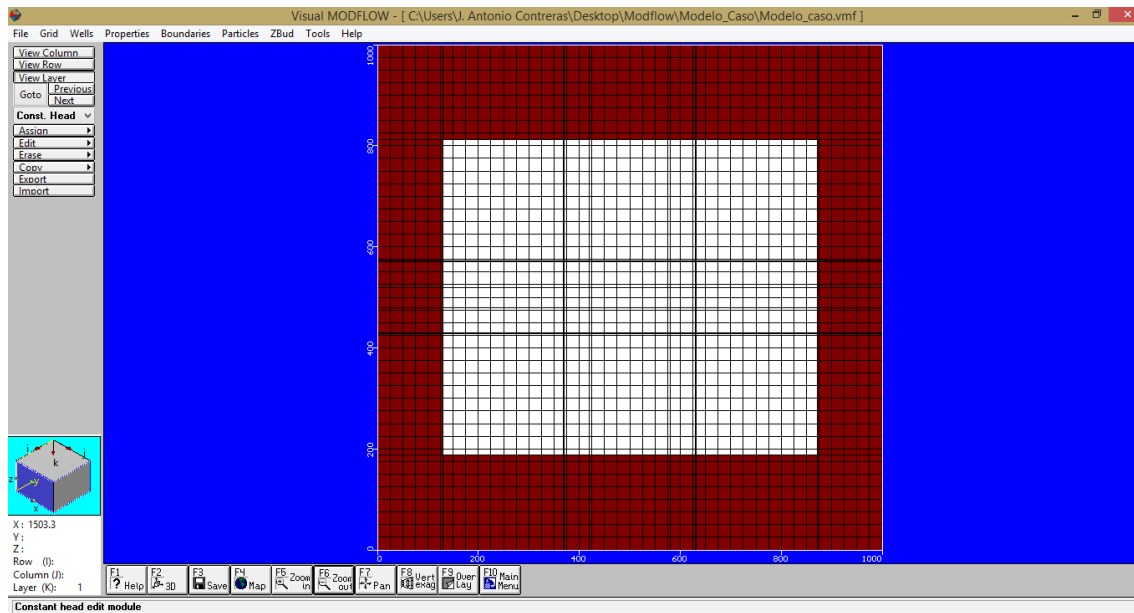


Figura 4.18. Zona con piezometría constante.

Prosiguiendo en la creación del modelo deseado, se ha de utilizar la función *Zone Budget*. Esta función (Balance de Zonas en castellano) calcula balances hídricos de las aguas de zonas que se introduzcan previamente en el modelo, utilizando los resultados de estado estacionario o transitorio. Realiza balances tabulando los datos que Modflow produce utilizando la opción de flujo celda por celda. El usuario simplemente especifica las subregiones para las cuales se realizarán los balances. Estas subregiones se introducen como "zonas" análogas con respecto a las propiedades, tales como la conductividad hidráulica. Después de la simulación, los resultados se pueden ver en el *Output*.

Se ha de seleccionar *Zone Budget* en el menú de la izquierda y delimitar las zonas en las que se va a realizar el balance hídrico. En este caso, las zanjas serán una zona (*Zone 1*) y el resto será otra zona (*Zone 2*). De esta forma, se va a estudiar el caudal movilizado hacia las zanjas para conseguir el abatimiento deseado. En la Figura 4.19. y 4.20. se aprecia claramente la zonificación dispuesta.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

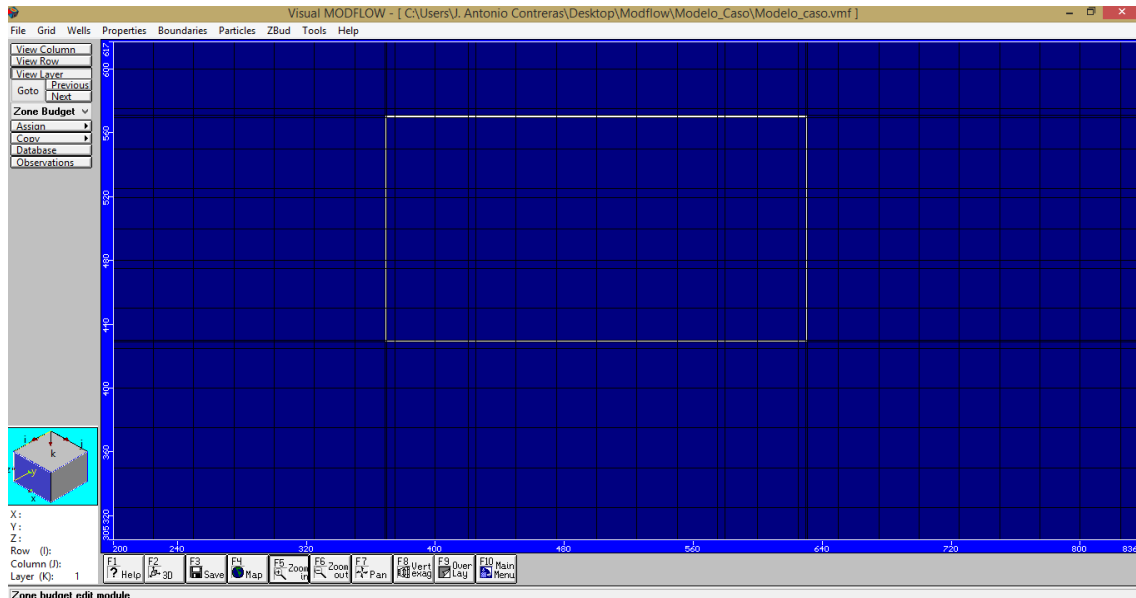


Figura 4.19. Zonificación seleccionada en la función *Zone Budget*

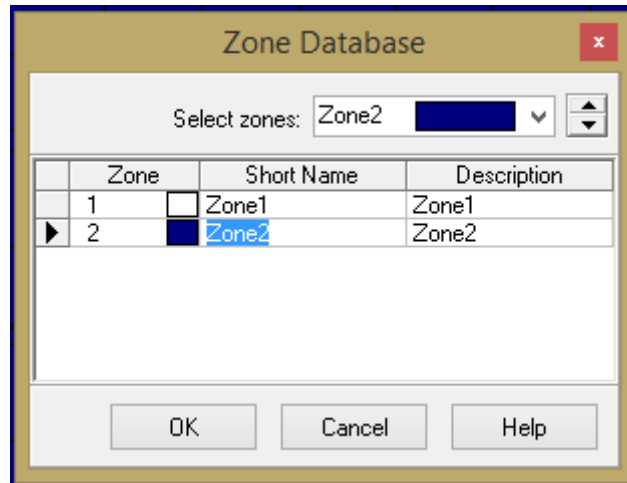


Figura 4.20. Número de zonas y color especificado en la función *Zone Budget*

Además, se van a colocar unos piezómetros para controlar el nivel del agua en la excavación. En concreto se van a colocar 5 piezómetros, uno en cada esquina de la excavación y otro en el centro de la misma. Quedan colocados tal como se aprecia en la Figura 4.21.

Jose Antonio Contreras Jiménez

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

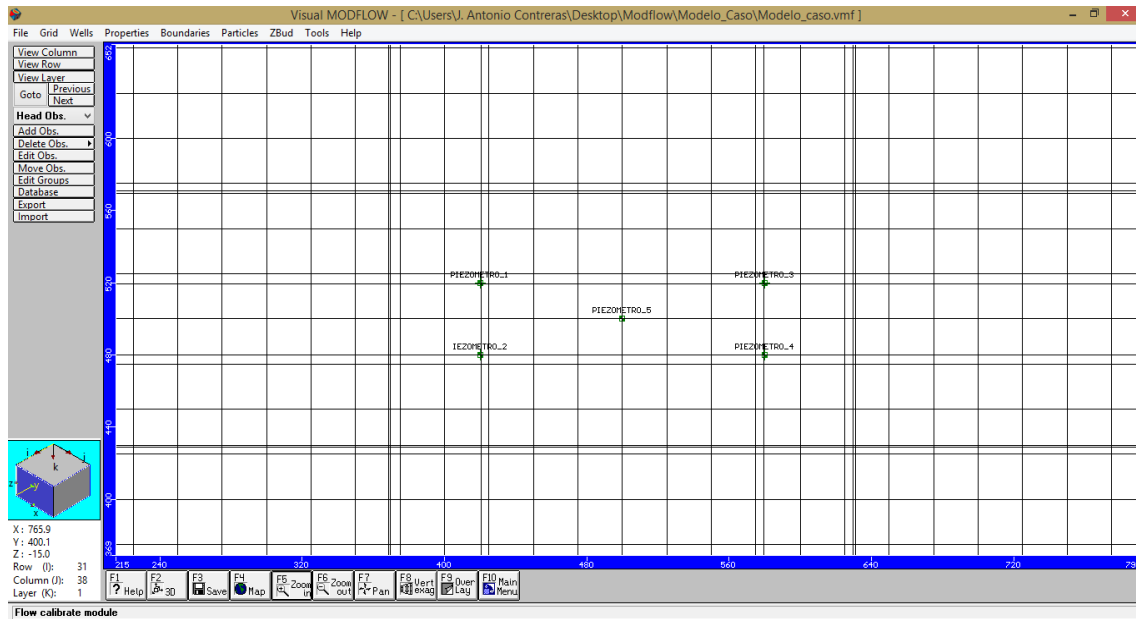


Figura 4.21. Situación en planta de los piezómetros colocados

Para colocar los piezómetros se ha de seleccionar la función *Head Observation* y se abre una ventana como la de la Figura 4.22. En esta ventana se indica la identificación de cada piezómetro, así como a la altura a la que se tomarán las lecturas (*Screen Elevation*). Además se le indica que existen unas lecturas al nivel de abatimiento deseado (-14 metros) para así tener referencia y poder comparar el nivel alcanzado con el nivel deseado.

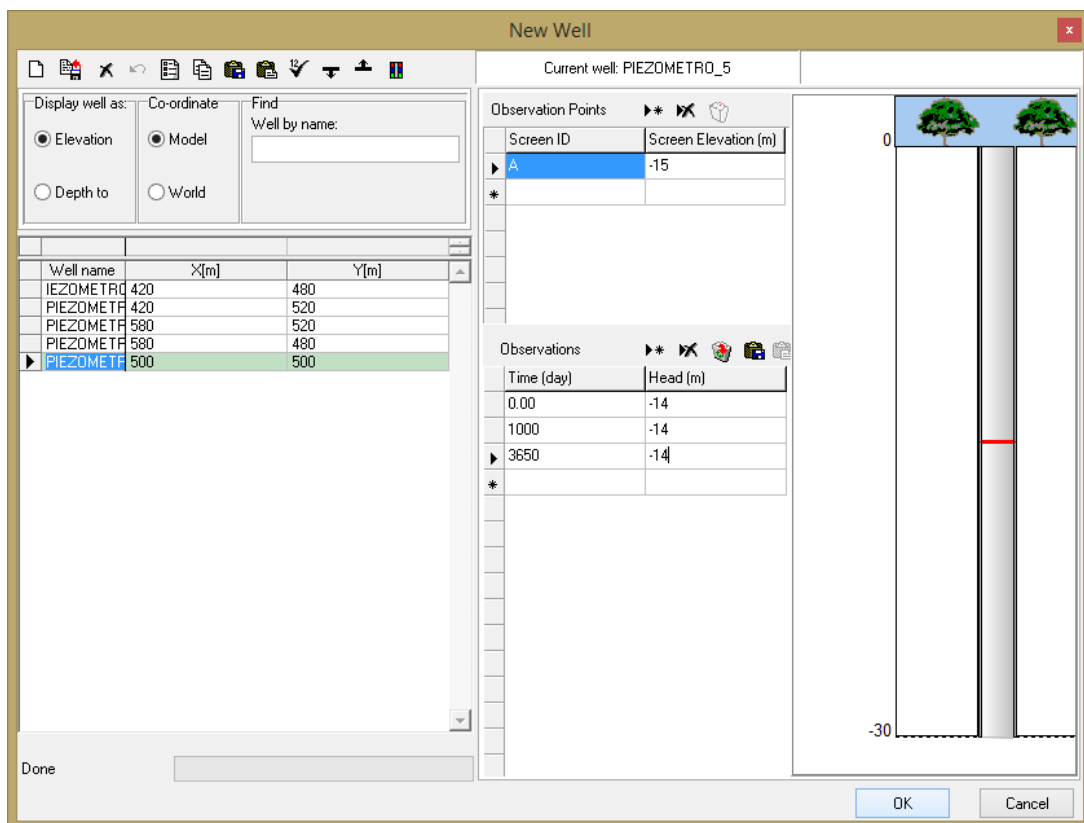


Figura 4.22. Ventana de ajuste de las características de los piezómetros

Para finalizar con el proceso de creación del modelo se va proceder a colocar una serie de partículas para posteriormente, tras la simulación, estudiar su movimiento. Esto se realiza con la función *Particles*. Se va a optar por colocarlas en círculo alrededor de la excavación como se puede observar en la Figura 4.23.

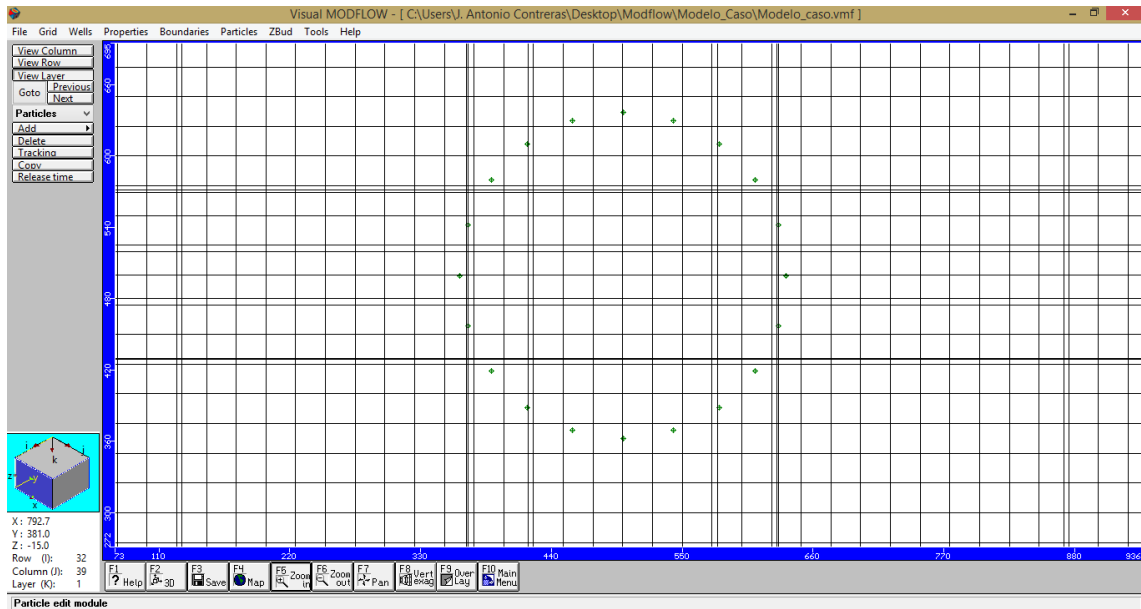


Figura 4.23. Situación inicial de las partículas en el modelo

4.2.2. Simulación del modelo (*Run*)

Una vez introducidos los datos necesarios para completar la creación del modelo deseado en *Input*, se puede proceder a ejecutar la simulación de este modelo. Para ello, es necesario irse al menú principal (*Main Menu*) y ahí se ha de seleccionar el botón *Run*, como se indica en la Figura 4.24.

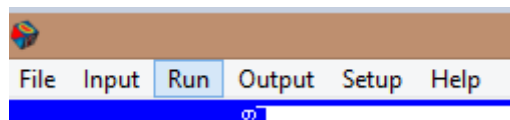


Figura 4.24. Menú principal del programa. Selección de la función *Run*.

Una vez se ha seleccionado el botón *Run*, la pantalla tomará la configuración que se puede apreciar en la Figura 4.25.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

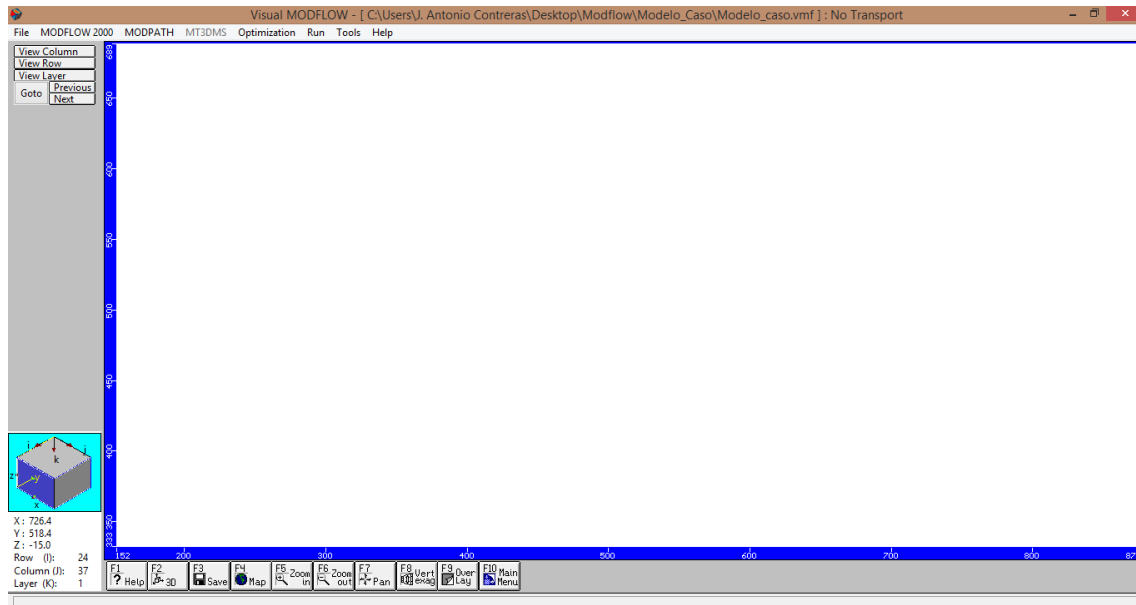


Figura 4.25. Pantalla principal de la función *Run*

En esta pantalla se ha de seleccionar primero, en la barra de arriba, *MODFLOW 2000*. Se abrirá un desplegable donde se ha de seleccionar *Time Steps* y aparecerá una ventana con la de la Figura 4.26. En esta pantalla se puede configurar el número de fases temporales en las que se dividirá cada periodo de funcionamiento del modelo. El programa generará datos de todas las fases que se hayan indicado en esta ventana. En el caso de estudio se introducirán 10 fases para el primero periodo y 30 fases para el segundo periodo.

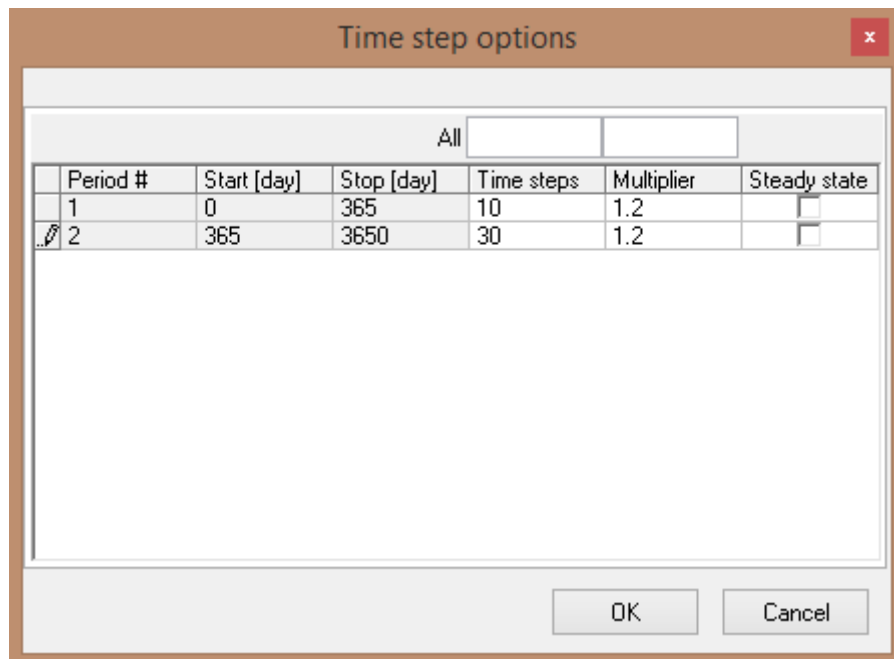


Figura 4.26. Ventana de configuración de periodos o fases temporales en la simulación

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Volviendo a seleccionar el botón de *MODFLOW 2000*, y esta vez haciendo click en *Output Control*, aparecerá una ventana como la de la Figura 4.27. En esta ventana se pueden seleccionar, del número total de fases o *Time Steps* que se han introducido en el paso anterior, cuantas queremos que se muestren en el *Output*. En el caso que se está tratando queremos ver todas las fases, pues cuanto más detalle se tengan de la simulación, mejor.

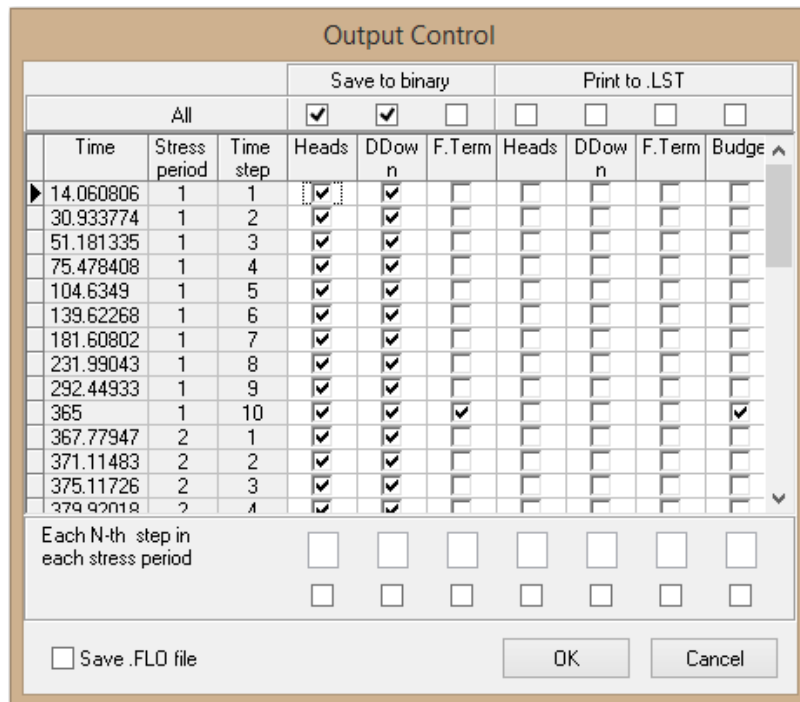


Figura 4.27. Ventana de *Output Control*.

Por último, se procede a ejecutar el modelo clicando en *Run*. Se aparece en la pantalla una ventana como la de la Figura 4.28. En esta ventana se han de seleccionar los paquetes de ejecución que van a trabajar. En el caso en cuestión se ha de seleccionar *MODFLOW 2000*, que sirve para simular el flujo de agua. Además se ha de seleccionar *MODPATH*, para simular el movimiento de partículas, y también *ZoneBudget* para realizar balances hídricos. Para proceder con la simulación se ha de hacer click en *Translate & Run*.

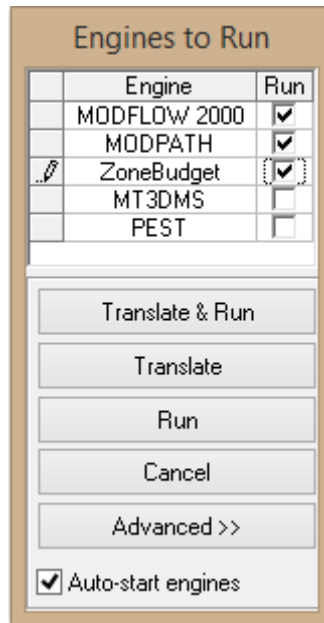


Figura 4.28. Ventana de selección de paquetes de ejecución

4.2.3. Visualización de resultados (*Output*).

Una vez terminada la simulación, es momento de seleccionar al apartado de *Output* (Figura 4.29.) para visualizar y analizar los resultados obtenidos.

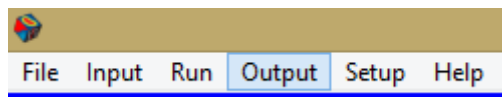


Figura 4.29. Menú principal. Selección de *Output*

Una vez se ha seleccionado *Output*, se verá una pantalla parecida a la de *Input* con un menú desplegable a la izquierda como el que se aprecia en la Figura 4.30. en el que se puede seleccionar el resultado que se quiere visualizar. Además, se pueden visualizar los resultados en el *Time Step* que sea requerido. También se pueden ver los resultados en la fila o columna que se desee.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

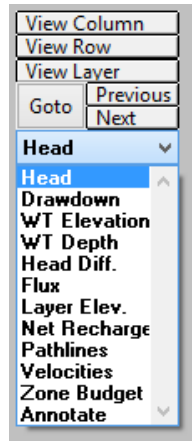


Figura 4.30. Menú desplegable de selección de resultados de la simulación

Para el caso que se está estudiando en este trabajo, se van a mostrar resultados de piezometría, trayectoria de partículas y balance hídrico en la zona anteriormente denominada como Zone 1, las zanjas. Se van a mostrar estos resultados en 3 fases de la simulación para que, de esta forma, se pueda apreciar con claridad el trabajo de las zanjas en el abatimiento del nivel freático del acuífero modelizado.

4.2.3.1. Resultados para el Periodo 1. Time Step 1. (14.060802 días).

Se está al principio del tiempo de simulación, las zanjas drenantes todavía no han empezado a actuar puesto que se indicó en el *Input* que empezaran a trabajar después del primer año, 365 días. En la Figura 4.31. se aprecia como en este *Time Step* no existe movimiento en la piezometría, todo el modelo se encuentra en las condiciones iniciales.

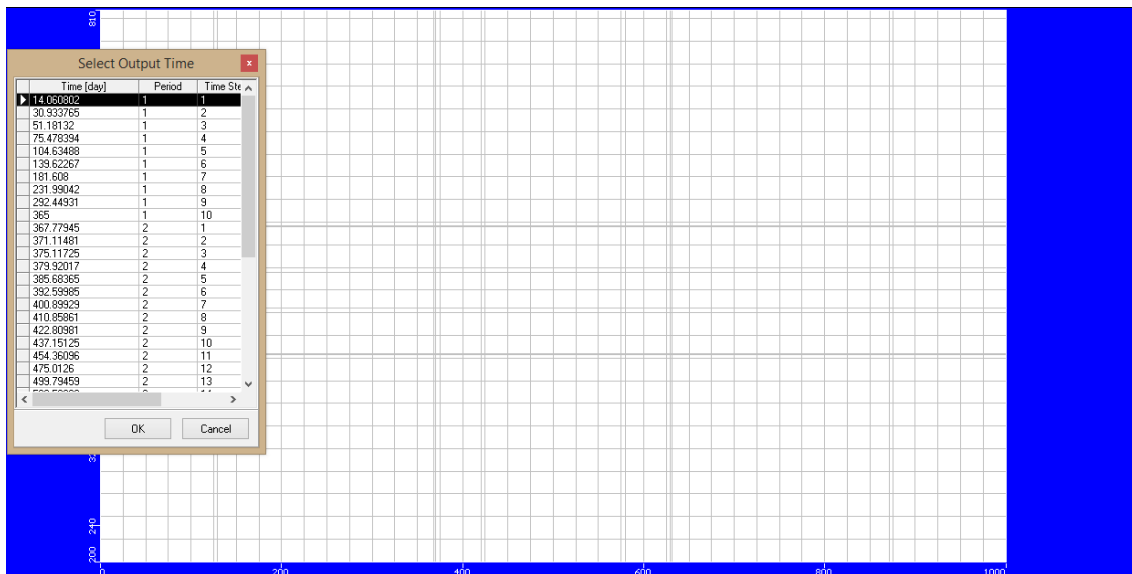


Figura 4.31. Situación de la piezometría el principio del tiempo de simulación

En la Figura 4.32. se ve en más detalle la fila central de la excavación en el modelo creado. Como se observa claramente, el nivel de agua está 1 metro bajo la superficie del terreno.

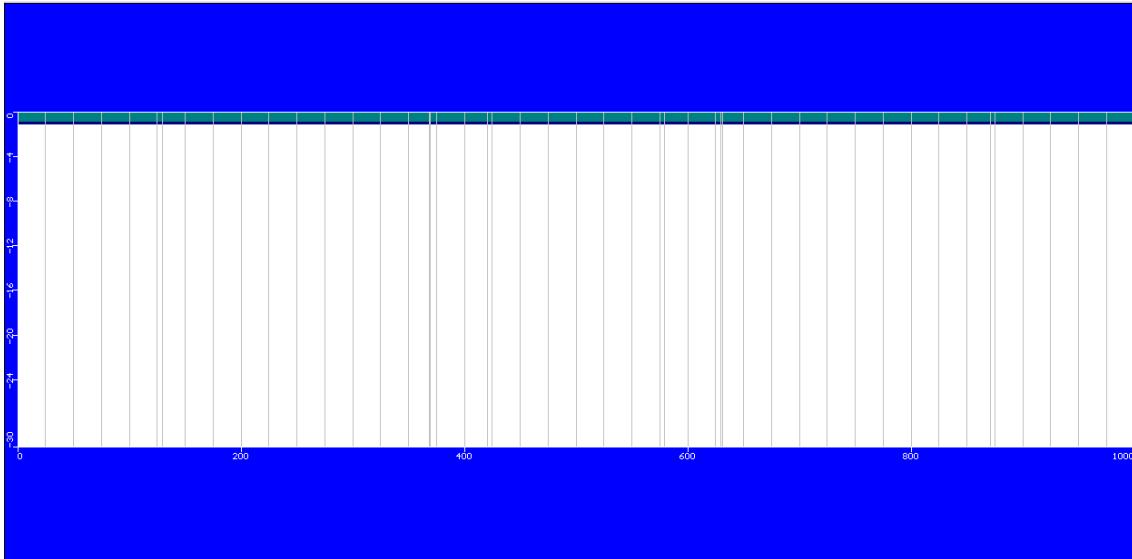


Figura 4.32. Situación de la piezometría en la excavación al inicio del tiempo de simulación

Además tampoco existirá velocidad en el agua, puesto que aún no hay movimiento. En cuanto a las partículas que se colocaron en círculo alrededor de la excavación para estudiar su movimiento, por el momento permanecen estáticas.

El balance de aguas entre las dos zonas especificadas en el *Input* es cero para este *Time Step*.

4.2.3.2. Resultados para el Periodo 2. *Time Step* 1. (367.77495 días).

Este *Time Step* se corresponde ya con una fase de la simulación en la que las zanjias drenantes están funcionando. En concreto, llevan algo más de dos días funcionando. En la Figura 4.33. se puede ver la situación en planta de la piezometría para este tiempo. Por su parte, en la Figura 4.34. se puede apreciar la situación de la piezometría en la excavación.

Además, en la Figura 4.35a se observar como es la distribución de las velocidades en el agua durante este *Time Step*.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

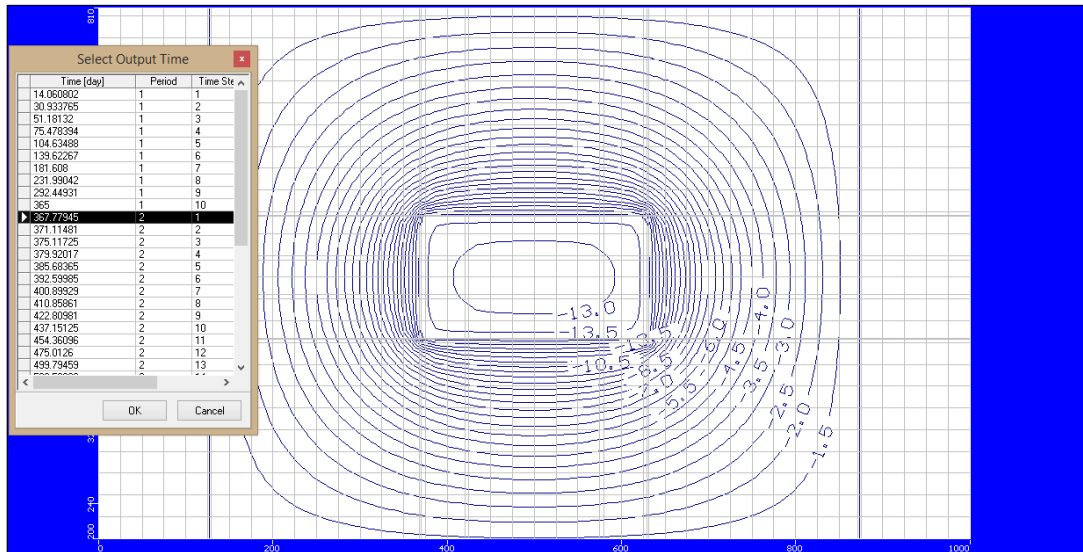


Figura 4.33. Situación de la piezometría en el modelo para el inicio del Periodo 2 de la simulación

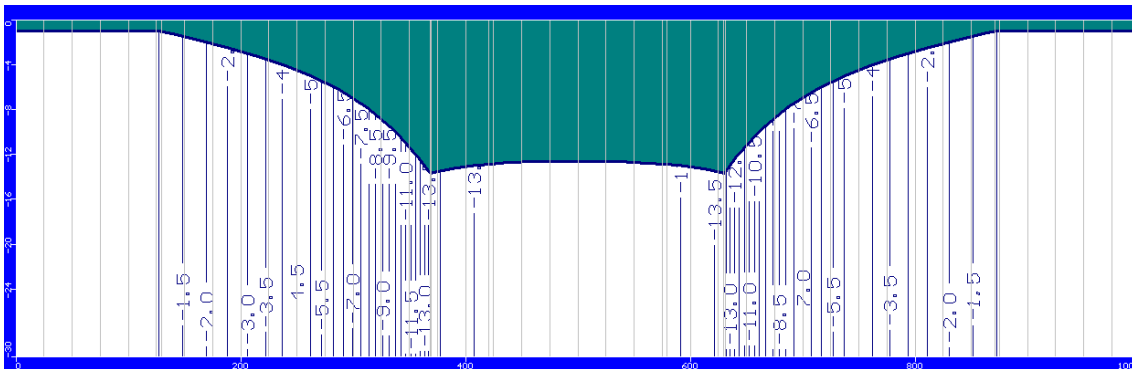


Figura 4.34. Situación de la piezometría en la excavación en el inicio del Periodo 2 de la simulación

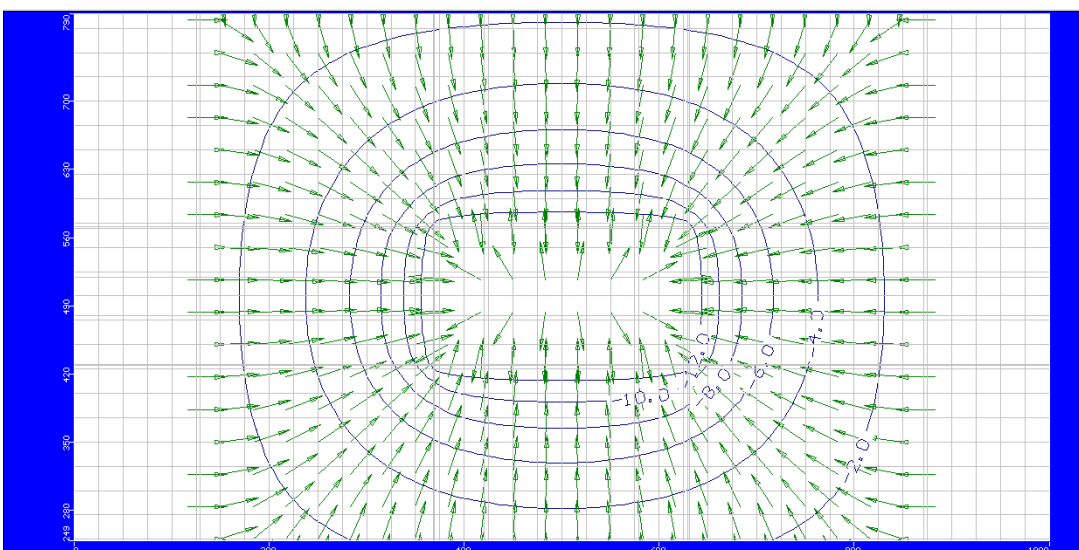


Figura 4.35a. Distribución de velocidades del agua en el modelo durante el inicio del Periodo 2 de la simulación

En cuanto al balance hídrico en este *Time Step*, en la Figura 4.35b. se puede apreciar el balance para la zona que interesa analizar, las zanjas.

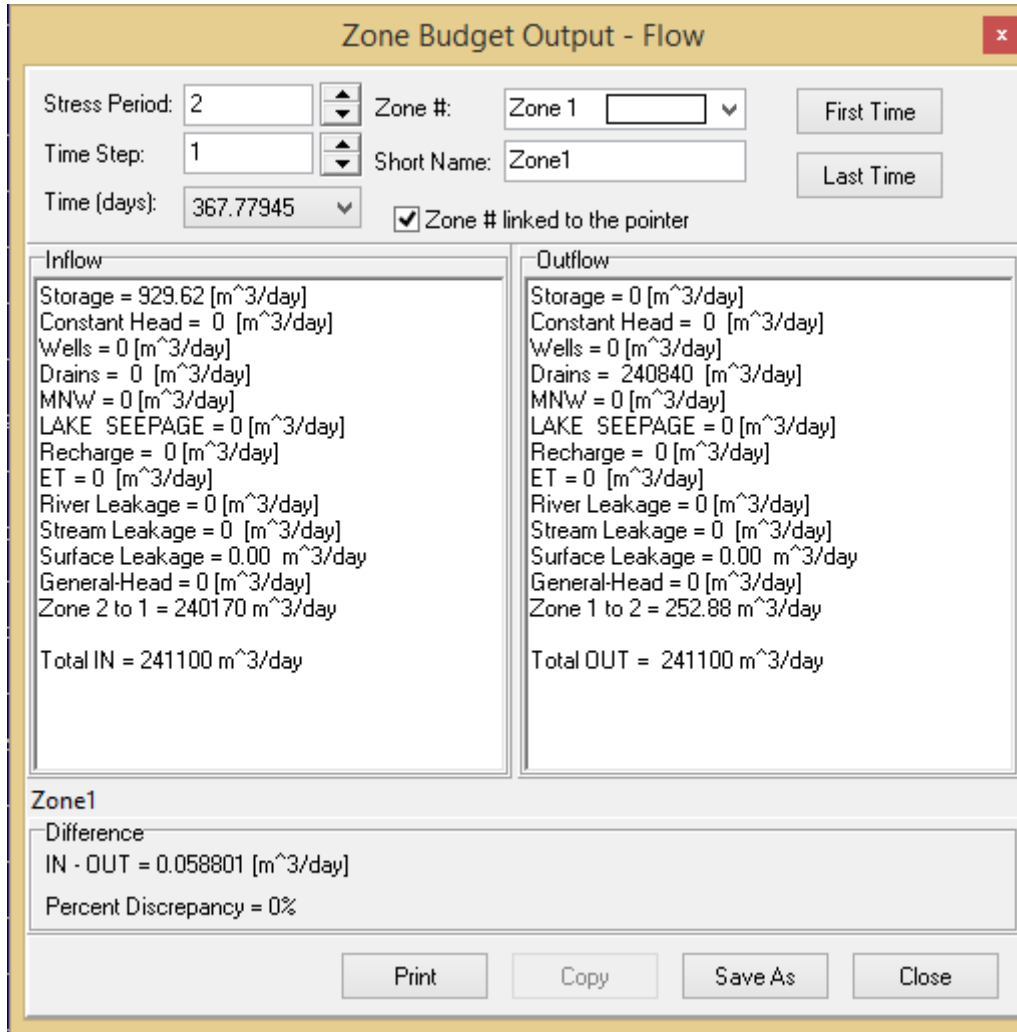


Figura 4.35b. Balance hídrico en la Zona 1 para el inicio del Periodo 2 de la simulación

4.2.3.3. Resultados para el Periodo 2. *Time Step* 30. (3650 días)

Los resultados que se van a presentar son los resultados definitivos de la simulación, puesto que el *Time Step* 30 es el último de la simulación del modelo que se ha creado anteriormente.

Como en los *Time Step* presentados antes, se presenta la situación de la piezometría en el modelo en planta (Figura 4.36.), la piezometría en la fila central de la excavación (Figura 4.37.), la distribución de velocidades del agua en el modelo (Figura 4.38.) y el balance hídrico definitivo en la zona de zanjas (Figura 4.39.)

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

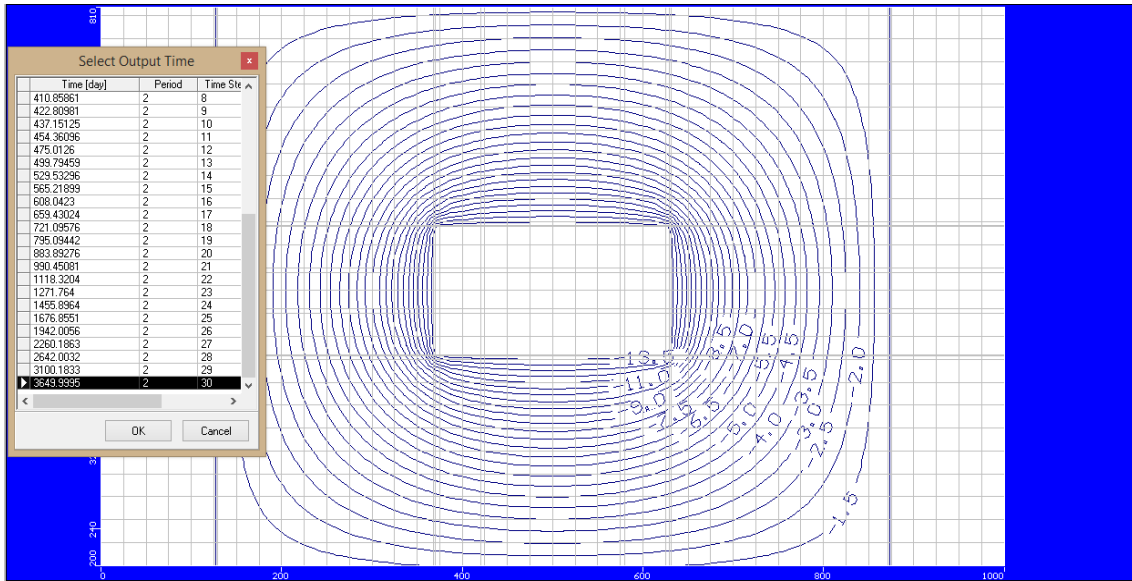


Figura 4.36. Situación de la piezometría en el modelo al final del tiempo de simulación

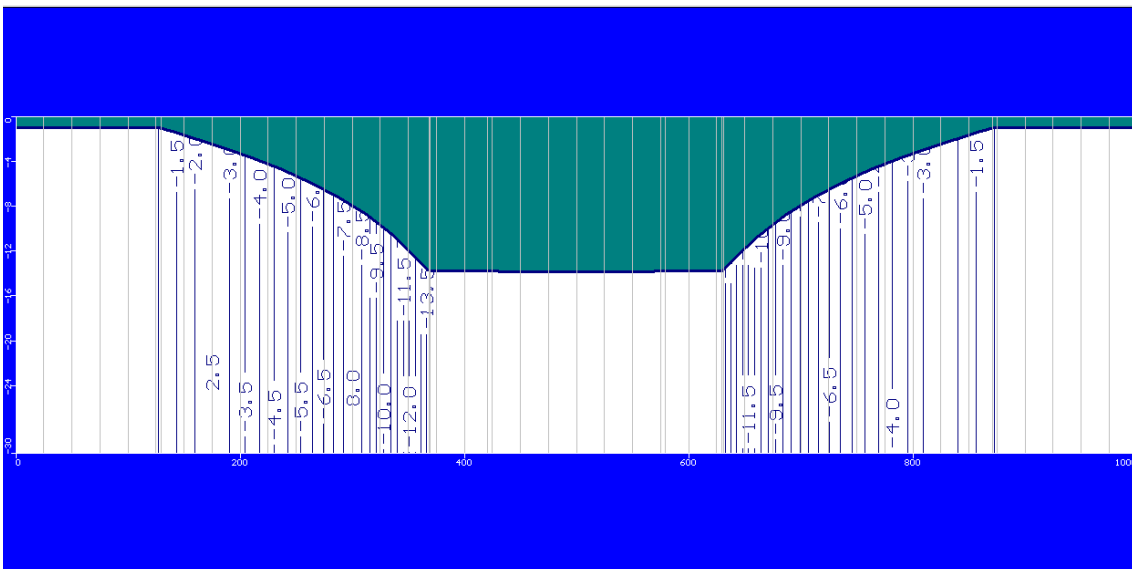


Figura 4.37. Situación de la piezometría en la excavación al final del tiempo de simulación

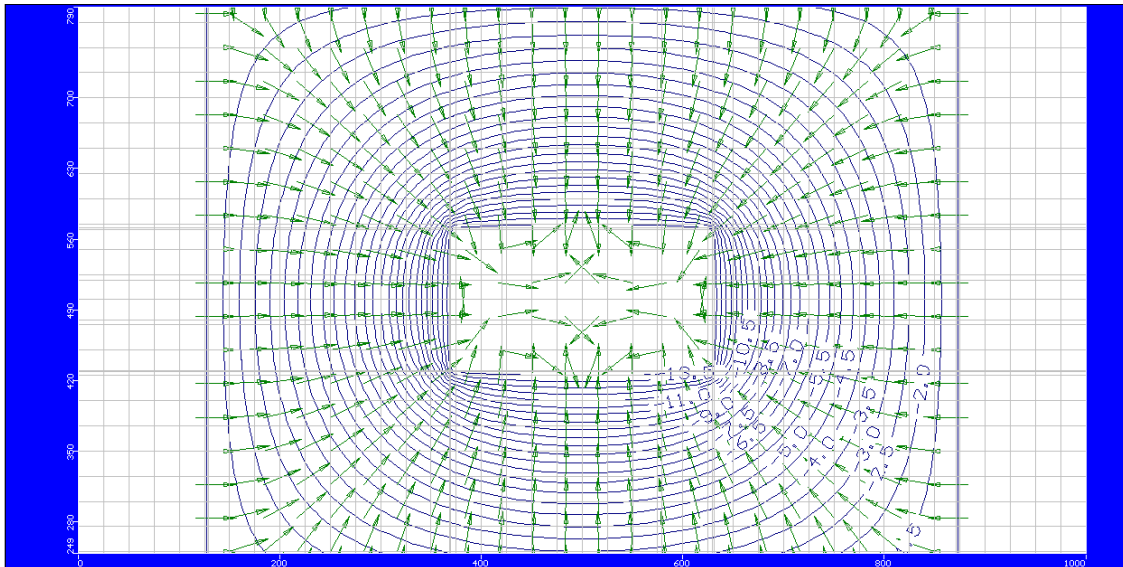


Figura 4.38. Distribución de velocidades del agua al final del tiempo de simulación

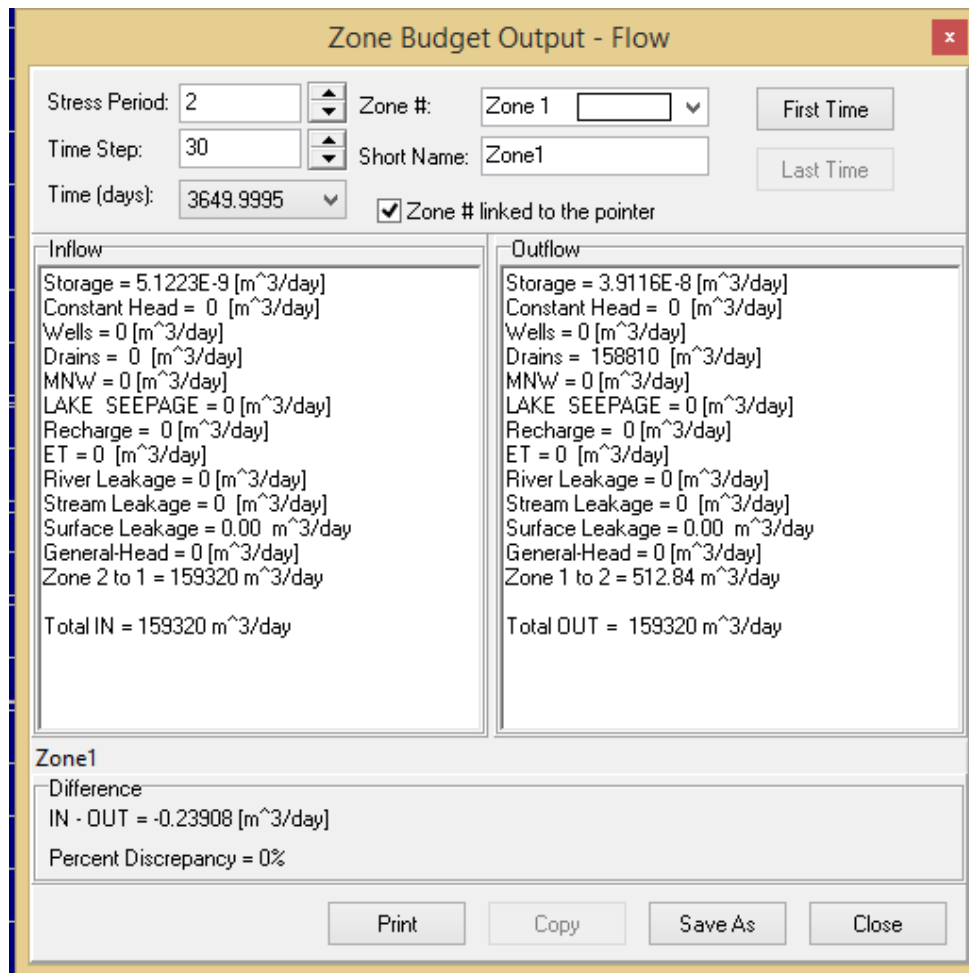


Figura 4.39. Balance hídrico en la zona de zanjas al final del tiempo de simulación

Por su parte, el movimiento de las partículas al final de toda la simulación es el que se muestra en la Figura 4.40.

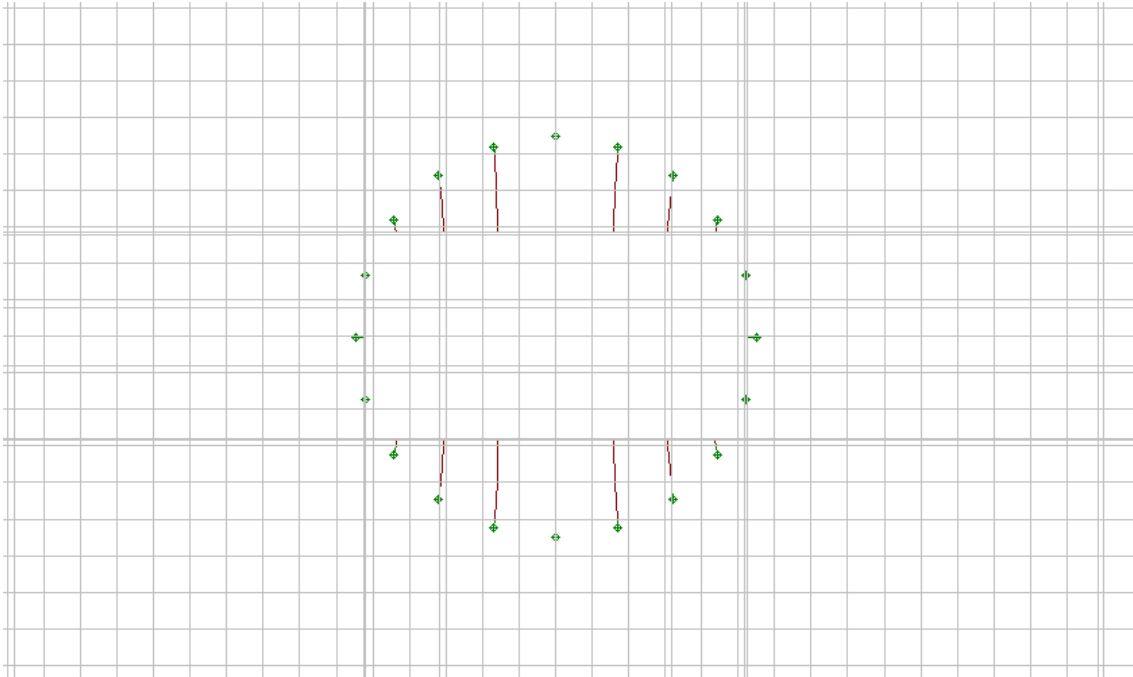


Figura 4.40. Trayectoria de movimiento de las partículas en el modelo

Por último, recordemos que se colocaron cinco piezómetros en la fase de *Input*. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

En las Figuras 4.41. y 4.42. se pueden ver las lecturas del piezómetro 5, situado en el centro de la excavación. La línea negra de abajo representa el nivel piezométrico objetivo de -14 metros.

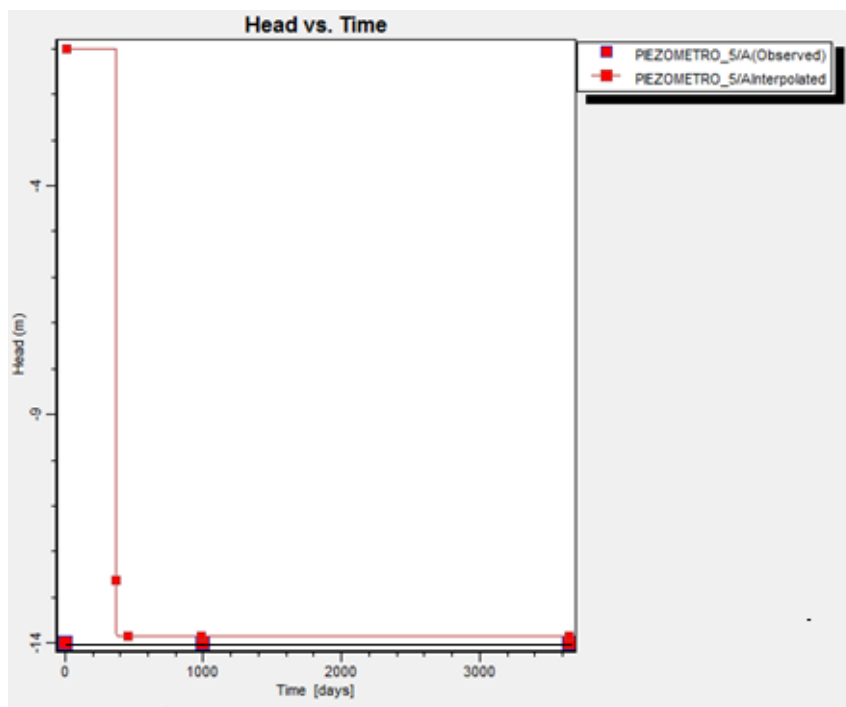


Figura 4.41. Lecturas del piezómetro 5

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

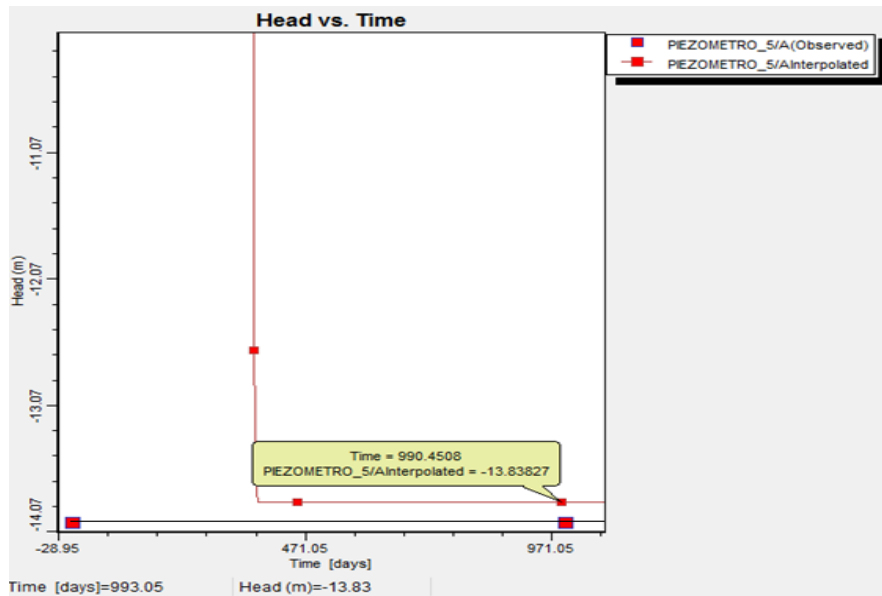


Figura 4.42. Lecturas del piezómetro 5 con más detalle

Además, en la Figura 4.43. se aprecia la lectura de los cinco piezómetros.

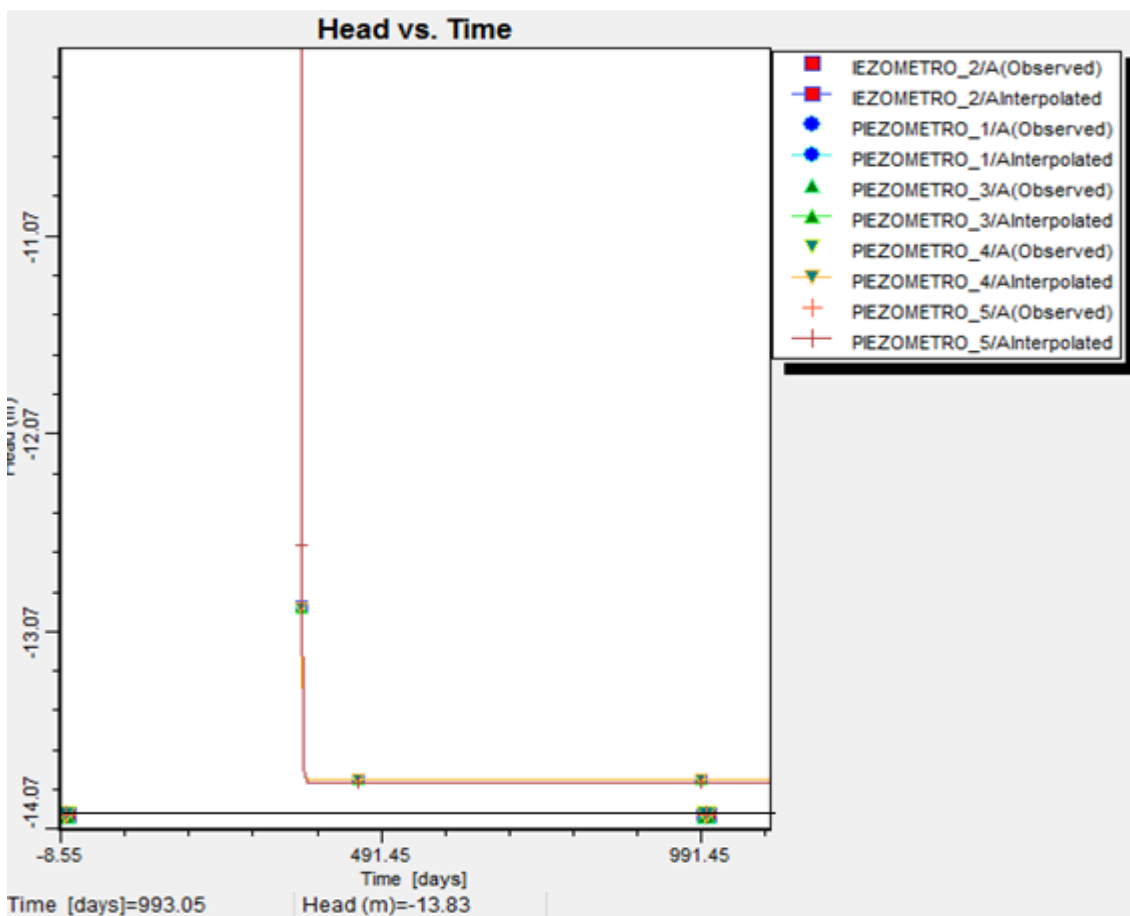


Figura 4.43. Lecturas de los 5 cinco piezómetros colocados en el modelo

4.2.4. Visualización del modelo en 3D.

Merece la pena comentar los resultados que ofrece un modo muy gráfico que tiene el programa, que consiste en poder visualizar tanto el modelo como los resultados en 3D, lo cual resulta muy gráfico e interactivo y es de gran utilidad a la hora de poder ver con más perspectiva el modelo que se está analizando. Pulsando la tecla F2 o en la barra de herramientas inferior la opción 3D, aparecerá una nueva ventana donde podemos trabajar con las distintas opciones que ofrece.

El menú principal para manejar este modo es el que se puede observar en la Figura 4.45. En este menú se puede seleccionar la carpeta que se desee introducir o modificar y aparecerán justo debajo las distintas características del parámetro que se pretende introducir o modificar.

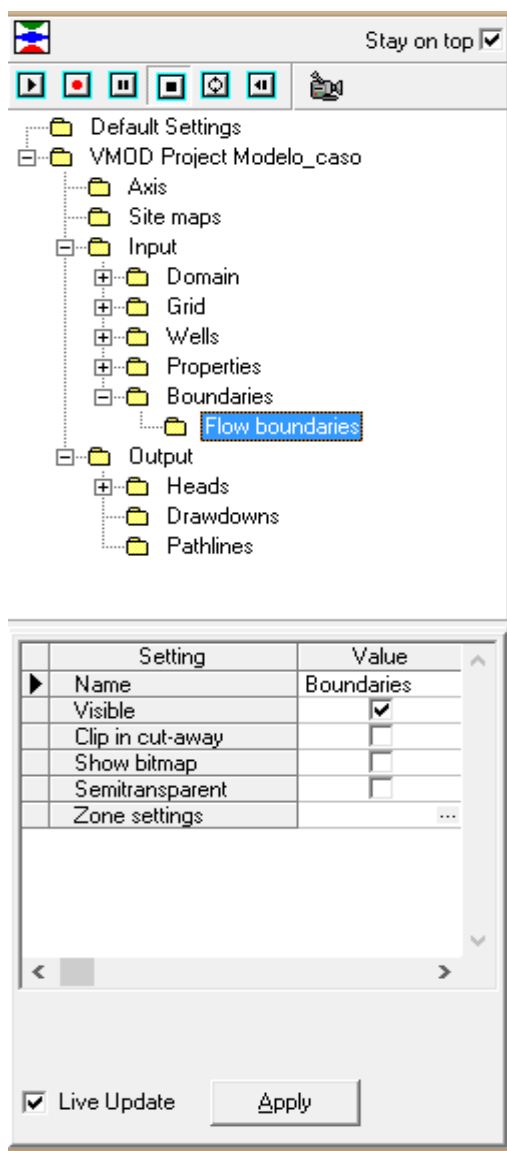


Figura 4.44. Menú principal de manejo del modo 3D

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Además se puede modificar la vista en un menú del mismo tipo del que aparece en la Figura 4.45, pudiendo rotar 'Rotate' o mover 'Shift' la posición en cualquiera de los 3 ejes, cambiar la posición de incidencia de la luz 'light position' o modificar el periodo de tiempo 'time' al que pertenece la imagen en pantalla, según los periodos en que fue dividida anteriormente en la fase de 'Run'.

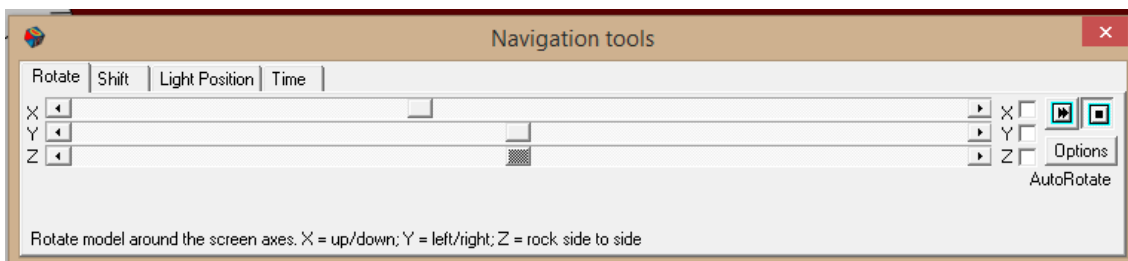


Figura 4.45. Menú para modificar la visualización del modelo en 3D

Así pues, una vez explicado de forma breve el manejo del modo 3D de Modflow, ya se puede ver el modelo que se está estudiando en el presente trabajo en 3D. En la Figura 4.46 se ven las dimensiones generales que se introdujeron al principio de la modelización (1000m x 1000m x 30m):

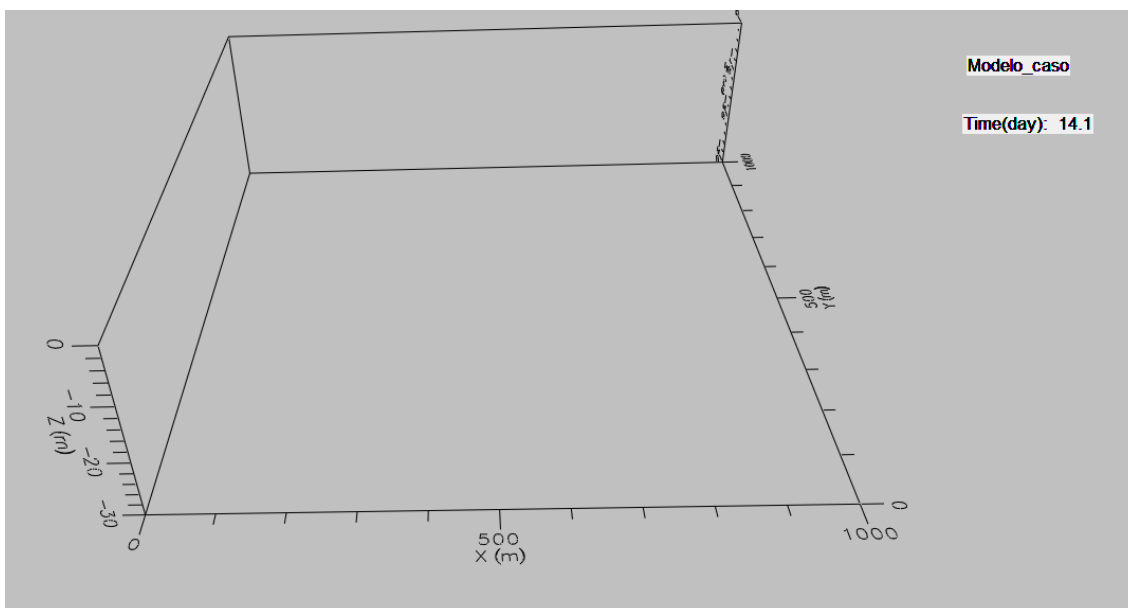


Figura 4.46. Dimensiones del modelo a estudio visto en 3D

En la Figura 4.47. se pueden observar las condiciones de contorno iniciales del modelo, esto es, las zanjas o drenes que rodean la excavación (parte coloreada de gris) y las zonas de piezometría constante a -1 metros del nivel de superficie (parte coloreada de rojo)

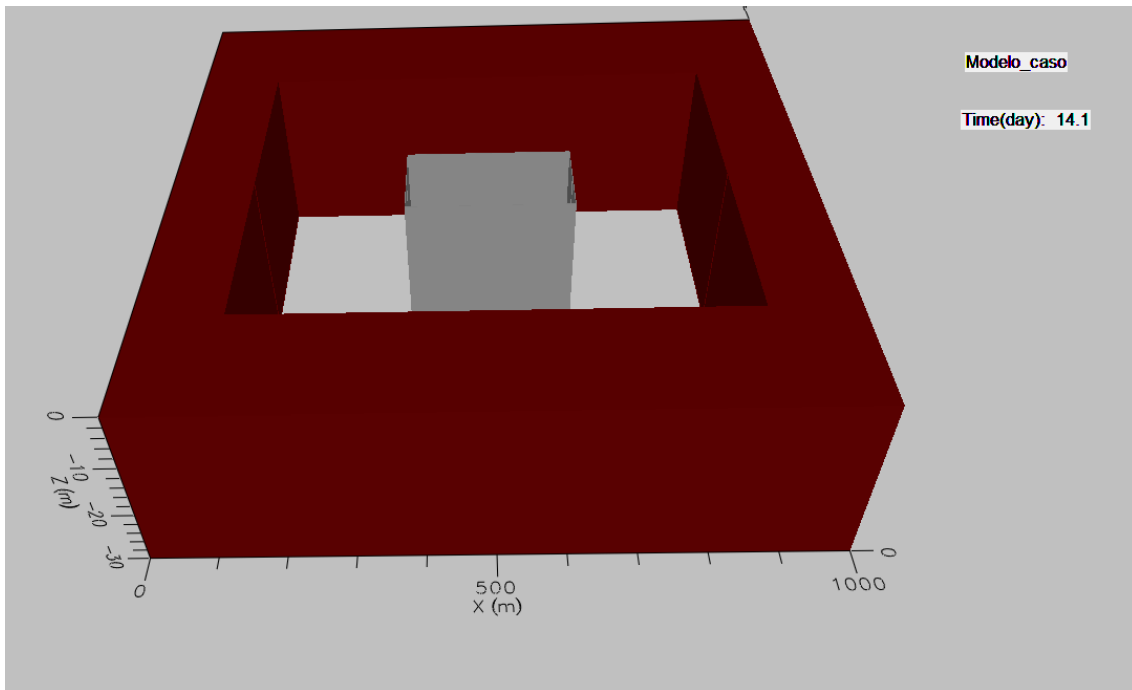


Figura 4.47. Condiciones de contorno en el modelo visto en 3D

Recordando un poco, también se colocaron anteriormente un total de 5 piezómetros situados uno en cada esquina de la excavación y otro en el centro de la misma. En la Figura 4.48. se observa en 3 dimensiones donde quedan:

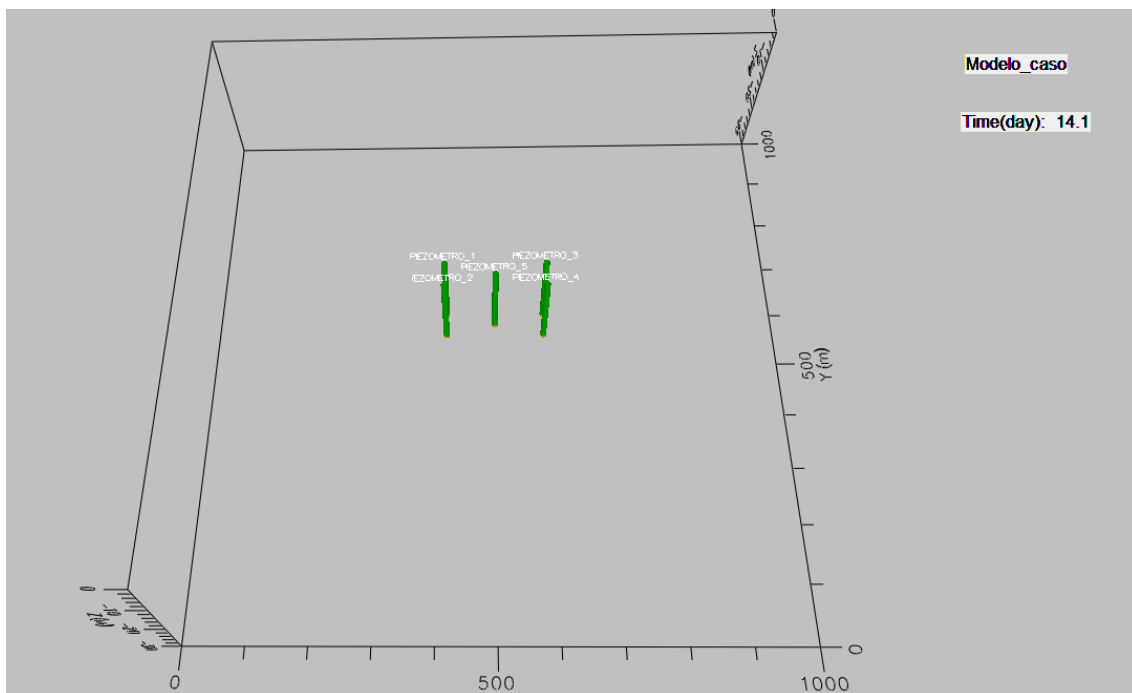


Figura 4.48. Visualización en 3D de la posición de los piezómetros

En la Figura 4.49. se ve como está el nivel de la masa de agua en el acuífero en el instante inicial del proceso simulado:

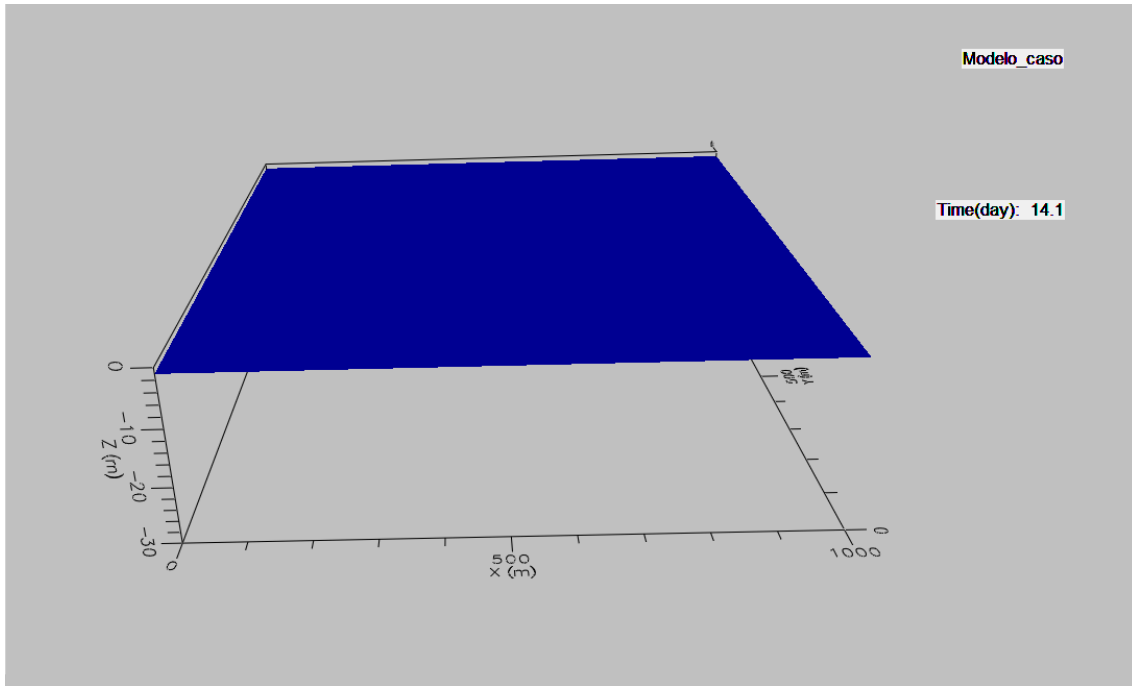


Figura 4.49. Nivel inicial de la masa de agua en el modelo.

Una de las funciones de las que se pueden disponer en el modo 3D de Modflow es la de poder poner una escala de colores que varíe según la profundidad del agua en el modelo, siendo de esta manera mucho más gráfico y de apreciación mucho más directa de los resultados. En las Figuras 4.50. y 4.51. se puede apreciar como estaría el proceso de rebajamiento del nivel freático en un instante justo después de que las zanjas comiencen a funcionar:

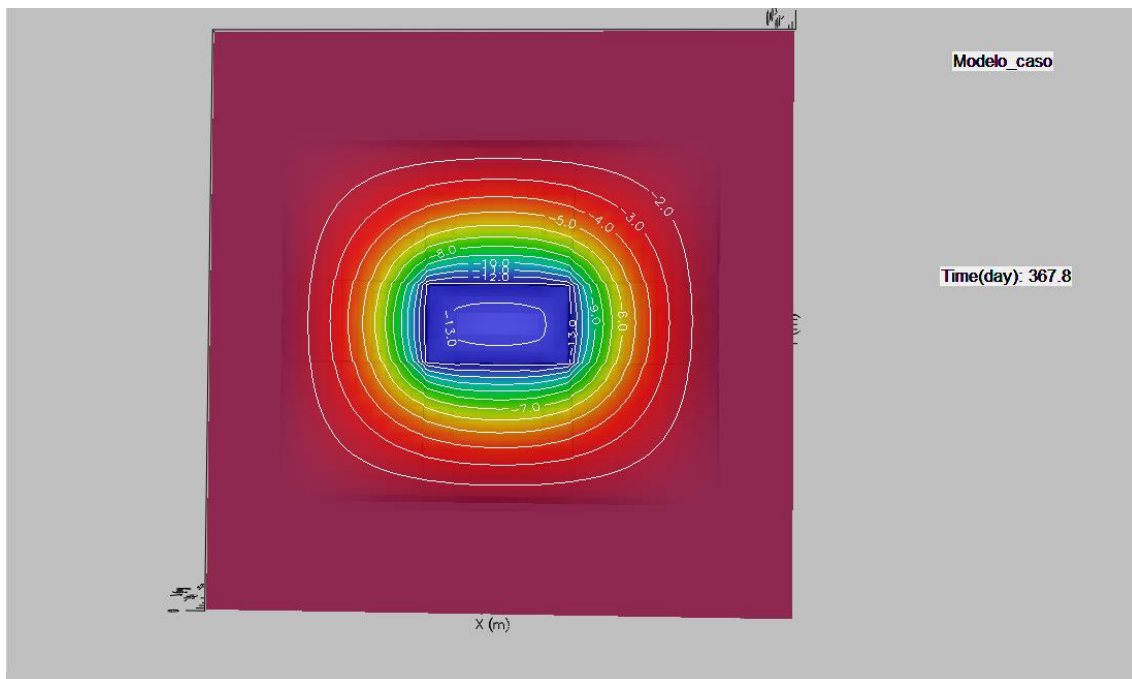


Figura 4.50. Vista superficial del modelo en un instante determinado

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

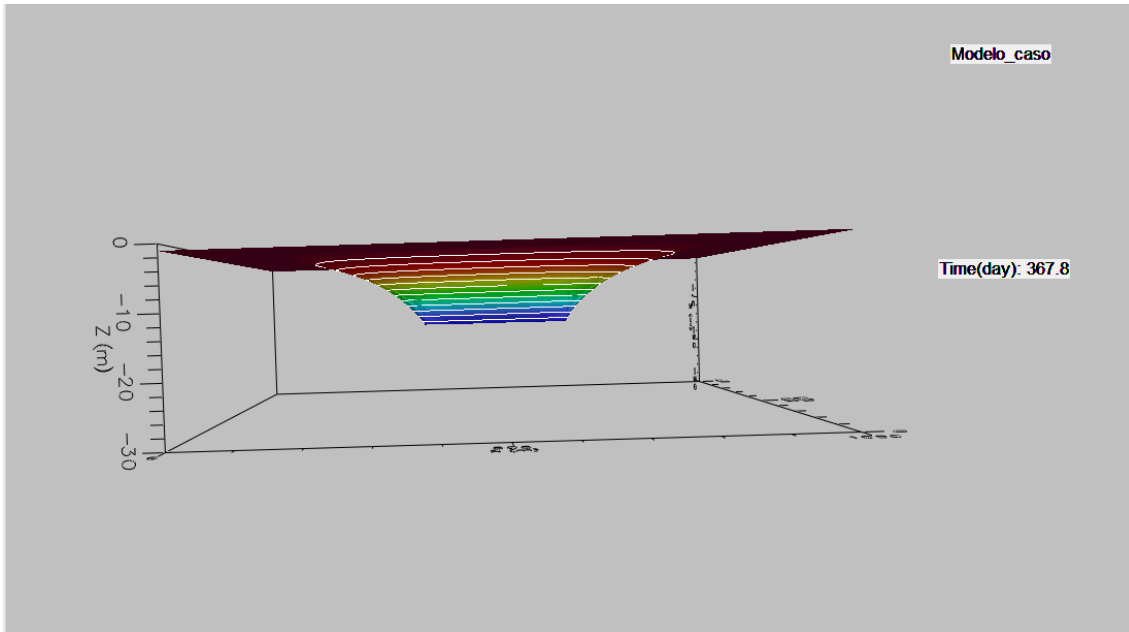


Figura 4.51. Vista lateral del modelo en un instante determinado.

Pero vayamos a lo que realmente nos interesa que es visualizar el resultado de la simulación del modelo creado al final del proceso, con estado estacionario. En la Figura 4.52. se puede ver cómo queda el modelo al final del tiempo de simulación, es decir, al cabo de 10 años o 3650 días.

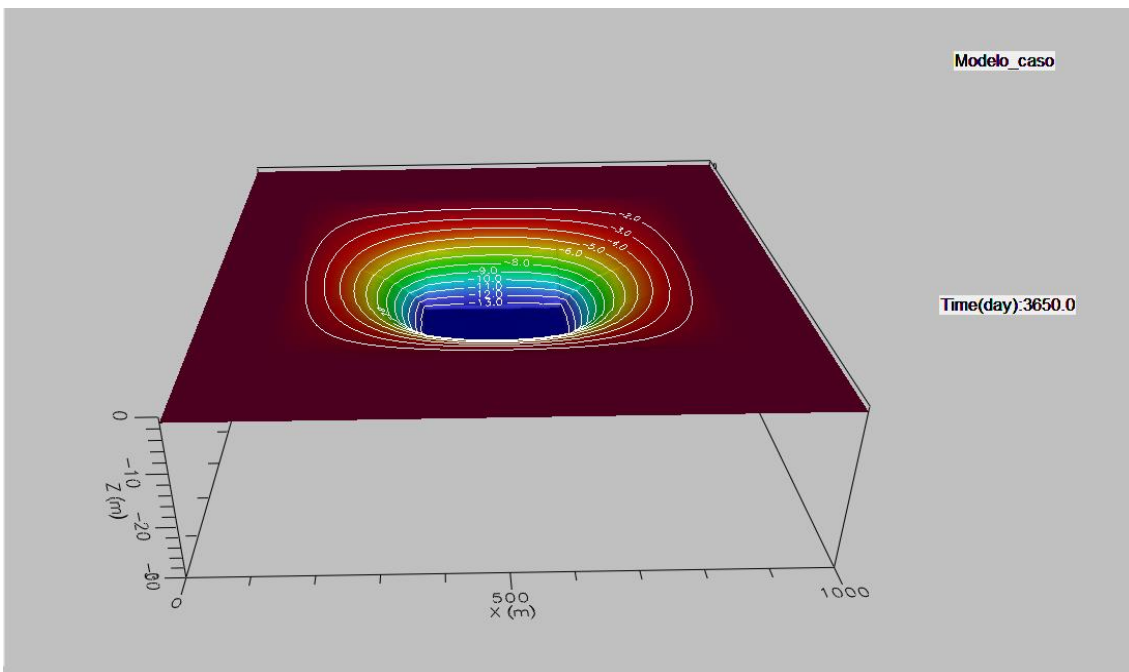


Figura 4.52. Estado final del modelo de estudio

Si se procede a colocar las zanjas que han servido para realizar el abatimiento como referencia, se obtienen las visualizaciones de las Figuras 4.53. y 4.54.

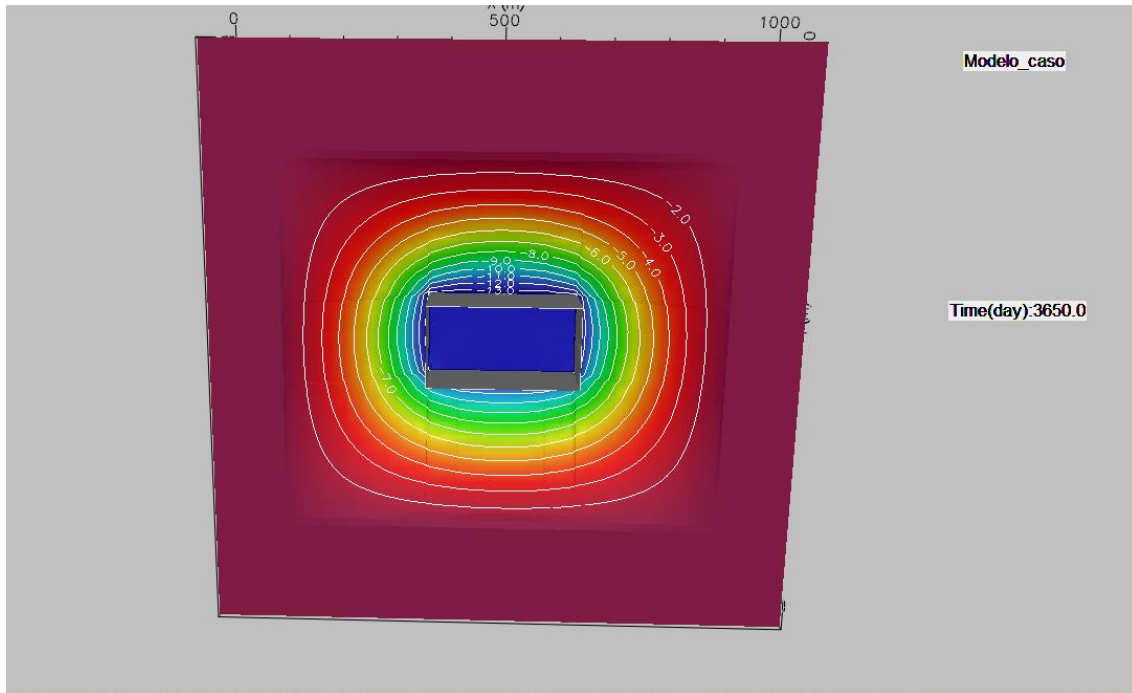


Figura 4.53. Vista superficial del abatimiento con las zanjas como referencia

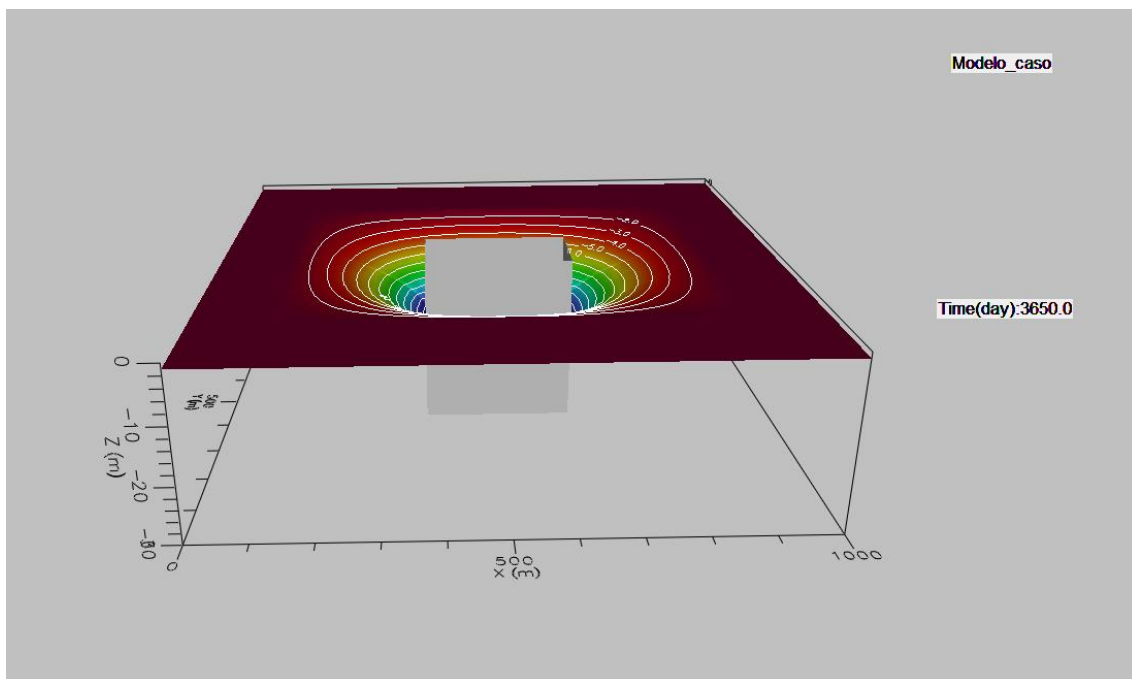


Figura 4.54. Visualización del abatimiento con las zanjas como referencia.

Otra función de enorme utilidad que ofrece el modo 3D de Modflow es la posibilidad de realizar cortes en la situación que se crea conveniente con objeto de tener más detalle de los resultados obtenidos en esa zona. En este caso, se ha procedido a realizar un corte que pase por el centro de la excavación. El resultado de esto se observa en la Figura 4.55.:

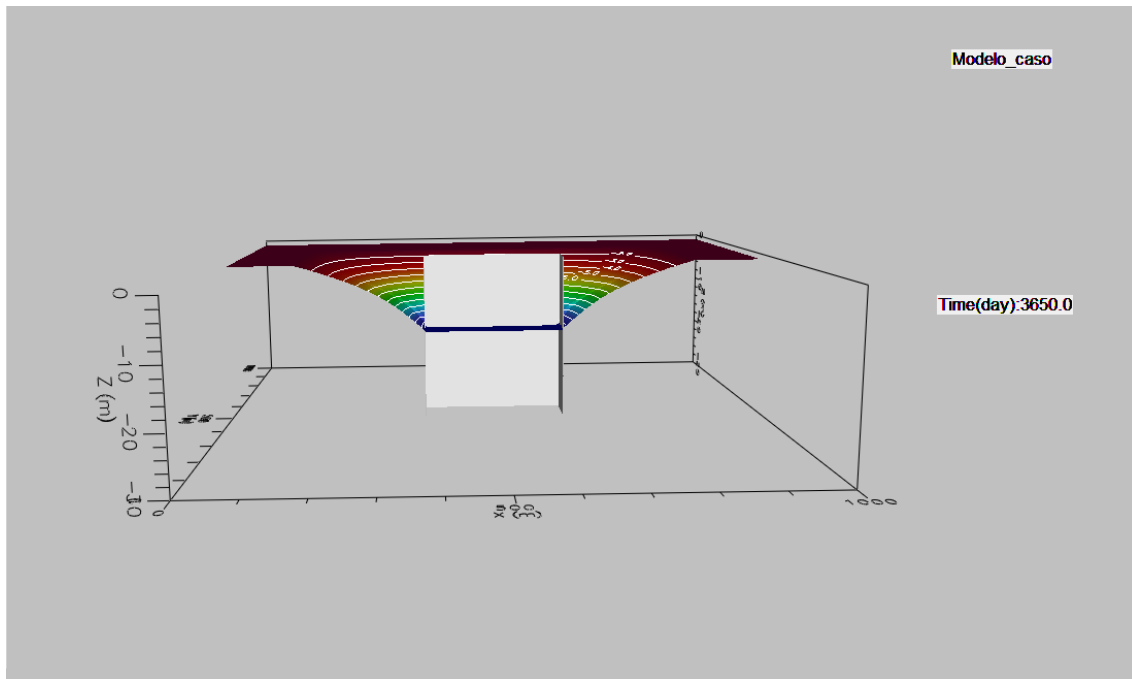


Figura 4.55. Corte del modelo que pasa por el centro de la excavación

4.3. Comparación entre solución analítica y numérica. Discusión de los resultados obtenidos.

Una vez situados en esta parte del trabajo de análisis del caso en cuestión, calculadas las soluciones tanto de forma analítica como de forma numérica y habiendo mostrado la cantidad de modos y funciones de enorme utilidad que Moflow ofrece, se procederá a comparar y analizar las soluciones obtenidas.

Se han obtenido en los procesos anteriores dos resultados de caudales que son necesarios extraer de las zanjas para conseguir el abatimiento deseado de -14 metros.

El caudal obtenido mediante la solución analítica (Apartado 4.1. del presente trabajo) es:

$$Q_{analítica} = 98565.12 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por su parte, el caudal obtenido mediante la solución numérica (Figura 4.39.) es:

$$Q_{numérica} = 159320 \text{ m}^3/\text{día}$$

Comparando ambos caudales, se puede apreciar la existencia de una diferencia notable entre ambos. Concretamente, la diferencia entre ambos caudales es:

$$Q_{diferencia} = 159320 \text{ m}^3/\text{día} - 98565.12 \text{ m}^3/\text{día} = 60754.88 \text{ m}^3/\text{día}$$

Lo que supone una diferencia más que considerable, en concreto, un 38.13%.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Vista esta gran diferencia, cabe hacerse la pregunta: ¿a qué se debe este desfase tan importante?

Lo primero que uno se puede plantear es que la solución analítica escogida, es decir, la Ley de Darcy no es aplicable o no simula bien el proceso que está ocurriendo en el caso de estudio. Para comprobar si la metodología de cálculo analítico escogida es la adecuada, se plantea el caso básico de la Figura 4.56.:

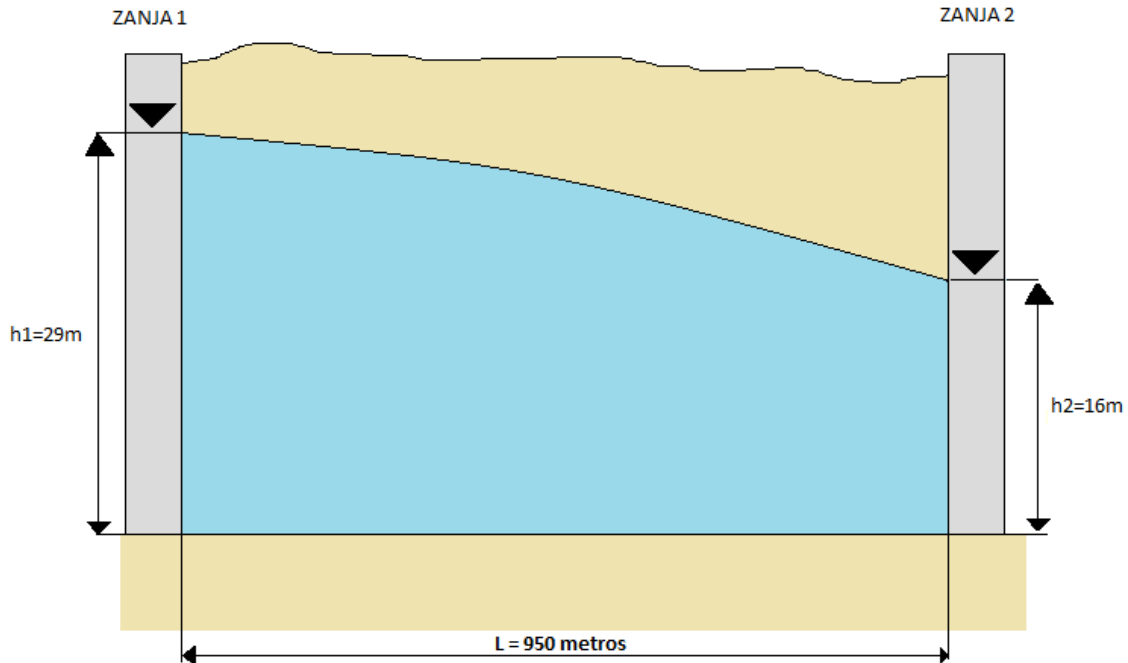


Figura 4.56. Caso particular de aplicación de la Ley de Darcy

Como se observa, se tienen 2 zanjas espaciadas 950 metros entre sí. La zanja de la izquierda tiene el nivel freático con una altura de 29 metros, mientras que la de la derecha tiene 16 metros de altura de agua. Se tiene una $K=1.17 \times 10^{-3}$ m/s y una longitud de zanja de 1000 metros lineales. Aplicando la expresión que ha resultado del procedimiento de deducción del Apartado 2.6., resulta:

$$Q = \frac{k}{2L} (h_a^2 - h_b^2)$$

$$Q = \frac{1.17 \times 10^{-3} \frac{\text{metros}}{\text{segundo}}}{2 * 950 \text{ metros}} (29^2 \text{ metros} - 16^2 \text{ metros}) = 3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$$

Como se tienen 1000 metros lineales de zanja y pasando a m³/día, resulta un caudal de:

$$Q = 31104 \text{ m}^3/\text{día}$$

Ahora bien, se tiene que simular el caso utilizando Modflow, para así poder comparar ambos resultados obtenidos.

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Procediendo con el programa de la misma forma que se muestra en apartados anteriores e introduciendo los mismos parámetros que el caso de estudio en este trabajo, resulta el modelo de la Figura 4.57.:

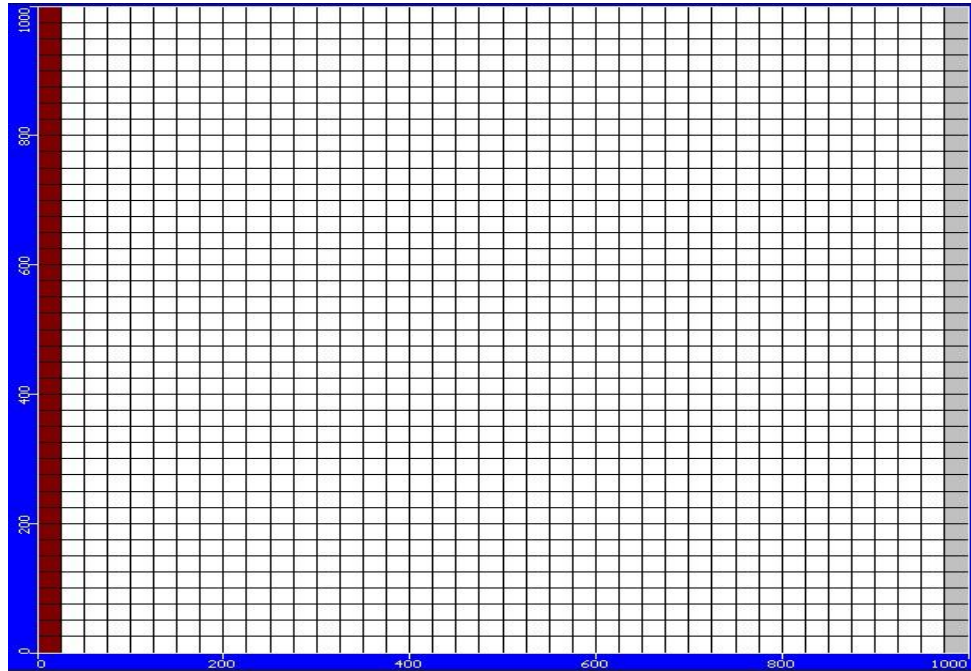


Figura 4.57. Modelo de un caso general

Como se puede ver hay una parte coloreada de rojo, que representa la zona de piezometría constante y otra zona coloreada de gris, que representa la zona en la que se sitúa la zanja.

Espaciadas las dos zonas 950 metros y con unas características iguales a las del análisis numérico anterior, ejecutando en Modflow muestra lo que se puede apreciar en la Figura 4.58.:

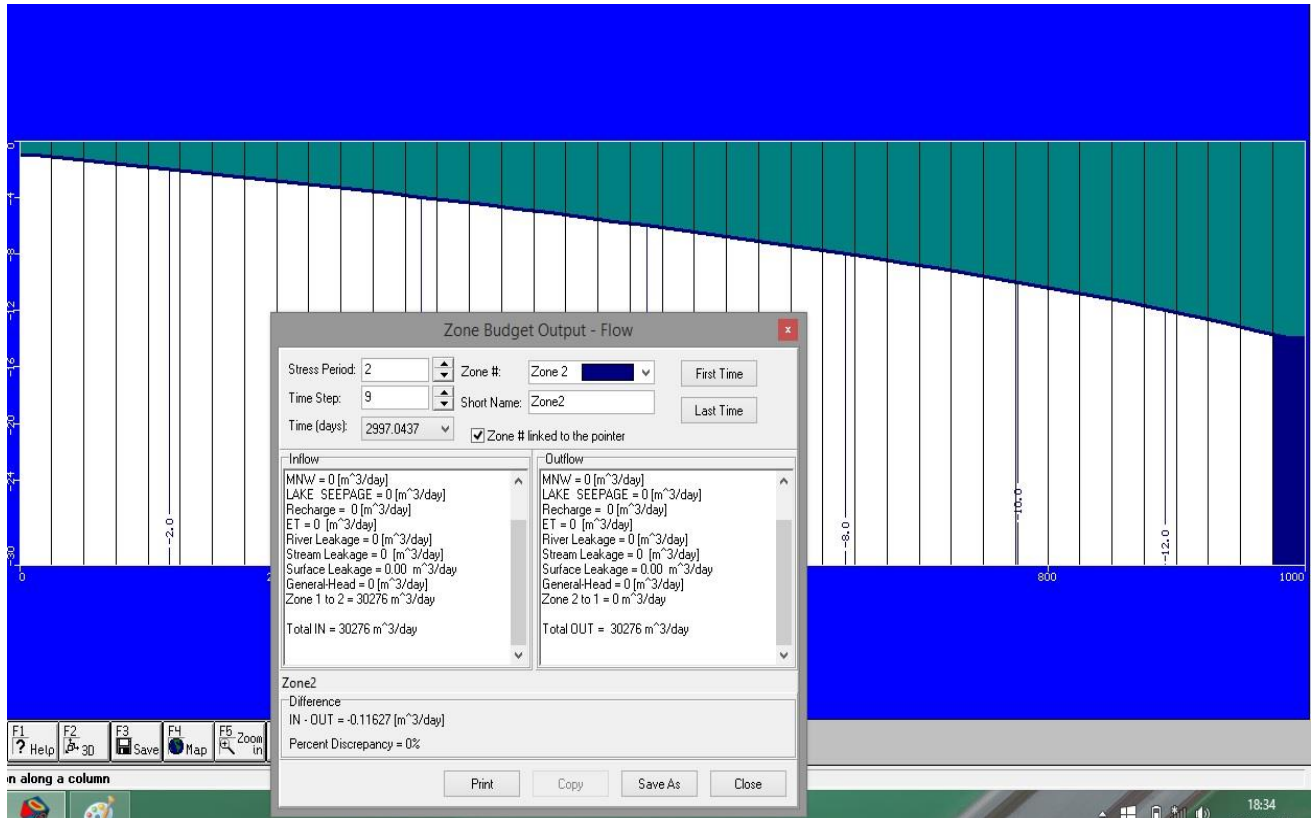


Figura 4.58. Resultado del caso general de estudio

Resulta en este caso un caudal de:

$$Q = 30276 \text{ m}^3/\text{día}$$

Resulta apreciable que se está ante dos caudales similares: 31104 m³/día frente a 30276 m³/día. La diferencia de caudales que se obtiene en este caso es mínima en comparación con el caso de estudio anterior (entorno a un 2.7%) por lo que se puede afirmar con total rotundidad que la diferencia de caudales resultantes en el caso de estudio no es debida a la metodología de cálculo empleada.

Descartado el error de cálculo o de modelización con Modflow, se podría plantear que la explicación del desfase existente entre caudales radica en la geometría quebrada o poligonal de las zanjas. Como se sabe desde que se planteó el problema, las zanjas del caso de análisis se han propuesto siguiendo una disposición rectangular. Tomando como base de la explicación la Figura 4.59, se puede afirmar que el método analítico de cálculo utilizando solamente considera el caudal que llega a la zanja a través de la zona coloreada de verde en la figura, es decir, el caudal resultado del cálculo analítico es el caudal que se infiltra a la zanja solo por la parte lineal de la zanja. Observando la Figura 4.59. se puede apreciar que se está obviando el caudal que se infiltra a las zanjas desde las esquinas del rectángulo, por las zonas coloreadas en rojo.

Por tanto, el desfase entre los dos caudales obtenidos es causado al no tener en consideración el caudal que se infiltra por las esquinas del rectángulo de zanjas planteado.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

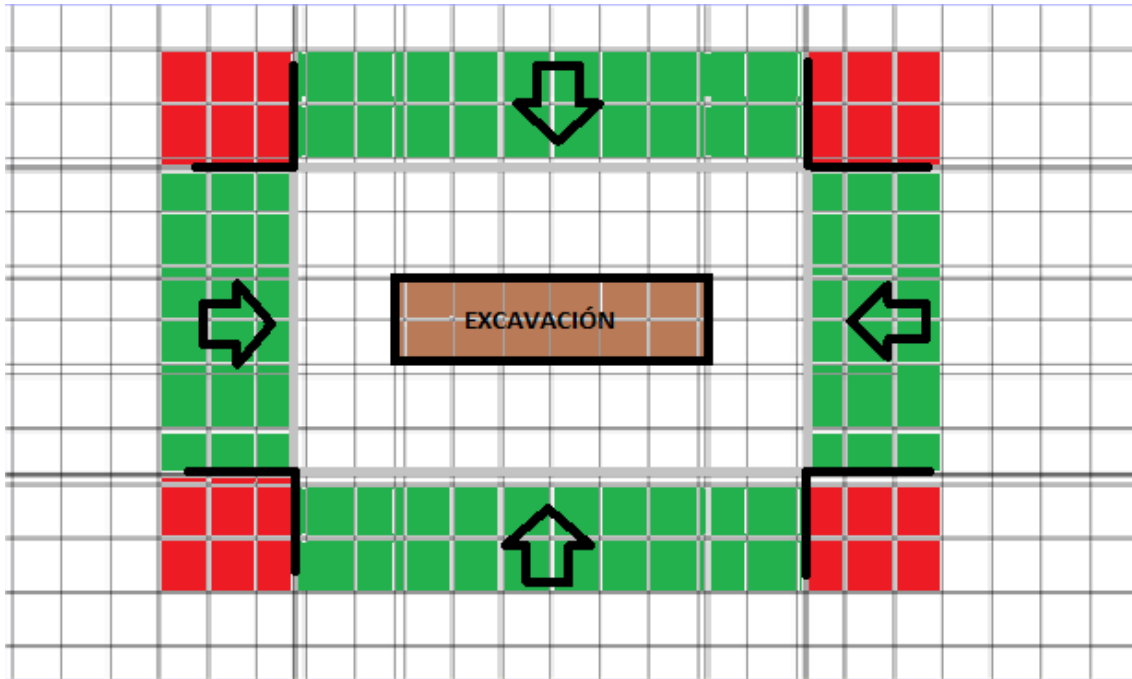


Figura 4.59. Esquema general de zonas de infiltración de caudales

Ahora bien, como ingeniero, cuando se presenta un problema hay que intentar subsanarlo.

Se propone como una solución al problema plantear una función que correlacione el caudal numérico obtenido con Modflow y que es más cercano a la realidad, con el caudal resultado de un cálculo analítico realizado con la metodología anteriormente expuesta. De esta forma se podrá, a partir del caudal resultado del proceso analítico, obtener un caudal mucho más próximo al caudal numérico que ofrece Modflow y por tanto al caudal real.

Para obtener la función deseada, la metodología de trabajo que se ha realizado ha sido plantear un total de seis caso teóricos para los cuales se ha obtenido los caudales mediante el método analítico y utilizando Modflow.

Los resultados obtenidos y el diagrama que relaciona ambos se muestran en la Figura 4.60.

Jose Antonio Contreras Jiménez
ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

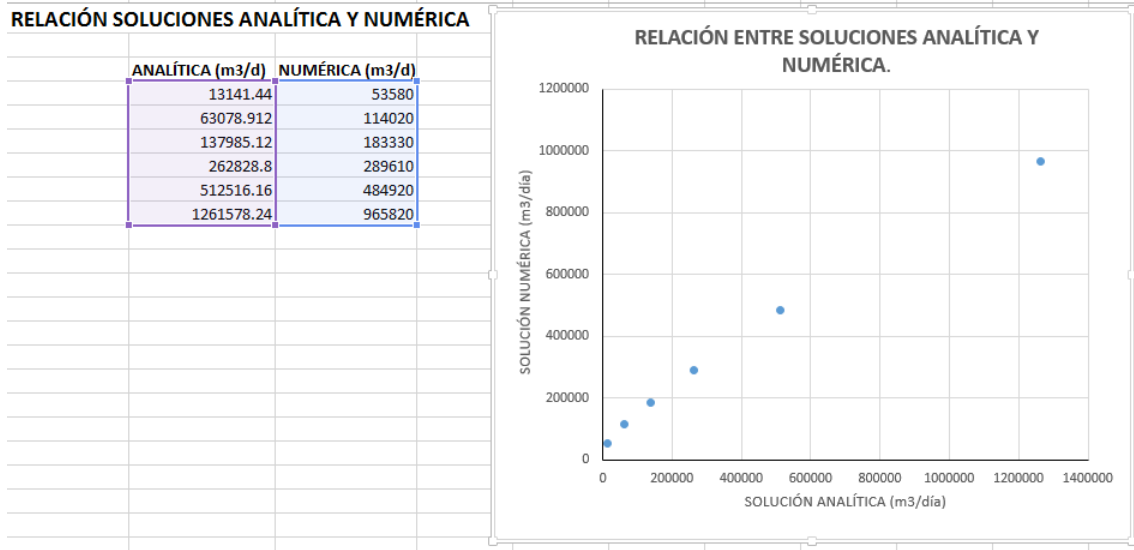


Figura 4.60. Soluciones de caudales en casos teóricos y relación entre ambos

Se plantean tipos de funciones que se ajustan bien a la forma que tiene el diagrama de dispersión.

Una primera forma sería de tipo polinómica de grado 2, con la forma que se puede ver en la Figura 4.61.



Figura 4.61. Ajuste de tipo parabólico en el diagrama

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

Gráficamente, este tipo se ajusta realmente bien al diagrama de dispersión. Comprobemos la expresión dada en el caso de estudio:

$$y = -2E - 07x^2 + 0.9475x + 50184$$

En el caso planteado, el valor “x” sería el caudal obtenido mediante el procedimiento analítico (98565.12 m³/día). El valor “y”, resultado de la operación substituyendo en “x” el valor del caudal analítico, sería el caudal resultado de la simulación con Modflow. Así pues:

$$\begin{aligned} y &= -2E - 07 * (98565.12)^2 + 0.9475 * (98565.12) + 50184 \\ &= \mathbf{141631.43 \text{ m}^3/\text{día}} \end{aligned}$$

Como se ve, el resultado es mucho más ajustado a los 159320 m³/día que ofrece Modflow. Es un resultado satisfactorio, con un error del 11.10%, pero se puede comprobar si alguna otra distribución se ajusta aún más.

Otra distribución posible sería una distribución potencial como la de la Figura 4.62.



Figura 4.62. Ajuste de tipo potencial en el diagrama

Procediendo de manera análoga a la comprobación anterior, pero con la expresión de esta distribución se obtiene:

$$y = 110.72x^{0.6365} = 110.72 * (98565.12)^{0.6365} = \mathbf{167005.56 \text{ m}^3/\text{día}}$$

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO EN ACUÍFEROS LIBRES MEDIANTE ZANJAS.

También resulta un caudal muy próximo al que ofrece Modflow, con un error del 4.8% aproximándose ésta vez por exceso al contrario que utilizando la distribución polinómica.

Otra aproximación que puede resultar satisfactoria sería una aproximación lineal como la de la Figura 4.63.

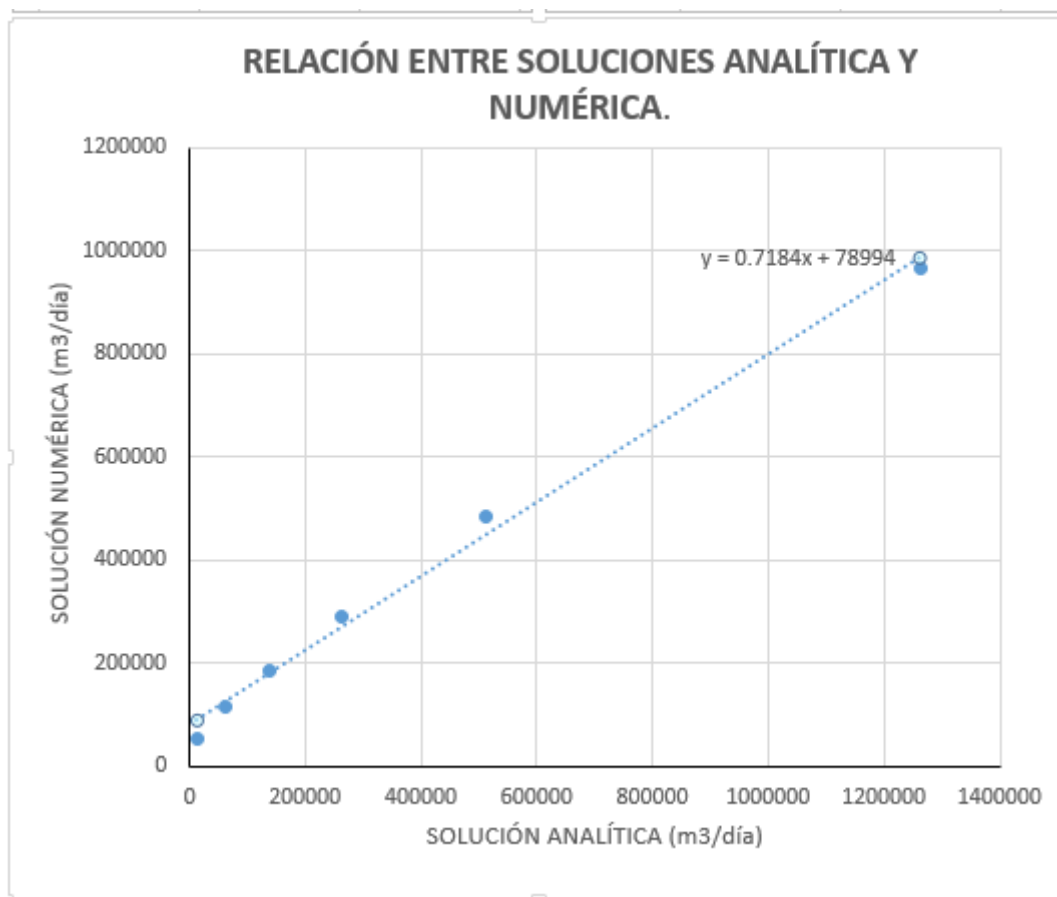


Figura 4.63. Ajuste del tipo lineal en el diagrama

Realizando la comprobación substituyendo el caudal analítico en la expresión de la distribución lineal de la Figura 4.63. resulta:

$$y = 0.7184x + 78994 = 0.7184 * (98565.12) + 78994 = \mathbf{149803.18 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Como se observa, también es una solución cercana al resultado que Modflow ofrece, con un error en este caso del 5.9% por lo que también es un resultado satisfactorio.

Para concluir este apartado, comentar solamente que existe una problemática a la hora de calcular caudales infiltrados en zanjas drenantes con forma poligonal y aquí se ha ofrecido una solución adecuada que se acercan más al caudal que resulta de la simulación numérica en Modflow y, por tanto, al caudal real con el que habría que trabajar.

5. CONCLUSIONES

Se planteó estudiar la realización de un abatimiento de 14 metros del nivel freático de un acuífero libre de 30 metros de espesor para la realización de una excavación de profundidad 12 metros y dimensiones en planta 160 x 40 metros, en una arena gruesa de permeabilidad $k = 1.17 \times 10^{-3}$ m/s.

Se ha propuesto como método de abatimiento del nivel freático del acuífero un sistema de zanjas drenantes rectangular separadas 50 metros de los bordes de la excavación. El acuífero presenta una recarga circular, quedando un nivel constante del nivel freático de -1 metro a 240 metros del sistema de zanjas planteado.

Por un lado, se ha calculado el caudal de manera analítica obteniéndose un valor de 98565 m³/día. Por otro, después simular numéricamente el problema mediante el programa Visual Modflow, se ha obtenido un valor de 159320 m³/día.

Se ha hecho un estudio para interpretar la diferencia entre los valores obtenidos numérica y analíticamente, difiriendo estos en un 38.1%. Tras resolver un simple caso teórico, en el que se pudo comprobar que la solución analítica y numérica arrojaban resultados similares, se concluyó que la causa del desfase se debía a que en la solución analítica del problema original no se consideraba el caudal que se infiltra al sistema de zanjas a través de las esquinas.

Para subsanar este inconveniente, se han obtenido tres funciones de distribución, aplicables sólo para este caso de estudio, que relaciona el caudal numérico con el caudal analítico. Para un valor de la solución analítica de 98565 m³/día, el valor real, obtenido numéricamente, sería de 141631 m³/día (función polinómica), 167005 m³/día (función potencial) y 149803 m³/día (función lineal), con una diferencia en relación con la solución numérica (159320 m³/día) del 11.1%, 4.8% y 5.9%, respectivamente.

6. REFERENCIAS

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. Ingeniería Geológica. Mercedes Ferrer Gijón, Luis Ortuño Abad, y Carlos Oteo Mazo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.
- BERRY, Peter L. & REID, David. Mecánica de suelos. Editado por Martha Edna Suárez R. McGraw Hill: Santafé de Bogotá, 1993. Traducido de la primera edición en inglés de An introduction to soil mechanics. ISBN: 958-600-172-5.
- CUSTODIO, EMILIO. LLAMAS, MANUEL R. Hidrología subterránea (T1). Editorial Omega, 1976. ISBN: 9788428204477
- WATERLOO HIDROGEOLOGIC, Inc. Visual Modflow 2011.1 User's Manual.