

MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS PARA GARANTIZAR LOS RECURSOS EN EXPLOTACIONES CON DESTINO A RIEGO

Martínez Arias, Alfredo¹, Soto Venegas, José Manuel¹, Beltrán Medina, Pedro.²

¹ WATER TECHNOLOGIES. WTECH, S.L. C/Central 13, Torre Godoy 30100, Murcia

² CENTRO DE INVESTIGACION .ACUMA. (ACUICULTURA Y MEDIO AMBIENTE).
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA. Camino de Vera s/n. 46022. Valencia

Resumen

Los modelos hidrogeológicos constituyen una herramienta básica de apoyo a las decisiones para la gestión de recursos hídricos y se utilizan para contabilizar las entradas y salidas de recursos hídricos en el espacio y en el tiempo, simulando la disponibilidad futura de recursos y por tanto la garantía en cantidad y calidad de los mismos. En este contexto, un modelo hidrogeológico, bien construido y calibrado, tiene la virtud de poder predecir el futuro de distintos escenarios posibles y por tanto poder actuar con suficiente antelación frente a situaciones críticas o de estrés prolongado. Por ejemplo, ante un periodo de estiaje prolongado (sequía) la posible entrada en explotación de nuevos pozos de bombeo o regeneración de los existentes, cómo afectaría al sistema hidrogeológico, ¿lo agotaría?, ¿en cuánto tiempo?, ¿aguantaría la explotación hasta el siguiente periodo húmedo?, ¿afectaría a la calidad del agua?, etc. Existen muchas cuestiones fundamentales que resuelve la modelización y que hasta ahora, únicamente la Administración, ha estado utilizando como herramienta fundamental para la gestión de la explotación de acuíferos.

1) INTRODUCCIÓN

Lo que se pretende en este artículo es proponer la modelización hidrogeológica como herramienta de gestión amable y cercana, al alcance de cualquier usuario que gestione recursos hídricos subterráneos, vital para la supervivencia de las Comunidades de regantes o Asociaciones de Usuarios que dependan en su mayor parte del recurso subterráneo.

Con dicha herramienta, aplicada a la agricultura, se podrá observar la sostenibilidad del acuífero o acuíferos en el tiempo, esto es la vida útil de la explotación en condiciones favorables. Los elementos a incorporar en situaciones excepcionales (sequías, afecciones de otras explotaciones, contaminaciones, etc...) y por tanto el coste y amortización de los mismos. Efectuar prognosis de evolución de la demanda futura y su viabilidad tanto en garantía de cantidad y calidad de recurso como económica y financiera de la Sociedad que se trate. En resumen, una herramienta que optimice la toma de decisiones con el objetivo de minimizar costes y garantizar la sostenibilidad de la explotación en el futuro.

Se presentará un ejemplo real de aplicación durante el último periodo de sequía 2005 – 2008 en la Vega media de la Cuenca del Segura, donde se utilizó esta herramienta para garantizar el riego en dicho periodo, explotando el acuífero de forma secuencial y sectorizada con objeto de no provocar afecciones en el periodo seco, recuperando su estado natural en el periodo húmedo subsiguiente.

2) MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS AFECTANTES



Se llevará a cabo la modelización hidrogeológica del acuífero o acuíferos afectantes a la Comunidad de regantes o usuarios de que se trate. Dicho modelo servirá como herramienta de gestión, fundamental en situaciones de escasez de recursos, con objeto de no provocar afecciones indeseables al acuífero, con la consiguiente depresión del nivel dinámico, que repercute en un incremento considerable de los costes de mantenimiento y conservación de la Comunidad de regantes. Esta herramienta simulará "a priori" los diferentes escenarios de explotación, en función de las necesidades. Al término del contrato, una vez terminada la calibración del sistema, la Comunidad de Regantes, contará con una herramienta de decisión más avanzada para la explotación de los acuíferos afectados por misma. Water Technologies cuenta, dentro de su equipo, con uno de los principales expertos en modelización hidrogeológica, apoyado por personal experto en realización y calibración de modelos hidrogeológicos.

Toda la información proveniente de la perforación, instalación y desarrollo de las captaciones, genera una gran cantidad de datos sobre los materiales que conforman el acuífero: litologías, potencias, transmisividades, permeabilidades, caudales, etc.

Toda esta información se encuentra dispersa y desorganizada, por lo que se impone la realización de un modelo que integre todos los datos existentes mediante la utilización de software especializado.

Mediante la utilización dicho software, se puede organizar, clasificar, gestionar y manipular la información existente sobre cualquier acuífero.

El software propuesto consta de 2 fases.

Correlación de sondeos. Discretización espacial en 3D de parámetros hidrodinámicos
Modelización hidrogeológica e hidrogeoquímica.

2.1) CORRELACIÓN DE SONDEOS. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN 3D.

Dada la variedad de fuentes de datos hidrogeológicos y para el tratamiento de forma eficaz de los mismos, es necesaria la integración de los mismos en un software que permita, no solo el almacenamiento y tratamiento, sino también, la salida de los mismos a través de una interfaz ágil y sencilla en formatos aplicables a la hidrogeología, que permita una gestión y manejo adecuado. Para ello se propone la utilización de la aplicación denominada Hydro GeoAnalyst, que permite:

- Almacenaje de capas múltiples de información por ejemplo datos litológicos, datos geofísicos, niveles del agua, y datos de la calidad del agua.
- Salida de datos en una variedad de formatos.
- Una interfaz fácil y sencilla de utilizar.

Este software posee una GIS integrado, que permite el tratamiento de los datos insertados de forma georeferenciada, lo que facilita la gestión adecuada de los mismos.

Posee también, una herramienta para el diseño de perfiles geológicos e hidrogeológicos, tanto en 2, como en 3 dimensiones, lo que permite crear modelos tridimensionales del terreno en base a los datos de sondeos georeferenciados.

El 3D-Explorer es una herramienta para visualizar diagramas, localizaciones de sondeos con litología, mapas, contornos, y flujo de plumas dentro del mismo ambiente 3D.

2.2) MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.

Como base para la modelización matemática, en primer término se establecerá un modelo conceptual basado en el balance hídrico, entendido como un resultado de la aplicación del principio de continuidad de masas (ley de continuidad) a un volumen de niveles permeables, definida por condiciones de contorno previamente establecidas (acuífero). Para este sistema y durante un periodo de tiempo concreto, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual a la variación del agua almacenada.

La cuantificación de las entradas y salidas en los acuíferos se realizará evaluando caudales (de aportaciones, de bombeos, de transferencias subterráneas, etc.), mientras que las variaciones de almacenamiento se establecerán por las oscilaciones del nivel piezométrico. Para ello se establecen 5 puntos básicos objeto de recopilación, análisis y depuración, para la confección del modelo matemático que más adelante se desarrollarán brevemente.

1. Estudio climatológico e hidráulico de la zona delimitada en las presentes Unidades Hidrogeológicas y sus áreas de influencia, orientado a la asignación de una serie concreta de precipitaciones a cada acuífero, para posteriormente aplicarla al modelo de simulación del sistema.

Se utilizarán las series de precipitaciones y temperaturas completadas y restituidas del Pan Hidrológico, que se actualizarán al año en curso, de la red de estaciones meteorológicas de la zona de trabajo y de un perímetro amplio en su entorno, incluyendo pluviómetros totalizadores ubicados en cotas altas, no cubiertas por estaciones meteorológicas.

Con los datos generados se procederá al trazado de isolíneas de precipitaciones, temperaturas, ETP, ETR y lluvia útil, etc. Previamente se establecerán las relaciones cota / precipitación-temperatura y precipitación / exposición de vertientes a dirección de frentes de lluvia, con el fin de tener en cuenta el factor topográfico al trazado de tales líneas.

Por último se calcularán los volúmenes correspondientes a precipitación y lluvia útil para cada acuífero.

2. Definición de las condiciones en los límites, que pueden ser cerrados cuando se tratan de rocas confinantes de tipo impermeable, o abiertos, cuando el límite del acuífero es otro conjunto con el que se puede establecer transferencia hidráulica subterránea.

Estas condiciones vendrán dadas por la geología y geometría de los conjuntos permeables y pueden ser evaluadas a partir de su piezometría y gradientes hídricos. Para ello se confeccionarán los correspondientes planos piezométricos de cada acuífero, con las medidas de niveles que se efectúen a lo largo de las fases de toma de datos durante la vigilancia y control de los acuíferos.

En caso de disponer de evolución piezométrica en varios puntos del acuífero, se confeccionarían planos para diferentes fechas, de donde se podrá establecer las posibles variaciones en el comportamiento de los límites abiertos en el tiempo (en procesos de sobreexplotación es frecuente que los límites abiertos cambien de comportamiento por debajo de cierta cota).

Cuando las condiciones de límites afecten o estén relacionados con otras UH o acuíferos adyacentes, los parámetros en los bordes deben ser establecidos y consensuados, con el

beneplácito y aprobación de las Comunidades adyacentes o con el Organismo de Cuenca de que se trate.

3. Estudio de la relación con cauces superficiales o masas de agua, que pueden ser cedentes de caudal, (alimentan al conjunto permeable) o receptores de salidas subterráneas.

En el primer caso se considerará el régimen de aportaciones de los cursos temporales de agua que discurren sobre las superficies permeables y se evaluará las pérdidas de caudal que puedan experimentar, bien por percolación directa, bien por las derivaciones de retornos de riego que se realizan para su aplicación en terrenos de regadío situados sobre el acuífero.

En los casos de verificarse el drenaje de recursos subterráneos hacia cauces o subálveos, se evaluarán los caudales circulantes por medidas directas y cálculo de Darcy, respectivamente.

4. Cuantificación de salidas por manantiales, drenajes, transferencias laterales y bombes, para lo que se utilizarán las series foronómicas que puedan existir y los datos de bombes obtenidos de la base de datos creada a tal efecto.

En los casos de falta de históricos de bombeo, se recurrirá a la estimación de forma indirecta a través de los consumos energéticos y de los ratios kWh/m³ y Wh/m³/m.

5. Definición de las variaciones de reserva, calculadas de forma empírica a partir del coeficiente de almacenamiento (S), o de forma experimental a partir de los volúmenes aportados por el acuífero por cada metro de depresión del nivel de agua en años se escasa o nula alimentación.

Se tomarán los datos puntuales de coeficiente de almacenamiento de los ensayos de bombeo realizados en los puntos ensayados con anterioridad, extrapolar los valores al entorno circundante de similares características hidrogeológicas. Se efectuarán reinterpretaciones de los ensayos de bombeo anteriormente efectuados.

Puesto que el coeficiente de almacenamiento puede sufrir variaciones espaciales, e incluso temporales (compactación por drenaje), lo normal es que las variaciones de reserva se establezcan a través de las oscilaciones del nivel piezométrico, para lo cual es imprescindible la disposición de series piezométricas para todos y cada uno de los acuíferos que conforman las UH tratadas.

A partir de la definición de los cinco puntos anteriores para cada acuífero, se procederá un modelo matemático. El período de simulación y los intervalos de tiempo se determinarán según las características de la información obtenida (período y cadencia de los datos). La calibración de los modelos tiene por objeto verificar la coherencia de los datos, cuantificar el balance hidráulico y determinar las magnitudes de las variables no cuantificadas y en particular la alimentación y su distribución espacial.

La simulación de alternativas tendrá por finalidad analizar la respuesta de los acuíferos a las solicitudes de los volúmenes susceptibles de bombearse con criterios de sostenibilidad, entendidos como condiciones de estabilidad de los niveles de agua en acuíferos sobreexplotados y/o de limitación del avance de la interfase salina en acuíferos costeros o con influencia salina.

Conocidos la magnitud de tales volúmenes y la bondad de su explotación, se podrán calcular los déficits estructurales existentes en los aprovechamientos que dependen de cada acuífero

y, por consiguiente, los volúmenes de agua procedentes de fuentes externas que se deberían destinar para equilibrarlos.

Para la modelización del funcionamiento hidráulico se propone utilizar el programa Visual MODFLOW, en su versión Pro, paquete integrado de simulación tridimensional del flujo subterráneo y transporte de contaminantes, que incluye las siguientes aplicaciones:

- VISUALMODFLOW, modelo de flujo subterráneo.
- MODPATH, cálculo de vectores, velocidad del flujo y tiempos de tránsito.
- MT3DMS, modelo de transporte de contaminantes con procesos de advección, dispersión y reacciones químicas en acuíferos.
- RT3D, modelo de dispersión y mezcla de contaminantes.
- WinPEST, calibración automática de balances.
- 3D-Explorer, visualización y animación flujos y procesos contaminantes en tres dimensiones.

En todos los acuíferos de las UH consideradas, la calibración de los elementos de sus respectivos balances se efectuará con el módulo WinPEST.

Visual MODFLOW Pro permite simulaciones tanto en régimen permanente como en régimen transitorio. La naturaleza del acuífero puede ser libre, confinado o semiconfinado. El flujo generado puede provenir de bombeos desde puntos externos o internos al modelo, pozos de recarga, recarga superficial, evapotranspiración, etc.

Se pueden definir cada uno de los parámetros que forman el modelo. Las transmisividades hidráulicas pueden definirse para cada capa y diferenciarse espacialmente, pudiéndose ser anisotrópica (restringido ateniendo a las direcciones principales alineadas con la rejilla). El coeficiente del almacenaje puede ser heterogéneo. Además de simular flujo del agua subterránea, MODFLOW puede incorporar capacidades relacionadas, por ejemplo, con transporte del soluto y la gestión del agua subterránea.

La ecuación de flujo del agua subterránea se soluciona usando aproximación por diferencias finitas. La región del flujo se subdivide en celdas, en las cuales las características medias se asumen para ser uniformes. Las celdas se distribuyen mediante rejilla. Esto permite que las capas del modelo puedan tener un espesor diferente. La ecuación de flujo se escribe para cada bloque, lo que permite una total adaptación al caso real modelizado.

La simulación de distintas hipótesis de explotación para la adopción de la más favorable se efectuará con diversos criterios, en función de la siguiente casuística:

- Acuíferos simples y de extensión limitada: se simularían como una celda única en la aplicación WinPEST.
- Acuíferos extensos y/o con variabilidad espacial: las hipótesis de funcionamiento se simularían en el módulo MODFLOW, para lo cual el acuífero se discretizará en tantas celdas como puntos de bombeo se consideren.

Tras la estimación del balance hídrico de los acuíferos, se procederá a cuantificar los recursos renovables y, por tanto, la cantidad máxima a bombear sin reducir las reservas. Para cada uno de los acuíferos a modelizar se realizarán e interpretarán los ensayos de bombeo realizados.

Los resultados de la simulación finalmente aceptada, incluyendo las condiciones de bombeo, asignación concreta de volúmenes a cada captación, evolución piezométrica a largo plazo,

etc., se presentarían en gráficos y bloques diagramas suficientemente aclarativos para su fácil interpretación. Para el cálculo de los balances hídricos de los acuíferos considerados con objeto de poder calibrar el modelo matemático, se propone seguir la siguiente metodología:

En este caso, se utilizarán conjuntamente, ya que ambos se complementan de cara al objetivo final del trabajo a desarrollar. La herramienta Hydro GeoAnalyst permite generar un modelo conceptual hidrogeológico y litológico del acuífero, que servirá de base, posteriormente, para el desarrollo del modelo de funcionamiento concebido desde Visual ModFlow Pro, ya que define las diferentes capas y las propiedades de cada una de ellas de cara a generación de los flujos subterráneos, tanto verticales como horizontales, dentro del acuífero.

Este modelo se utilizará, como herramienta de gestión para la toma de decisiones por parte de la Dirección Técnica de la Comunidad de Regantes que se trate, tales como: la predicción de zonas vulnerables al descenso piezométrico acusado; zonas de favorabilidad de captación; áreas sobreexplotadas o susceptibles de convertirse; visualización la evolución piezométrica histórica, de tal modo que se puedan establecer diferentes escenarios de explotación, en función de la prognosis de demanda, minimizando las afecciones, tanto al acuífero como a los equipos electromecánicos objeto de mantenimiento.

Una vez que dicha herramienta de gestión quede implantada en la Comunidad de Regantes o de usuarios que se trate, se garantizará durante el tiempo de explotación que se programe, tanto la calidad como la cantidad del recurso subterráneo con el fin de hacer sostenible tanto la explotación como el mantenimiento de la Comunidad de Regantes, optimizando los costes y garantizando el futuro de la explotación. A continuación se presenta un ejemplo de aplicación en un caso real de periodo de estiaje.

3) EJEMPLO DE APLICACIÓN. MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA VEGAMEDIA DEL SEGURA

El límite inferior en la modelización, se considera cerrado en los materiales impermeables del zócalo Triásico o Paleozoico (Ver figura nos 1 y 2. Elaboración Propia. WTECH, S.L.).

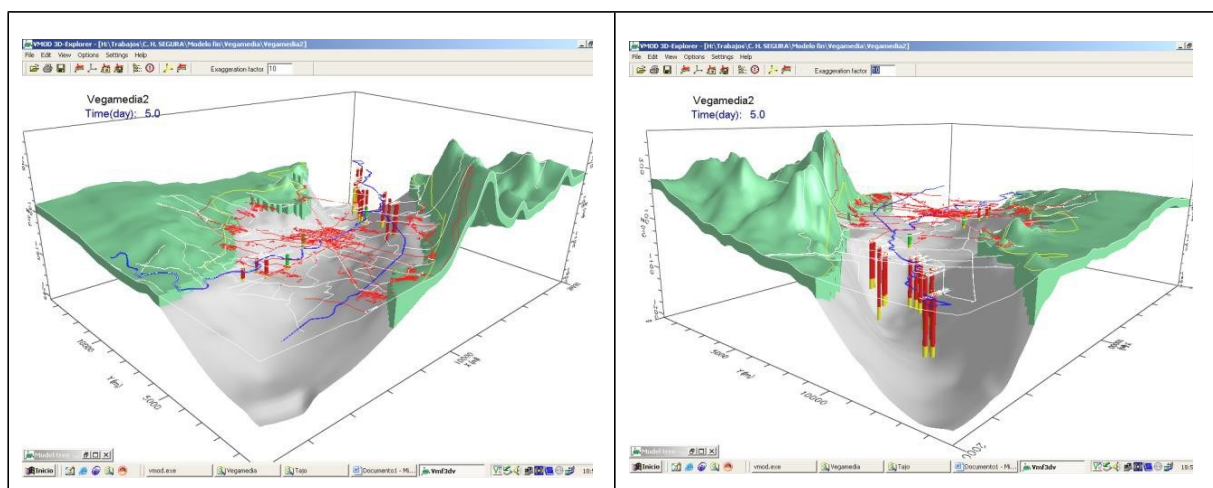


Figura 1 y 2. Distribución del sustrato en 3D. Situación de sondeos de emergencia.
(Elaboración Propia WTECH,S.L.)

3.1) MODELO CONCEPTUAL GENERAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO.

El área de estudio, objeto de modelización, se circunscribe a los materiales permeables (susceptibles de almacenar y transmitir fluido con permeabilidad $> 10^{-8}$ m/s), presentes en el subsuelo de la vega Media de Murcia.

En el área objeto de cálculo, en primer término y de cara a los objetivos principales del estudio, se diferencian tres tipos de depósitos, el Cuaternario suprayacente, de baja permeabilidad (acuitardo), con espesores comprendidos entre 5 y 30 m según la zona, un nivel inferior de alta transmisividad, correspondiente al primer nivel de gravas permeable no captado por los sondeos proyectados con potencias entre 5 y 10 m, y un último nivel que comprende la totalidad del acuífero captado en profundidad, con espesores que oscilan entre 60 y 320 m, se trata de un acuífero multicapa, con alternancia de niveles de gravas y arenas permeables y niveles impermeables (limos y arcillas), reconociéndose desde 7 a 14 niveles permeables en profundidad, al que se le asignan los parámetros hidrodinámicos de los ensayos de bombeo realizados en los sondeos efectuados, en el entorno de los mismos y los parámetros consultados en la bibliografía existente, en los sectores donde existen lagunas de información.

La piezometría de la zona muestra una ligera pendiente hacia el NE, en la dirección del río Segura (aguas abajo), con direcciones preferenciales SO-NE y O-E y gradiente hidráulico aproximadamente del 2-1 o/oo. En función de la disposición geológica de los materiales que constituyen el acuífero y del análisis de la piezometría, el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico para el cálculo hidráulico, debería contemplar la recarga del acuífero mediante infiltración del agua de lluvia y percolación a través de la amplia red de acequias (azarbes) de la Vega media y descarga directa principal al río Segura.

La infiltración de agua de lluvia se anula al tratarse de un periodo de sequía. La percolación desde las acequias (azarbes) también se descarta, dada la complejidad de la red existente y la incertidumbre en el conocimiento de los lechos permeables o impermeables. También se descarta la recarga directa desde el río Segura, al discurrir por un lecho de limos y arcillas (sobre el acuitardo superior), prácticamente impermeable, durante el recorrido en el área modelizada. De este modo, el cálculo se considera altamente conservador, favorable a la filosofía de la Declaración de Impacto.

La dirección del flujo dentro del acuífero tiende a ser sensiblemente horizontal, sobre todo en las zonas más deprimidas, debido al carácter impermeable de los materiales desarrollados en el tramo de acuífero cuaternario más superior (acuitardo).

3.2) DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DEL MODELO.

Los materiales susceptibles de almacenar y transmitir fluido se discretizan espacialmente mediante superposición de una malla de elementos cuadrados de 200 m x 200 m de dimensión que se ajusta a los límites del área de estudio, con una extensión superficial de 14.800 m de largo (N-S) y 20.000 m de ancho (O-E), definida por 100 columnas (x), en dirección Este y 75 filas (y) en dirección Sur.

Por lo que respecta a la vertical, dirección Z se considera desde la cota -320 m, hasta la cota de 450 m, que corresponde a la mayor elevación del área de estudio. Hidrogeológicamente se han considerado como celdas inactivas todos los materiales prácticamente impermeables del Paleozoico, Triásico y Terciario, abarcando, en superficie, la mayor parte de los relieves positivos del área. Ver figuras nos 1 y 2 (Elaboración propia WTECH,S.L).

En los 330 m máximos, de zona modelizada en vertical, se han diferenciado un total de 3 capas, cuya combinación refleja, en general, las variaciones hidrodinámicas del terreno en función de los datos de campo recopilados, bombeos de ensayo y ensayos de permeabilidad realizados en los sondeos de explotación llevados a cabo (17 en total en la zona objeto de cálculo). En las zonas no prospectadas en el presente estudio, se han tomado los valores de parámetros hidrodinámicos existentes en la bibliografía, cedidos por la Confederación Hidrográfica del Segura.

3.3) LÍMITES, PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO.

Los límites de la modelización que imponen las condiciones de borde del modelado son las siguientes ver figuras adjuntas (nos 1 y 2. Elaboración propia WTECH,S.L):

El tramo del Segura, donde se desarrolla la Vega Media, se asocia a una fosa tectónica, de dirección N-60 E, aún activa, en la que se han depositado sus arrastres durante el Cuaternario. Las rocas confinantes, prácticamente impermeables, sobre las que se desarrolla la fosa son metapelitas paleozoicas y en menor medida los mármoles triásicos de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas en la Vega Media, mientras que en el tramo de aguas abajo, comienzo de la Vega Baja corresponden a sedimentos miocenos de tipo detrítico y fundamentalmente margoso prácticamente impermeables.

Estos materiales de carácter impermeable constituyen tanto el sustrato como los límites meridionales y septentrionales de los materiales permeables del Cuaternario, ya que soportan la totalidad de los depósitos permeables existentes en el subsuelo más superficial del área de estudio.

Los depósitos cuaternarios alcanzan de 6 a 10 km de anchura por 150 a 320 m de profundidad en la Vega Media. La litología predominante es limosa, en la que se intercalan niveles más o menos continuos de gravas bien clasificadas y arcillas, existiendo una disminución general del tamaño de grano de aguas arriba a aguas abajo. A nivel de afloramiento, se diferencia un conjunto superior formado por una capa de limos de 10 a 15 m de espesor seguida por otra de gravas de 3 a 10 m de espesor, y un conjunto inferior con distribución heterogénea de niveles. En los bordes tanto meridionales y septentrionales como occidentales del área de estudio se ha estimado conveniente el no imponer un borde de potencial constante, quedando dicho límite abierto y con potencial variable en función de la piezometría inicial detectada en la primera campaña de piezométrica llevada a cabo (mes de julio de 2005).

Sobre la base del estudio hidrogeológico y de subsuelo previamente realizado, a cada celda del modelo se le asigna un valor de permeabilidad. De este modo se definen una serie de zonas de permeabilidad común, cuya geometría se muestra en las figura nº 3 (Elaboración Propia, WTECH,S.L), correspondientes a las capas 1, 2 y 3 de distribución de permeabilidades consideradas en el cálculo hidráulico realizado (permeabilidad horizontal $k(x,y)$ y vertical $k(z)$) en profundidad. Sus valores en el entorno de los sondeos de efectuados, coinciden con los resultados de los ensayos de bombeo realizados. En el resto, se han extrapolado los valores obtenidos en estudios anteriores. También se han tenido en cuenta los resultados de los sondeos de investigación llevados en fases anteriores.

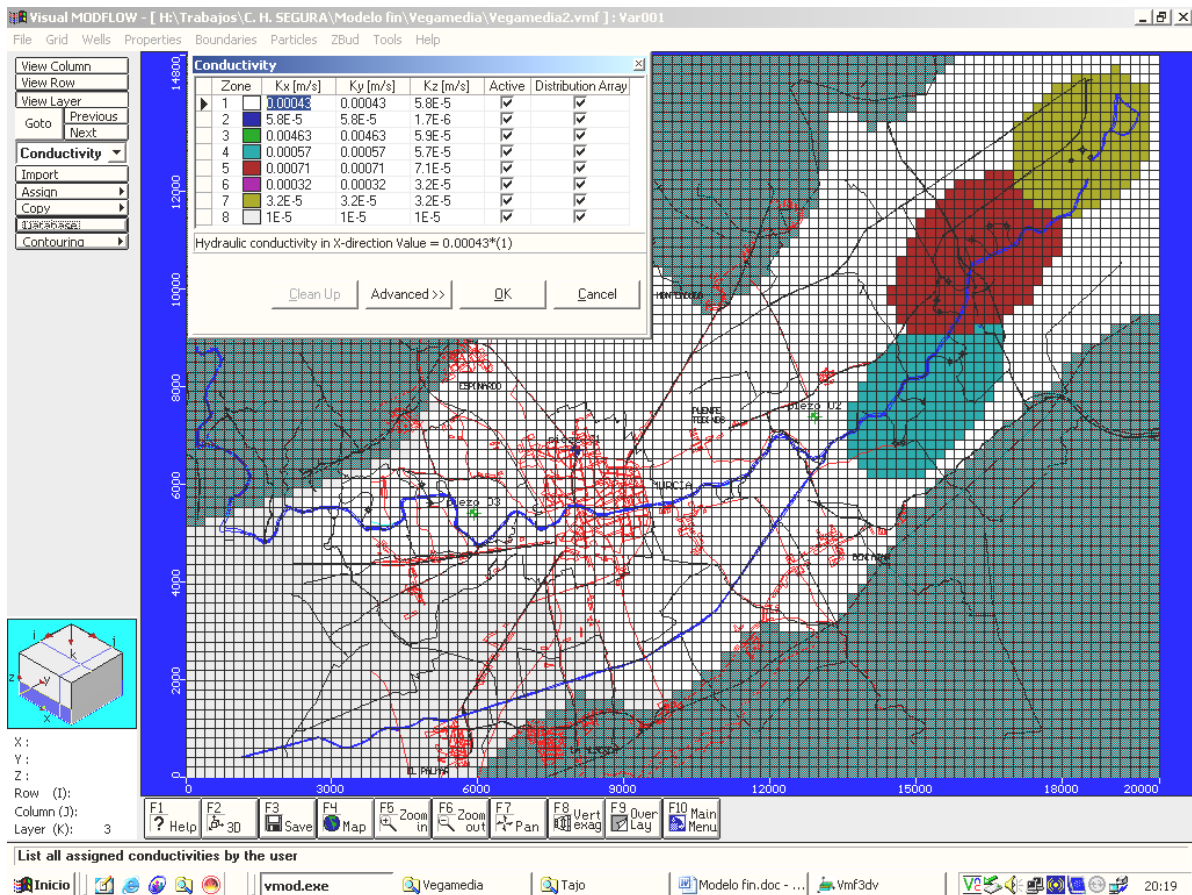


Figura 3. Distribución de permeabilidades de la capa inferior nº 3 (acuífero multicapa captado). (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

El valor de permeabilidad estimado para el acuitardo (capa nº 1), se sitúa en torno a $5,8 \times 10^{-5}$ m/s, en la horizontal y $1,7 \times 10^{-6}$ m/s, en la vertical, de acuerdo con estudios anteriores consultados. El valor de permeabilidad estimado para el primer nivel permeable (capa nº 2), se sitúa en torno a $4,6 \times 10^{-3}$ m/s, en la horizontal y $5,9 \times 10^{-5}$ m/s, en la vertical, también de acuerdo con estudios anteriores consultados. Mientras que el conjunto de materiales del acuífero multicapa inferior ensayados en los sondeos efectuados, varían entre $7,1 \times 10^{-4}$ m/s y $3,2 \times 10^{-5}$ m/s en la horizontal y $7,1 \times 10^{-5}$ m/s y $3,2 \times 10^{-5}$ m/s en la vertical. Para el resto de zonas no ensayadas, se adopta un valor de $4,3 \times 10^{-4}$ m/s, en la horizontal y $5,8 \times 10^{-5}$ m/s en la vertical, de acuerdo con los datos de estudios anteriores consultados.

Las diferentes zonas discretizadas con valores de coeficiente de almacenamiento constante, se corresponden con las definidas para las permeabilidades al tratarse, en general, de formaciones permeables por porosidad intergranular, coincidiendo las variaciones del coeficiente de almacenamiento con las de permeabilidad. El valor de parámetros de almacenamiento estimados para el acuitardo (capa nº 1), se sitúa en torno a $S_s = 0.0015$; $S_y = 0.03$; Porosidad eficaz = 0,03 y Porosidad total = 0,3, de acuerdo con estudios anteriores realizados. El valor de parámetros de almacenamiento estimados para el primer nivel permeable (capa nº 2), se sitúa en torno a $S_s = 0.015$; $S_y = 0.03$; Porosidad eficaz = 0,03 y Porosidad total = 0,4, de acuerdo con estudios anteriores realizados. Como valor general para los materiales acuíferos de la capa inferior ensayados en los sondeos se han estimado los siguientes valores de parámetros de almacenamiento $S_s = 0.00017$; $S_y = 0.00001$; Porosidad eficaz = 0,25 y Porosidad total = 0,35. En las zonas de la capa inferior no ensayadas se adopta el valor de $S_s = 0.000026$; $S_y = 0.0003$; Porosidad eficaz = 0,25 y Porosidad total = 0,35.

En la figura nº 4 (Elaboración Propia, WTECH,S.L), se presenta la distribución de los valores del coeficiente de almacenamiento, que coinciden con los de distribución de permeabilidades se representa la distribución espacial de los mismos. En dichos planos, se representan dos valores diferentes de coeficiente de almacenamiento.

Ss (1/m). Coeficiente de almacenamiento específico, que se define para un acuífero saturado como el volumen de agua que cede una unidad de volumen de acuífero cuando se deprime el nivel piezométrico del mismo una unidad.

S(-) o Sy. Coeficiente de almacenamiento de rendimiento, que se define como el volumen de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime una unidad, consecuentemente no tiene dimensiones.

La recarga superficial del acuífero correspondiente a la infiltración del agua de lluvia y percolación a través de cursos superficiales reproduce la entrada de agua al sistema.

Tal y como se ha indicado la infiltración de agua de lluvia se anula al tratarse de un periodo de sequía. La percolación desde las acequias (azarbes) también se descarta, dada la complejidad de la red existente y la incertidumbre en el conocimiento de los lechos permeables o impermeables. También se descarta la recarga directa desde el río Segura, al discurrir por un lecho de limos y arcillas (sobre el acuitardo superior), prácticamente impermeable. De este modo, el cálculo se considera altamente conservador, favorable a la filosofía de la Declaración de Impacto.

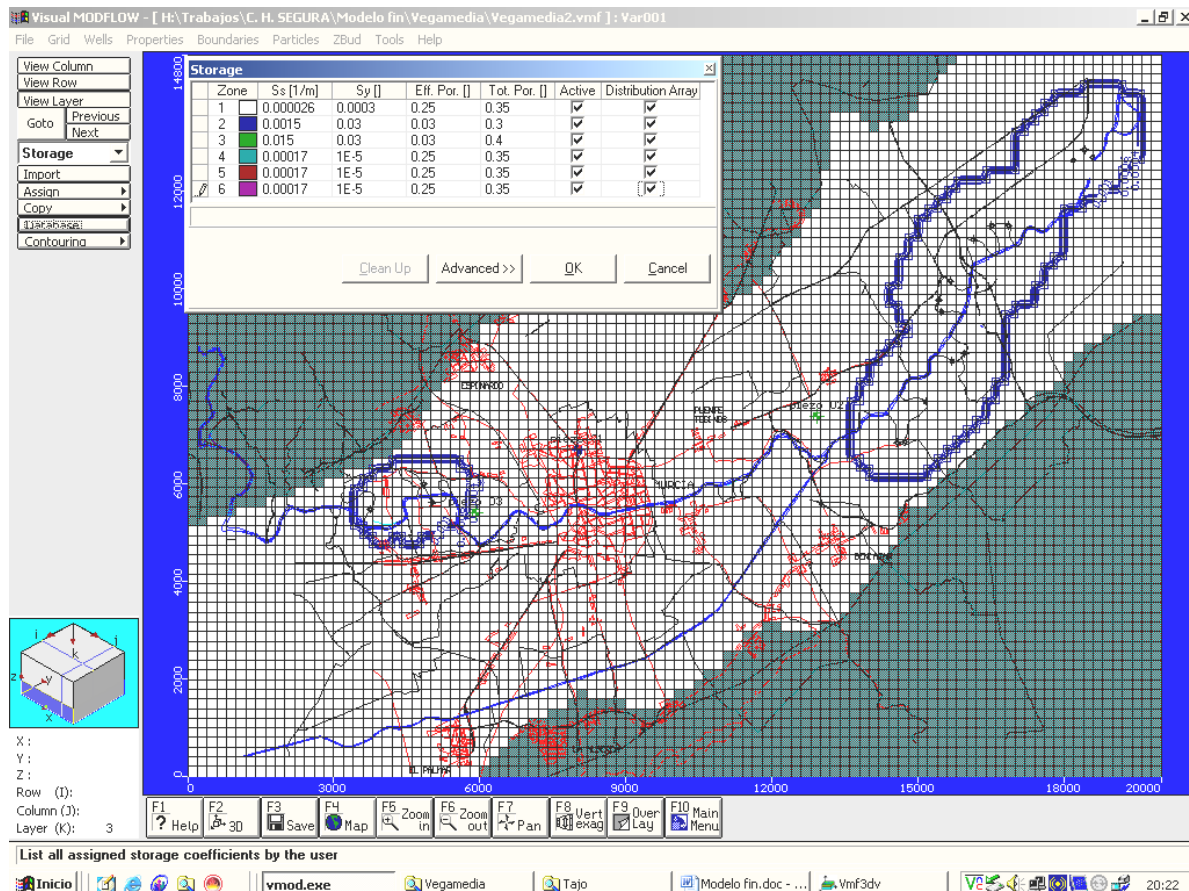


Figura 4. Distribución de coeficientes de almacenamiento. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

3.4) CALIBRACIÓN. AJUSTES EN REGIMEN TRANSITORIO Y PERMANENTE.

El objetivo del ajuste en régimen permanente es reproducir de la forma más lógica posible, desde un punto de vista hidrogeológico, la situación hidrodinámica reflejada en la piezometría inicial del acuífero, contrastada con los datos de la campaña de piezometría inicial realizada. Este proceso es dinámico ya que existe un estrés impuesto en el modelo debido a la explotación continua de los pozos, sin existir bordes o potenciales de recarga, al simular un periodo extremo de sequía. Debido a ello, al tratarse de un cálculo hidráulico, el ajuste se lleva en régimen transitorio.

El proceso de calibración se ha estructurado en dos fases: En la primera calibración o calibración inicial, el objetivo consiste en depurar y corregir las posibles deficiencias del modelo conceptual, comprobando las condiciones de contorno, y evaluando de manera crítica algunos aspectos del modelo hasta ahora considerados como fiables. En la segunda fase de calibración o calibración final, se obtiene el modelo conceptual y numérico del acuífero más coherente con el conjunto de la información disponible.

Las modificaciones incluidas en el modelo inicial durante ambas etapas son:

Redistribución de las zonas de permeabilidad constante, en aquellas zonas donde existen lagunas de información con objeto de optimizar la calibración del modelo.

Redistribución de las zonas de coeficiente de almacenamiento en toda la extensión del modelo, principalmente dirigida a la optimización de los volúmenes de almacenaje, recarga y descarga de las formaciones permeables. En este caso no ha sido necesario el retocar los valores de coeficiente de almacenamiento inicialmente cargados.

Durante el proceso de calibración el modelo conceptual experimentó algunas modificaciones, sugeridas por las propias deficiencias del modelo conceptual original. Los cambios más notorios se basan, fundamentalmente, en la distribución orográfica de determinados sectores de la cuenca, comprobándose que algunos de los escarpes no producen saltos piezométricos y que otros tienen menor continuidad longitudinal que la inicialmente supuesta.

Por tanto el objetivo del ajuste en régimen transitorio es reproducir de la forma más lógica posible, desde un punto de vista hidrogeológico, la situación hidrodinámica reflejada en la variación piezométrica observada producida por los bombeos llevados a cabo en los sondeos de captación. Una vez ajustadas dichas variaciones se llevan a cabo las simulaciones de explotación futura.

Para calibrar el modelo en los pozos de explotación ha sido necesario efectuar un ajuste hasta alcanzar la distribución piezométrica del mes de julio del año 2005. Una vez alcanzado, se han tomado los niveles piezométricos obtenidos para comenzar la simulación futura de los escenarios previstos. La distribución piezométrica inicial se representa en la figura nº 5 (Elaboración Propia WTECH,S.L.). adjunta, ya calibrada con los piezómetros de observación principales controlados en el periodo de estudio.

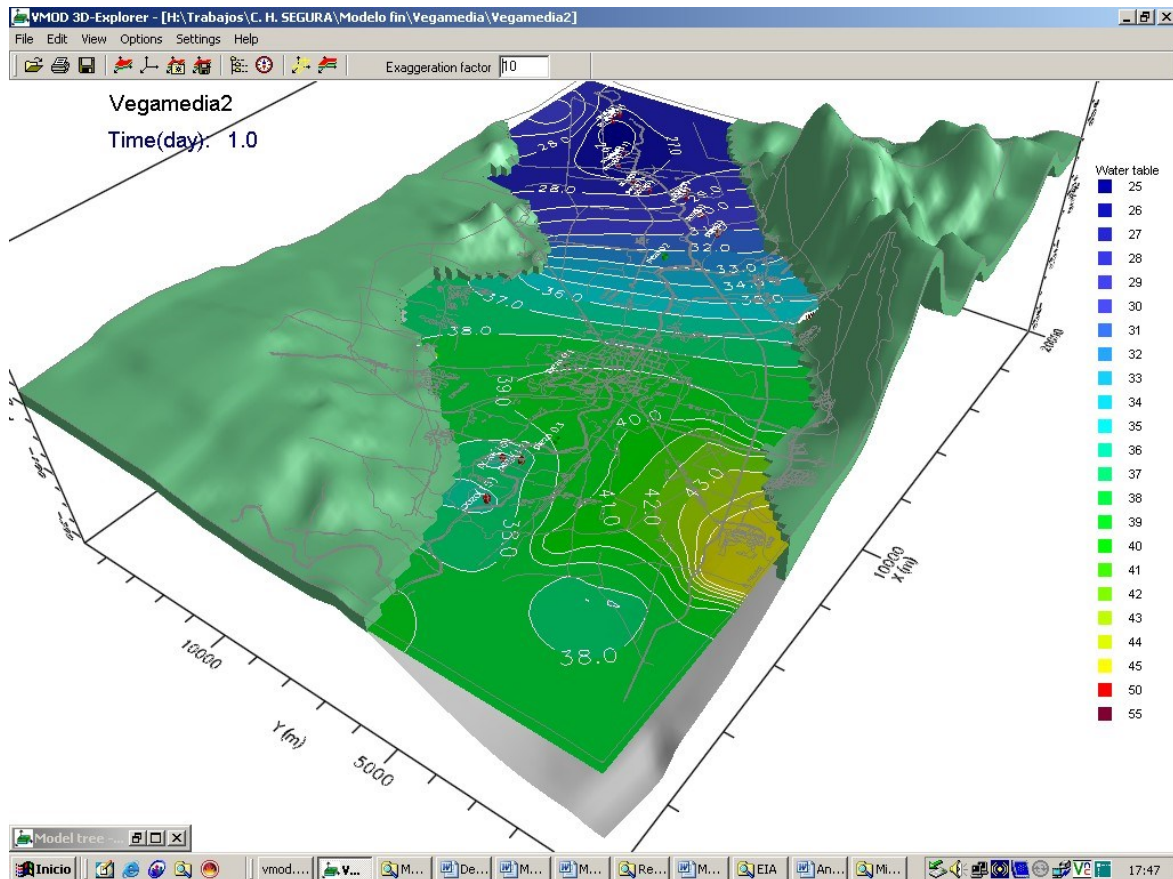


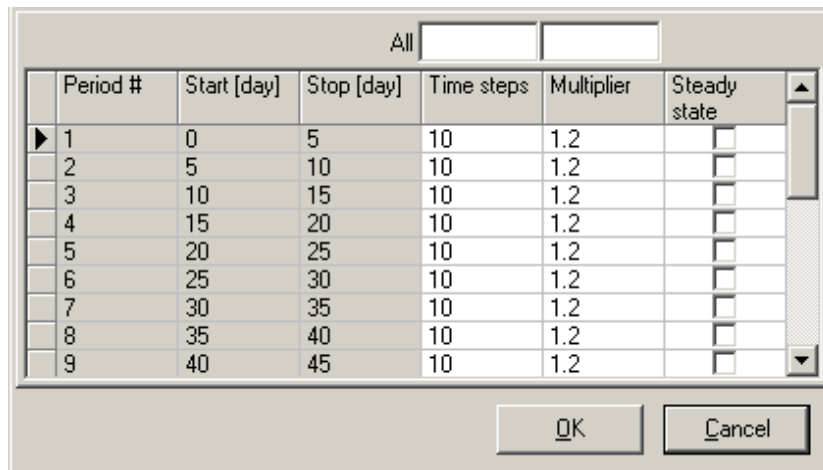
Figura 5. Distribución piezométrica al primer día de bombeo. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

3.5) SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE SEQUÍA PREVISTO

En primer término, se lleva a cabo la simulación de una extracción continua de 1.870 l/s, de 17 sondeos de emergencia de captación de aguas subterráneas para periodos de sequía según el emplazamiento proyectado, captando el nivel acuífero multicapa inferior, del Cuaternario. La explotación se simula para un periodo de 45 días, de acuerdo con la declaración de impacto, tiempo máximo en que se prevé la puesta en funcionamiento continua de la explotación del acuífero Cuaternario en periodos de sequía.

De cada uno de los sondeos se extrae un caudal continuo de 110 l/s. La zona ranurada enfrentada al acuífero productivo tiene una potencia media entre 30 de 40 m situándose en todos los casos por debajo de los 30 m de profundidad.

En la figura nº 6 (Elaboración Propia WTECH,S.L.), se indica la correlación de los periodos de modelización con el tiempo real en días. Cada uno de los periodos se divide a su vez en 10 estadios de base de cálculo ("steps"). Posteriormente se efectúan las proyecciones a 1 y tres años y la restauración de niveles en el siguiente periodo húmedo.



| Period # | Start [day] | Stop [day] | Time steps | Multiplier | Steady state |
|----------|-------------|------------|------------|------------|--------------------------|
| 1 | 0 | 5 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 2 | 5 | 10 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 10 | 15 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 4 | 15 | 20 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 5 | 20 | 25 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 6 | 25 | 30 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 7 | 30 | 35 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 8 | 35 | 40 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |
| 9 | 40 | 45 | 10 | 1.2 | <input type="checkbox"/> |

Figura 6. Discretización del espacio temporal en la modelización. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

Se han ubicado 3 piezómetros de referencia, con objeto de observar la evolución en tres puntos situados en el casco urbano, aguas arriba y aguas debajo de la Ciudad de Murcia. Piezómetro nº 1 (Emuasa), ubicado en el centro del casco urbano de Murcia, Piezómetro nº 2 (Machacanta), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja).

3.6) DESCRIPCIÓN GENERAL DE RESULTADOS

En función del escenario proyectado para el cálculo hidráulico, a continuación se describen los resultados obtenidos.

En la simulación llevada a cabo, tal y como puede apreciarse en el video de evolución de piezometría en 3D, resultantes (ver figura adjunta nº 7. Elaboración Propia WTECH,S.L), con una depresión máxima de 3 a 2,5 m, sin tener en cuenta las pérdidas de carga, en la batería de sondeos situada aguas arriba de Murcia, parte alta de la cuenca y de 1 a 2 m aguas abajo de la ciudad de Murcia. Esta depresión coincide, en términos generales, con las observaciones piezométricas realizadas en diferentes campañas en los piezómetros del entorno de las captaciones, por lo que se considera una calibración aceptable en el cálculo hidráulico del modelo.

En las figuras nº 8 (Elaboración Propia WTECH,S.L) se observa la evolución piezométrica de los piezómetros de referencia seleccionados. Piezómetro nº 1 (Emuasa), ubicado en el centro del casco urbano de Murcia, Piezómetro nº 2 (Machacanta), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja).

Tal y como puede apreciarse el descenso es menor aguas abajo de Murcia, del orden de 1 m, debido una distribución más amplia de potenciales hidráulicos por una mayor transmisividad y potencia del acuífero. Tanto en el casco urbano como aguas arriba de Murcia el descenso se sitúa en 2 m a los 45 días de bombeo, debido fundamentalmente a una menor transmisividad y potencia de los depósitos detríticos permeables.

Se debe tener en cuenta que la modelización llevada a cabo es altamente conservadora, tal y como se ha expuesto en anteriores apartados. El radio de influencia del bombeo simulado en la batería de sondeos situados aguas abajo de Murcia alcanza prácticamente hasta el límite de los impermeables, debido a la alta transmisividad del acuífero inferior en conjunto. En la batería de tres sondeos situada aguas arriba de Murcia el radio limita inmediatamente en el impermeable septentrional y posteriormente se abre hacia el exterior.

Esta modelización ha servido como base para planificar toda la estrategia de bombeo en el acuífero de la Vega Media, durante el periodo 2005 – 2009, con objeto de no provocar afecciones significativas al acuífero, ni a las cimentaciones de las edificaciones de la ciudad de Murcia. Así como para proyectar y simular toda la batería estratégica de sondeos para paliar los efectos de la sequía en la Vega Media del Segura en este caso, alumbrándose un total de 40 sondeos en este sector todos con caudales superiores a 100 l/s. Se han llegado a extraer más de 70 hm³ de la Vega media durante el periodo de sequía considerado, con una depresión máxima de 15 m en determinadas zonas críticas, alternando las zonas de bombeo, con objeto de minimizar afecciones, después de la explotación en el año 2009, se recuperan los niveles iniciales tal y como se simuló en la modelización.

Con la utilización de esta herramienta se ha propiciado de este modo la sostenibilidad del acuífero de la Vega Media del Segura ya que la explotación se acomoda a secuencias de normalidad y excepcionales, lo que favorece a que los posibles efectos que la explotación intensificada durante los periodos de emergencia y sequía, sean regenerados durante los periodos de normalidad.

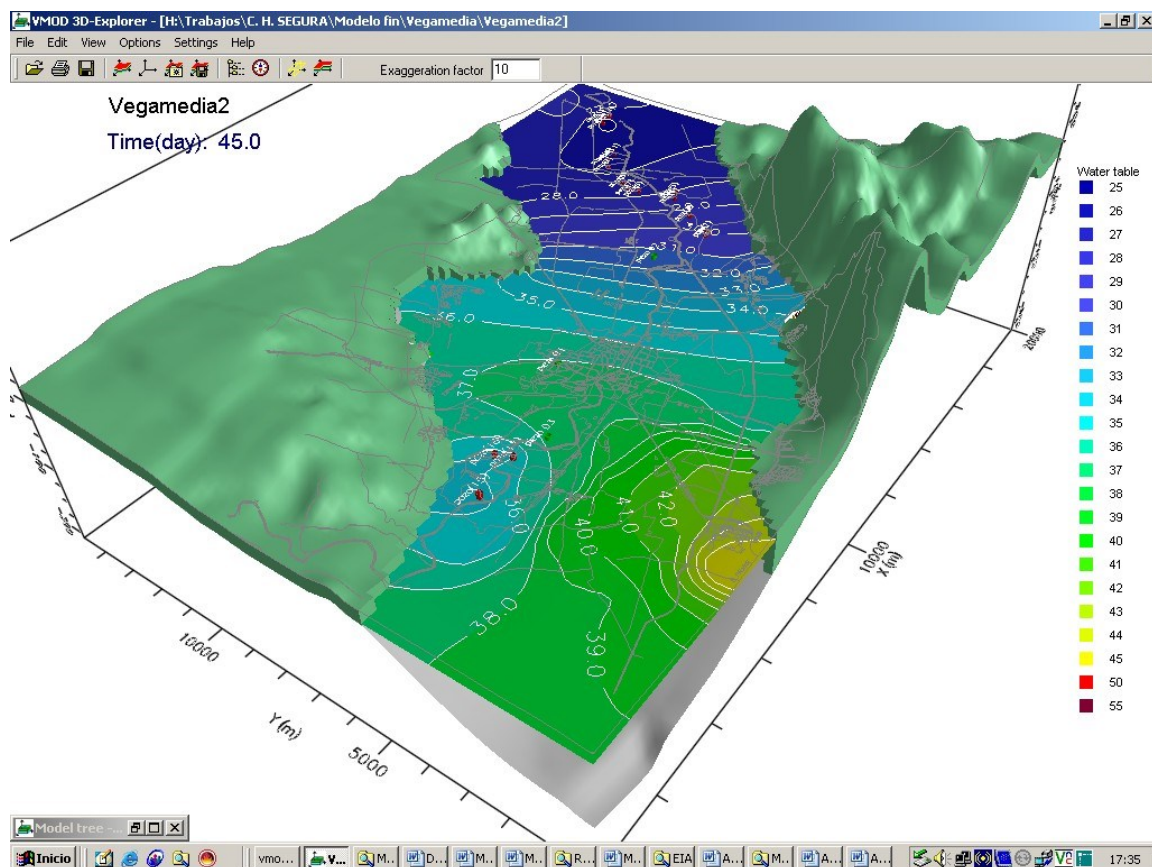


Figura 7. Distribución piezométrica a los 45 días de bombeo. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

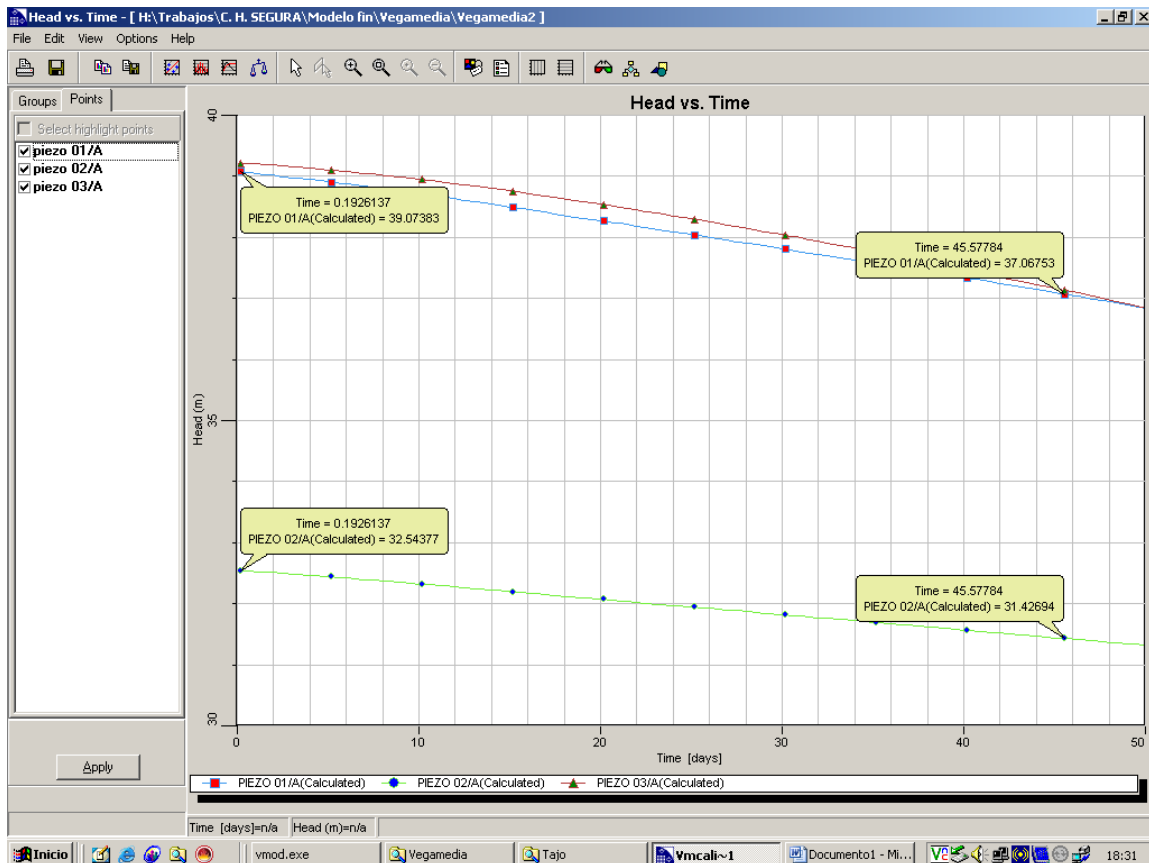


Figura 8. Evolución piezométrica en piezómetros de control seleccionados. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

4) RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las Directivas europeas, la DMA (incorporada a nuestro ordenamiento jurídico) y la relativa a la proyección de las Aguas Subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006) confieren al agua un marcado carácter ambiental y como tal, establece que los objetivos de la gestión, manejo y explotación del agua deben enmarcarse en la sostenibilidad a fin de preservar la cantidad y calidad de los recursos y poder garantizar las demandas.

Esos principios han impregnado cuantas normas, planes y programas se refieren a las aguas en general y a las aguas subterráneas en particular. Hay una tendencia general a considerar como condición de sostenibilidad una tasa de extracciones próxima a los recursos renovables de cada acuífero. Esta regla de gestión no puede ser considerada de manera absoluta, siendo particularmente lesiva en lugares con climas áridos y semiáridos donde los periodos húmedos pueden encontrarse espaciados varios años. Por ello, se hace necesario el desarrollar herramientas que simulen con carácter plurianual las extracciones en las explotaciones, ya que las sequías son de varios años y recuperan su normalidad al final de los periodos de estiaje.

Por otra parte, resulta esencial tomar conciencia de que las masas de agua subterráneas son bienes del dominio público que todos tienen derecho a usar, mediante las oportunas concesiones y a los que resulta muy difícil –además de complejo y oneroso– impedir el acceso. Además, las decisiones de gestión de cada usuario se encuentran influidas por las de los

restantes beneficiarios del acuífero, cuyas decisiones, tendentes en cada caso a maximizar el propio beneficio, difícilmente coinciden con un óptimo desarrollo social y, con frecuencia, nada tiene que ver con el principio de sostenibilidad.

Esta situación viene determinada por una falta de información generalizada sobre los criterios básicos que han de regir en una adecuada utilización del agua subterránea y de fertilización de suelos agrícolas y, muy especialmente, por un alto grado de desconocimiento de las características propias de los acuíferos sobre los que se asientan las captaciones que sostienen actividades, lo que dificulta la consecución de objetivos medioambientales (conservación de la cantidad y preservación de la calidad) e incide negativamente sobre lo que debe ser una explotación sostenible y por tanto en los intereses de los agricultores.

De esto se deriva la necesidad de desarrollar una estrategia de gestión sostenible que se asiente en los siguientes principios básicos:

- Buen conocimiento hidrogeológico
- Derechos y usos existentes
- Participación de usuarios
- Control sistemático de la evolución del acuífero
- Desarrollo de herramientas de simulación de escenarios (modelización)
- Gestión integrada con otros recursos

Es necesario disponer de un buen conocimiento de los acuíferos, en especial de los procesos y cuantificación de la recarga y del funcionamiento hidrogeológico, así como la distribución espacial y en profundidad de las extracciones. También se hace necesario contar con herramientas de modelización como la que en este artículo se presentan que simulen los diferentes escenarios de explotación posibles y visualizar las posibles afecciones, a los efectos de planificar la explotación en períodos de emergencia, proyectando con antelación las respuestas ante escenarios previsibles (sequías, efectos del cambio climático, deterioro de la calidad del agua, etc.), minimizando de este modo, tanto las afecciones, como los impactos económicos que repercuten de forma directa en los agricultores en este caso, además de en la sociedad en general.

BIBLIOGRAFÍA

CHS, 2007. Nueva aportación al conocimiento hidrogeológico del entorno urbano de Murcia. http://www.chsegura.es/chs/cuenca/sequias/sondeos_profundos. 177 p. Murcia.

IGME. (1978). Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Baja del Segura.

Manual. Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling Software.

Rueda, Ramón et al. (2.001). “Investigación de plaguicidas en las aguas subterráneas de la Vega Media del Segura (Murcia)”. VII Simposio de Hidrogeología. Murcia – 2.001.

Soto Venegas, José Manuel, Turrión Peláez, Luis Francisco *, Martínez Arias, Alfredo**; Hernández Soriano, J. Ignacio. (2008). Evolución Piezométrica En El Acuífero Profundo De La Vega Media Y Baja Del Segura. Uso Sostenible. IX Simposio de Hidrogeología Elche 2.008 (Volumen XXVIII).

Turrión Peláez, Luis Francisco; Martínez Arias, Alfredo; Soto Venegas, José Manuel; Hernández Soriano, J. Ignacio. (2008). Nueva Aportación Al Conocimiento De La Estructura



XXXIII Congreso Nacional de Riegos
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1443>

Profunda Y De La Hidrogeología De Las Vegas Media Y Baja Del Segura, Murcia. IX Simposio de Hidrogeología Elche 2.008 (Volumen XXVIII).

Waterloo Hydrogeologic, 2005. HydroGeo Analyst.