



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Estudio de la explotación de aguas subterráneas en dos masas de agua de la cuenca del Segura

Memoria

Trabajo final de grado

Titulación: Grado en Ingeniería Civil

Curso: 2014/15

Autor: Gil Tomás, Alberto

Tutor: Pérez Martín, Miguel Ángel

Valencia, junio de 2015

Índice de la memoria

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
3. Estudios previos	3
4. Situación geográfica	4
5. Metodología	5
5.1. Descripción del modelo	5
5.2. Análisis general de la cuenca del río Segura	9
5.3. Selección de masas de agua objeto de estudio	10
6. Aplicación del modelo en las masas a estudiar	12
6.1. Aplicación del modelo sobre la masa de agua subterránea Jumilla-Villena	12
6.1.1. Descripción y caracterización de la masa	12
6.1.2. Análisis de la masa mediante la aplicación del modelo	13
6.1.3. Estudio de posibles situaciones futuras	24
6.2. Aplicación del modelo sobre la masa de agua subterránea Caravaca	31
6.2.1. Descripción y caracterización de la masa	31
6.2.2. Análisis de la masa mediante la aplicación del modelo	33
6.2.3. Estudio de soluciones que mejoren el estado cuantitativo de la masa	47
7. Conclusiones	52
8. Referencias	53

1. Introducción

El informe que se presenta a continuación tratará de analizar las condiciones de explotación de las masas de agua subterránea de la cuenca del Segura. Teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas de la zona, así como las demandas de agua para abastecer a núcleos poblacionales y extensiones de tierras agrícolas, estas masas de agua se verán modificadas por la acción humana.

Partiendo de un análisis genérico sobre el estado de la cuenca se tomarán como ejemplo diferentes masas de agua que se consideren representativas de la problemática existente. Teniendo en cuenta que nos encontramos en una zona cálida, con escasez de precipitaciones, uno de los principales problemas a afrontar es la falta de recursos hídricos.

Por tanto, se tratará de conocer el estado aproximado de dichas masas de agua, así como de intentar encontrar solución a los problemas que se encuentren con relación a la escasez de recursos, con el fin de mitigar las consecuencias negativas que se puedan derivar de un posible mal estado de las masas de agua.

2. Objetivos

El presente estudio persigue dos objetivos principales: conocer el estado cuantitativo de las masas de agua objeto del estudio y su régimen de explotación, así como proponer las medidas que se consideren necesarias para mejorar dicho estado.

Con el fin de poder alcanzar dichos objetivos se procederá a realizar un análisis detallado sobre el funcionamiento de dichas masas de agua, lo que permitirá conocer de manera aproximada el estado cuantitativo que presentan en la actualidad. En base a los resultados obtenidos se abordará el planteamiento de diversas hipótesis sobre el comportamiento futuro que seguirán dichas masas de agua, lo que permitirá poder proponer una serie de medidas para mejorar dicho estado cuantitativo.

3. Estudios previos

Para llevar a cabo la realización de este estudio ha sido necesario consultar documentación previa para conocer la situación de la Cuenca Hidrográfica del Segura y decidir de qué manera se planteaban los trabajos a realizar.

Los documentos consultados a tal fin han sido la memoria y varios anejos de la Propuesta de proyecto de Plan Hidrológico de cuenca en la demarcación del río Segura 2015-21. En este documento, redactado por la Confederación Hidrográfica del Segura, se ha consultado el estado de las masas de agua subterránea, así como los usos que se dan al agua, los regímenes de explotación de las distintas unidades de demanda agraria y urbana, etc.

Se trata de un informe muy completo, en el que se indica con gran detalle toda la información necesaria para asentar las bases del estudio que se desea realizar.

Además de la información hidrológica consultada en el documento citado anteriormente, también se han consultado distintos estudios realizados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para conocer las condiciones que impondría la geología a la zona de estudio.

4. Situación geográfica

La cuenca hidrográfica del Segura se localiza en el sureste de la Península Ibérica y ocupa una superficie aproximada de 20.234 km² (19.025 km² si sólo se tiene en cuenta la parte continental, excluyendo las aguas costeras)

Dicha superficie engloba 132 municipios, cuyos territorios se encuentran repartidos entre cuatro Comunidades Autónomas españolas: Región de Murcia, Andalucía (en las provincias de Jaén, Granada y Almería), Castilla-La Mancha (provincia de Albacete) y Comunidad Valenciana (provincia de Alicante), estimándose una población superior a los 2 millones de habitantes.



5. Metodología

El estudio se basa en la creación, desarrollo y aplicación de un modelo de simulación con el que se puede obtener el comportamiento de una determinada masa de agua subterránea, teniendo en cuenta distintos parámetros e indicadores.

En primer lugar se abordará la creación de este modelo, explicando cada uno de sus componentes y como funciona cada uno de ellos. Se realizará un modelo que pueda ser aplicable a cualquier masa de agua sin que sufra excesivas modificaciones en función de la zona que se analice.

Posteriormente se realizará un estudio general de la cuenca hidrográfica del río Segura, en la que se establecerán una serie de criterios que permitirán la elección de las masas de agua que se estudiarán con mayor detalle.

Finalmente se aplicará dicho modelo de simulación a las masas de agua seleccionadas con anterioridad. En este último paso se tratará de conocer una aproximación al estado actual de cada una de las masas, así como una simulación de lo que ocurrirá en los próximos años. Una vez analizada cada masa, se tratará de proponer una serie de medidas que permitan mejorar el estado de cada una de ellas.

5.1. Descripción del modelo

El modelo que se va a utilizar tiene como finalidad principal proporcionar una representación gráfica de la evolución de los niveles piezométricos de una masa de agua subterránea a lo largo del tiempo.

Este modelo se basa en el empleo de una serie de ecuaciones que utilizan unos datos conocidos para obtener distintos parámetros fundamentales que finalmente permiten llegar a conocer cuál es el nivel piezométrico de una masa de agua subterránea en un momento determinado.

Una vez introducidos todos los datos conocidos en el modelo de simulación se procede a su ajuste con los datos de las series piezométricas de los distintos pozos de la red nacional. Para ello se han de suponer unos datos, que se deberán ir variando hasta conseguir que las alturas piezométricas que se obtienen mediante la aplicación del modelo se aproximen en la medida de lo posible a los datos reales tomados en los distintos piezómetros de la red.

A continuación se realiza una descripción sobre el modelo utilizado, que se ha creado utilizando la herramienta informática Microsoft Office Excel. Este modelo se ha realizado con intervalos de tiempo mensuales, aplicándolo desde en momento en que

se tienen datos reales medidos por los organismos correspondientes (Confederaciones Hidrográficas, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, etc.)

NOTA: a partir de este momento, en toda la formulación se asumirá que el subíndice k representa a la masa de agua y el subíndice t representa al mes en que estamos calculando

En primer lugar se estudian las entradas y salidas que presenta la masa de agua estudiada. Para ello se debe tener en cuenta las recargas que recibe desde el exterior, las pérdidas que sufre por manantiales o conexiones con masas de agua subterránea y los bombeos. Todo esto se relaciona de la siguiente manera:

$$Recn_{k,t} = Recl_{k,t} + Infc_{k,t} + Retr_{k,t} - Burb_{k,t} - Bagr_{k,t}$$

De esta forma, la recarga neta que se produce en un mes se obtiene como la suma del agua que entra en la masa restándole el agua que sale, es decir, la recarga neta de cada mes es igual al balance de ese mes. La recarga de lluvia y los retornos de riego serán siempre positivos, ya que se trata de volúmenes de agua que se infiltran en la masa de agua subterránea. Los bombeos, tanto urbanos como agrícolas, son volúmenes de agua que se extraen artificialmente por el ser humano, por lo tanto, se deben descontar del volumen que entra. Por su parte, las infiltraciones de cauces pueden ser positivas o negativas. Serán positivas en el caso de que nos encontremos en el caso de río perdedor, ya que en este caso es el río el que aporta agua a la masa de agua subterránea y, por el contrario, serán negativas en el caso de que existan surgencias por manantiales o nos encontremos en el caso de río ganador, en el que el río es el que toma agua de la masa de agua subterránea.

Una vez obtenido el balance de cada mes se obtiene el volumen de agua almacenada en la masa al final de cada mes.

$$V_{k,t} = (V_{k,t-1} - Vumb_k) \cdot e^{-\alpha_k} - \frac{Recn_{k,t}}{\alpha_k} \cdot (1 - e^{-\alpha_k}) + Vumb_k$$

Siendo α_k el coeficiente de descarga del acuífero;

V_{umb_k} el volumen umbral de acuífero de conexión con el río, de forma que por debajo de este volumen no existe conexión río-acuífero

El volumen umbral se determina a partir de la cota a la que se sitúa el estrato impermeable del acuífero y la cota de conexión río-acuífero.

$$V_{umb_k} = (h_{umb_k} - h_{o_k}) \cdot s_k$$

Siendo h_{umb_k} la cota a la que se produce la conexión río-acuífero;

h_{o_k} la cota del estrato impermeable del fondo del acuífero, es decir, la cota a la que el acuífero está vacío;

s_k el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

La consecuencia directa de esta última ecuación es que en el caso de que el nivel piezométrico se encuentre por encima de h_{umb_k} el acuífero estará conectado con el exterior, mientras que si está por debajo de esta cota se encontrará desconectado.

El volumen de agua que se drena a la red se obtiene por balance de masas

$$S_{sub_{k,t}} = (V_{k,t-1} - V_{k,t}) + Recn_{k,t}$$

Este volumen de agua drenado a la red en el mes "t" no será siempre el real, ya que únicamente se drenará dicho volumen en el caso de que el volumen de agua contenido en el acuífero a final del mes sea superior al volumen umbral del acuífero. En caso contrario, el volumen drenado desde el acuífero a la red fluvial será igual a cero.

Una vez obtenidos todos estos datos, ya es posible calcular el volumen final real de agua que estará contenido en el acuífero "k" al final del mes "t"

$$V_{d_{k,t}} = V_{k,t} - S_{sub_{k,t}} + Recn_{k,t}$$

Este volumen final de cada mes se considera como volumen inicial del mes siguiente.

Finalmente se obtiene la cota que tiene el agua en el interior del acuífero en el mes “t” relacionando la cota del fondo del acuífero con el volumen de agua que hay contenido en él

$$h_{k,t} = h_{o_k} + \frac{Vd_{k,t}}{S_k}$$

Hasta ahora se ha considerado que el acuífero que se está modelando está completamente desconectado de otras masas de agua subterránea, pero podría darse la situación de que este acuífero estuviese conectado hidráulicamente con otro que se encontrase próximo a él. Esto supondría que hubiese un flujo de agua desde uno hacia otro.

Este flujo de agua dependería de la diferencia de la cota del agua en cada uno de los acuíferos y del coeficiente de transferencia entre ambos acuíferos.

$$Q_{k1-k2,t} = \Delta h_{k1-k2,t} \cdot T_{k1-k2}$$

Donde “k1” y “k2” son los dos acuíferos en conexión y

$$\Delta h_{k1-k2,t} = h_{k1,t} - h_{k2,t}$$

En este caso, el volumen real de agua contenida en el acuífero al final de un mes (que se corresponderá con el volumen inicial del mes siguiente) se obtiene añadiendo este volumen de agua al acuífero que lo gana y quitándoselo al que lo pierde

$$Vdt_{k,t} = Vd_{k,t} + Q_{k1-k2,t}$$

Por último se debe recalcular la cota de agua en el acuífero, aplicando la misma ecuación que se utilizaba anteriormente

$$h_{k,t} = h_{o_k} + \frac{V dt_{k,t}}{S_k}$$

5.2. Análisis general de la cuenca del río Segura

En este apartado se va a abordar un análisis general del estado cuantitativo de las distintas masas de agua subterránea pertenecientes a la cuenca del río Segura. Esta cuenca hidrográfica está formada por 63 masas de agua subterránea.

Para realizar este análisis se tomará como base la Memoria de la Propuesta de proyecto del Plan Hidrológico de la demarcación del río Segura realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura en diciembre de 2014.

De acuerdo con esta memoria, el indicador que se tendrá en cuenta para valorar el estado cuantitativo de cada una de las masas de agua subterránea de la cuenca será el índice de extracciones (IE). Este indicador relaciona las extracciones con los recursos disponibles y, en función del valor obtenido, se clasifica el estado cuantitativo de la masa de agua como BUENO o MALO.

El estado de la masa se considera BUENO cuando el índice de extracciones es superior a 0.8 e inferior a 1 y no se observan descensos del nivel piezométrico o si el índice de explotaciones es menor de 0.8

El estado de la masa se considera MALO en los siguientes casos:

- Si el índice de extracciones es superior a 1
- Si el índice de extracciones es superior a 0.8 e inferior a 1 y no se ha podido demostrar que no se han producido descensos piezométricos o se ha demostrado que sí se han producido

Atendiendo al informe realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura, solamente 22 de las 63 masas de agua subterránea que pertenecen a la cuenca han obtenido un estado cuantitativo BUENO, mientras que las 41 restantes presentan un estado cuantitativo MALO.

5.3. Selección de masas de agua objeto de estudio

A continuación se definen los criterios que se seguirán para la selección de las dos masas de agua que se estudiarán en detalle en apartados posteriores. Estos criterios son los siguientes:

- Masa de agua que presente un estado cuantitativo MALO
- Masa de agua que se destine a abastecimiento urbano

De las 63 masas de agua subterránea que pertenecen a la Confederación Hidrográfica del Segura, únicamente cinco están destinadas a abastecimiento urbano.

- 070-023 Jumilla-Yecla
- 070.027 Serral-Salinas
- 070.032 Caravaca
- 070.057 Alto Guadalentín
- 070.061 Águilas

Estas cinco masas, además de emplearse para abastecimiento urbano, presentan un estado cuantitativo MALO. Es por ello que habrá que utilizar algún procedimiento para determinar cuáles de ellas serán objeto de estudio. En este caso, se optará por aquellas masas que presenten alguna característica significativa.

En el caso de la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla (070.023) cabe destacar que forma parte de una unidad mayor, la masa de agua subterránea Jumilla-Villena, formada por la mencionada masa de Jumilla-Yecla y por la masa Sierra de Castellar, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Júcar. Se trata, por tanto, de una masa de agua subterránea compartida por ambos organismos que, además, es empleada para abastecimiento urbano por ambos. Es por esto que se tendrá en cuenta a la hora de realizar un análisis detallado la totalidad de la masa de agua, es decir, se analizará como una unidad total la masa de agua subterránea Jumilla-Villena.

Otro caso significativo es el de la masa de agua de Caravaca (070.032). en este caso su índice de extracciones es de 0.25 por lo que si únicamente atendemos al valor de este índice, el estado cuantitativo de dicha masa debería calificarse como BUENO. Sin embargo. Las extracciones que se realizan en esta masa de agua provocan que la calidad de la misma sufra un descenso significativo, además de producirse descensos de los niveles piezométricos en determinadas zonas de la masa. Este hecho será decisivo a la hora de decidir incluirla en nuestro análisis detallado.

Por su parte, las tres masas restantes no presentan ninguna característica a destacar, ya que sus índices de explotación no son excesivamente altos y los principales problemas que presentan son de contaminación por nitratos, factor que no es objeto de análisis en el presente estudio.

Por tanto, se determina que las masas de agua que serán objeto de realizarles un análisis detallado para observar su comportamiento son Jumilla-Villena y Caravaca.

6. Aplicación del modelo en las masas a estudiar

Una vez desarrollado el modelo y seleccionadas las masas de agua objeto de estudio se procede al análisis detallado de las mismas mediante la aplicación del modelo. En un primer lugar se realiza un análisis de la evolución que han seguido las masas de agua hasta la actualidad y posteriormente, a la luz de los resultados obtenidos, se realizan diversas hipótesis de situaciones futuras.

6.1. Aplicación del modelo sobre la masa de agua subterránea Jumilla-Villena

6.1.1. Descripción y caracterización de la masa

La masa de agua subterránea Jumilla-Villena se extiende por el norte de la Región de Murcia y el noroeste de la provincia de Alicante. Está constituida por la unión de las masas de Jumilla-Yecla, de 255 km² perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Segura y la de Sierra del Castellar, con una extensión de 79 km² perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Júcar.

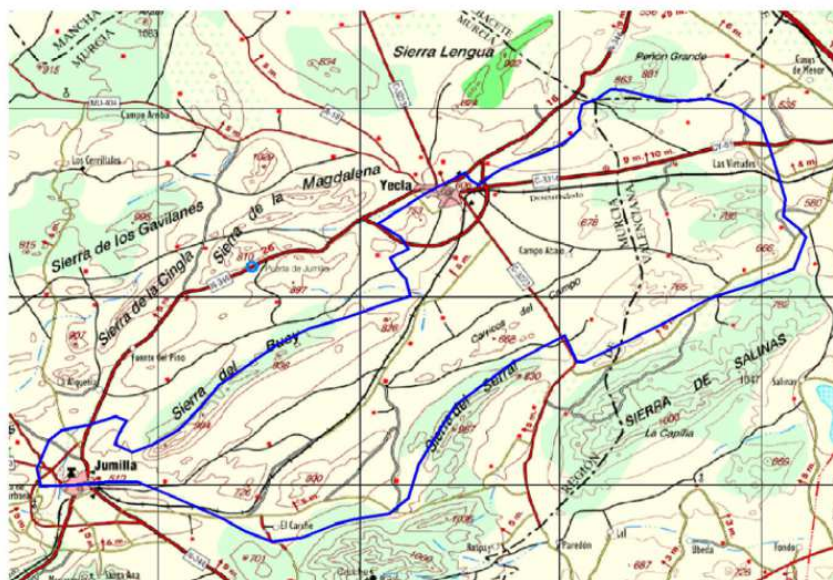
Los principales municipios que se encuentran en la zona son Jumilla y Yecla en la parte murciana y Villena en la parte de Alicante. El acuífero está declarado como sobreexplotado desde 1987.

En toda la extensión de esta masa no cabe destacar la presencia de ningún río ni masa de agua superficial importante en la actualidad, únicamente la presencia de algunas ramblas y arroyos que llevan agua en épocas de fuertes precipitaciones. En la antigüedad sí que existía una masa de agua superficial en la zona, la Laguna de Villena, próxima a este municipio y que tenía relación directa con el acuífero, que fue desecada en 1803 por Decreto Real de Carlos IV.

Estudios previos muestran una marcada tendencia descendente en todos los piezómetros y estaciones de medida que encontramos en la zona, lo que da evidencia de la sobreexplotación que sufre la masa. Asimismo, estos datos indican que la totalidad de la unidad se encuentra en su peor momento histórico en lo referido a niveles. En este sentido, se estima que cada año el nivel piezométrico del acuífero tiene un descenso medio de 3.5 metros.

Este acuífero no está conectado con el exterior, ya que los materiales de su base, totalmente impermeables, afloran a la superficie en todo su perímetro, generando de esta forma una masa totalmente desconectada del exterior por sus bordes. Las únicas

salidas que se producen lo hacen a través de manantiales y materiales impremeables en la zona interior del la unidad.



En la figura anterior, los límites del acuífero aparecen representados por una línea azul

6.1.2. Análisis de la masa mediante la aplicación del modelo

Puesto que se trata de una masa que ocupa una gran extensión de terreno (tiene una superficie total de 334 km²) se va a dividir en tres zonas para su estudio:

- Jumilla: ocupa la parte más occidental de la masa y tiene una extensión que se corresponde con el 60% del acuífero Jumilla-Yecla, es decir, su superficie es de 153 km²
- Yecla: ocupa la zona central de la masa y su extensión se corresponde con el 40% restante del acuífero Jumilla-Yecla, lo que supone una superficie de 102 km²
- Villena: ocupa la zona más oriental de la masa y su extensión se corresponde con la del acuífero Sierra de Salinas, es decir, 79 km²

El análisis de este acuífero se realizará con intervalos de tiempo mensuales, comenzando en el mes de octubre de 1965 y finalizando en el mes de septiembre de 2012, ya que las series de datos disponibles abarcan dicho periodo. Para proceder al análisis de la evolución de los niveles piezométricos que sufre el acuífero se deben introducir en el modelo todos los datos conocidos de recargas, bombeos, series de

mediciones realizadas en los piezómetros, etc., y a partir de ellos se supondrán unos valores de los parámetros que se desconocen que se irán variando hasta conseguir un ajuste lo más correcto posible entre los niveles piezométricos que nos proporcione el modelo y los reales medidos en los distintos piezómetros.

A continuación se indican todos los datos que se han tenido en cuenta para realizar el análisis

- Recargas de lluvia

Se dispone de una base de datos que nos proporciona los datos de recarga de lluvia sobre la superficie del acuífero entre las fechas anteriormente mencionadas. De esta manera, se asume que toda la recarga de lluvia producida en el acuífero Sierra del Castellar se infiltra en la zona de Villena, mientras que la producida sobre el acuífero Jumilla-Yecla se reparte proporcionalmente a la superficie entre las dos zonas que corresponde al mismo, correspondiendo un 60% a la zona denominada Jumilla y el 40% restante a la zona denominada Yecla

- Infiltración de cauces

No se disponen de las series de datos mensuales pero sí que se disponen del valor medio anual de la infiltración de cauces (ramblas, pequeños arroyos, etc.) que se ha producido en cada uno de los acuíferos. Al igual que antes se conoce el dato por separado de los acuíferos Jumilla-Yecla y Sierra del Castellar, por lo que se distribuirán de la misma forma que se hizo con la recarga de lluvia. Esta infiltración de cauces se supone constante a lo largo del año, por lo que a cada mes le corresponde una doceava parte de la recarga total. Medida en hm^3 , el valor anual de cada una de las tres zonas es el siguiente

- Jumilla: 0.56 hm^3
- Yecla: 0.38 hm^3
- Villena: 0.07 hm^3

En este caso los tres valores serían positivos, ya que el agua que circula por los pequeños cauces existentes se infiltra en el subsuelo y va a parar al acuífero

- Retornos de riego

En el caso de los retornos de riego ocurre lo mismo que con las infiltraciones de cauces, únicamente se dispone de datos medios anuales, por lo que la forma de distribuirlos entre las distintas zonas será análoga a la realizada anteriormente, con la salvedad de que en este caso los retornos de riego en el acuífero Jumilla-Yecla son nulos, por lo que el único valor que se introducirá en este caso son los 0.4 hm³ anuales del acuífero Sierra del Castellar que corresponde a la zona de Villena.

- **Bombeos urbanos**

Se dispone del valor medio anual de los bombeos realizados entre el año 1985 y el 2005. Es conocido que Yecla no recibe suministro urbano desde esta masa de agua, por lo que todos los bombeos urbanos del acuífero Jumilla-Yecla van a parar a Jumilla, mientras que todos los del acuífero Sierra del Castellar van a parar a Villena. Los valores medios anuales son los siguientes:

- Jumilla: 0.96 hm³
- Villena: 7.35 hm³

Estos datos nos indican que el municipio de Jumilla recibe agua para abastecimiento urbano de otros lugares, ya que la diferencia entre los dos bombeos es considerablemente grande. Cabe la posibilidad de que tanto Jumilla como Yecla reciban agua para abastecimiento urbano del acuífero Cingla, situado también en las proximidades de ambos municipios.

Además, estos bombeos no se han de suponer constantes a lo largo de todo el año, ya que en los meses estivales se consume más agua que en los meses de invierno. Es por ello que se introducirán los datos asignando a cada mes un porcentaje distinto de los bombeos medios anuales, siguiéndose el mismo patrón a lo largo de todos los años que se analizan. La distribución mensual de bombeos urbanos se muestra en la siguiente tabla

Mes	%	Mes	%
Enero	7	Julio	11
Febrero	7	Agosto	11
Marzo	7	Septiembre	11
Abril	7	Octubre	7
Mayo	7	Noviembre	7
Junio	11	Diciembre	7

También se considera que el volumen medio de agua bombeada para usos urbanos no ha permanecido constante a lo largo de los años. Esto es debido al progresivo aumento de la población, lo que ha provocado que se demande una mayor cantidad de agua para poder abastecer correctamente a los distintos núcleos poblacionales. Es por tanto que en la actualidad sí que se aplicará el volumen conocido pero estos valores se irán reduciendo conforme se retrocede en el tiempo, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Periodo	%
oct-65 - sept-75	80
oct-75 - sept-85	90
oct-85 - sept-12	100

- **Bombeo agrícola**

En el caso de los bombeos agrícolas ocurre lo mismo que con los urbanos, por lo que se procederá de forma análoga. Se toman los bombeos agrícolas medios anuales del acuífero Jumilla-Yecla y se distribuyen entre sus dos zonas en función de su extensión (60% para Jumilla y 40% para Yecla) y se asigna a la zona de Villena la totalidad de los bombeos agrícolas producidos en el acuífero Sierra del Castellar. Los valores de dichos bombeos son los que se indican a continuación.

- Jumilla: 14.82 hm³
- Yecla: 9.88 hm³
- Villena: 16.86 hm³

Al igual que ocurría con los bombeos urbanos se realiza una distribución temporal de los bombeos agrícolas a lo largo del año pero en esta ocasión se hace en tres niveles. Un primer nivel para los meses de verano en los que se necesita más agua para regar los cultivos, un segundo nivel para los meses más fríos, que serán los que menos agua necesitarán y un tercer nivel que se empleará para realizar la transición entre los dos anteriores, teniendo los bombeos un valor intermedio. La distribución de los bombeos agrícolas a lo largo del año queda resumida en la siguiente tabla:

Mes	%	Mes	%
Enero	3	Julio	15
Febrero	3	Agosto	15
Marzo	3	Septiembre	15
Abril	7	Octubre	7
Mayo	7	Noviembre	7
Junio	15	Diciembre	3

El aumento de la población también ha provocado un aumento de la producción, ya que se necesita mayor cantidad de alimentos para satisfacer las necesidades de la población. Como consecuencia, los bombeos agrícolas han ido aumentando a lo largo de los años, hecho que se refleja a la hora de introducir los datos al modelo. Este aumento de los bombeos queda reflejado a continuación

Periodo	%
oct-65 - sept-70	50
oct-70 - sept-75	60
oct-75 - sept-80	70
oct-80 - sept-85	80
oct-85 - sept-90	90
oct-90 - sept-12	100

Una vez expuestos los datos de que se dispone y que deben ser introducidos en el modelo se tratará el procedimiento a seguir para conocer los niveles piezométricos que presenta cada una de las zonas a lo largo del tiempo.

En primer lugar se realizará un análisis con las tres zonas desconectadas entre sí, despreciando los flujos de agua entre las mismas, para conocer dónde se sitúa el nivel piezométrico en cada una de ellas y la relación que existe entre ellos, es decir, en qué zonas es mas alto y en cuáles es más bajo para de esta manera poder determinar en qué dirección se producirán estos flujos de agua en un principio.

Para ello nos ayudaremos de los piezómetros que nos proporcionan las series de datos medidas sobre el comportamiento real del acuífero. En la masa de agua Jumilla-Villena se dispone de 11 piezómetros que se distribuyen de la siguiente manera:

- La zona de Jumilla cuenta con 6 piezómetros
- La zona de Yecla cuenta con 3 piezómetros
- La zona de Villena cuenta con 2 piezómetros

El procedimiento a seguir consiste en suponer unos valores de la cota del fondo del acuífero, la cota de conexión río-acuífero, el coeficiente de descarga del acuífero y el coeficiente de almacenamiento del acuífero. Una vez introducidos estos valores en el modelo se irán variando hasta conseguir que los niveles piezométricos que nos proporciona el modelo se asemejen en la medida de lo posible a los niveles reales medidos en los piezómetros.

Para iniciar la simulación del modelo se introducirán unos valores aleatorios de estos cuatro parámetros en cada una de las zonas. Con estos valores se calculará el volumen umbral de cada una de ellas, que se tomará como volumen existente en el acuífero al inicio del mes de octubre de 1965, punto en que empieza la simulación.

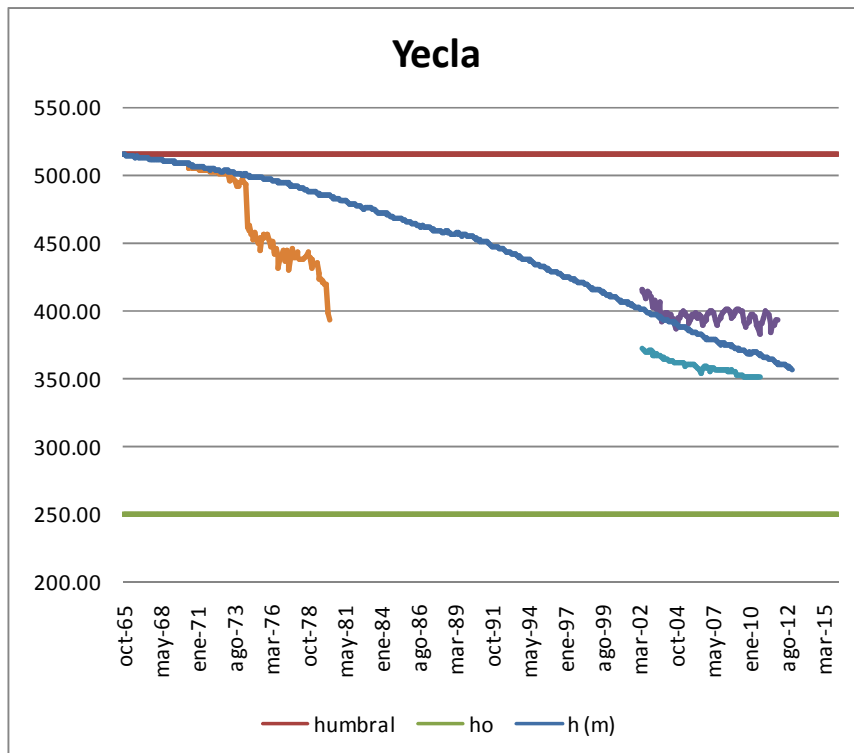
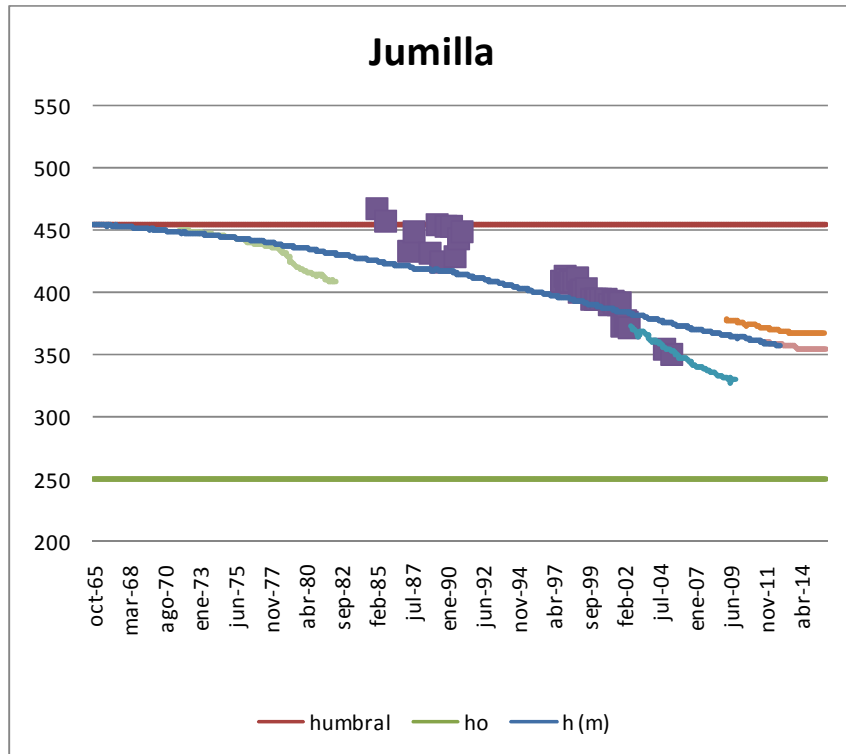
Una vez obtenido este volumen inicial de la simulación se aplican las ecuaciones indicadas anteriormente empleando los datos que se han expuesto al principio de este apartado. Con ello se obtiene la variación de la altura del agua en cada una de las zonas del acuífero, es decir, se obtiene la altura del nivel piezométrico en cada mes de simulación.

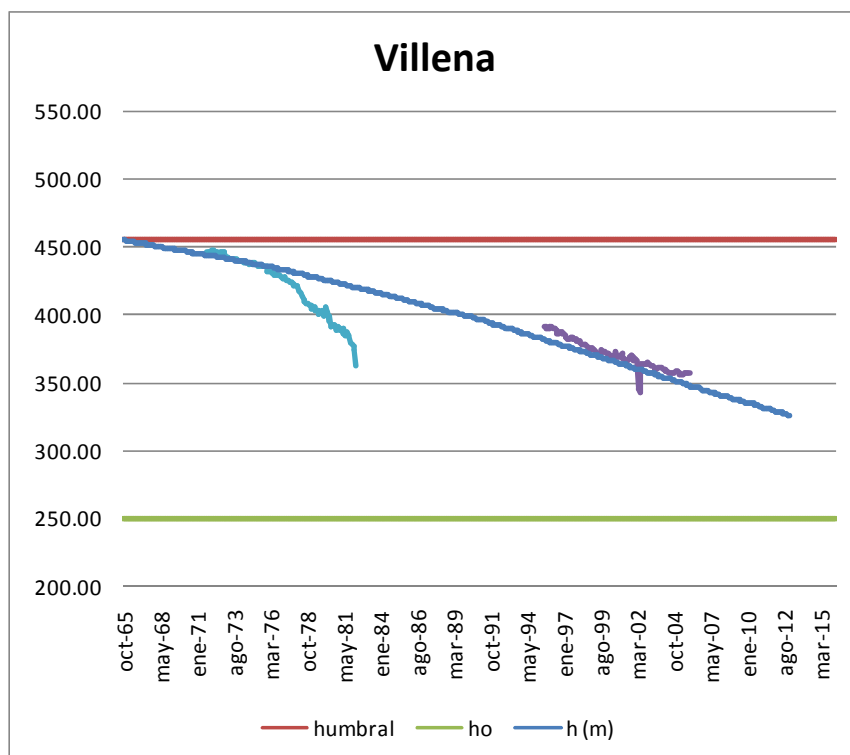
Variando estos valores de cota del fondo del acuífero, cota de conexión río-acuífero, coeficiente de almacenamiento y coeficiente de descarga se van modificando los resultados del modelo y de esta forma se va buscando el ajuste entre los valores reales y los simulados.

Una vez realizado este proceso obtenemos un ajuste con los siguientes parámetros

	Jumilla	Yecla	Villena
α	0.3	0.3	0.3
s (%)	4	2	9
humb (m)	455	515	455
ho (m)	250	250	250

Teniendo en cuenta estos valores, el modelo proporciona los siguientes resultados representados gráficamente.





En los gráficos se muestra la variación de cota del agua en cada acuífero a lo largo del tiempo, así como la cota del fondo del acuífero, la cota de conexión río-acuífero y distintas series de datos medidas en los piezómetros.

A la vista de los resultados se pueden hacer varias afirmaciones importantes:

- Las alturas del agua son en todo momento mayores en la zona central del acuífero (Yecla)
- Las zonas de Jumilla y de Villena se encuentran a la misma altura aproximadamente al principio pero, puesto que se ha visto que los bombeos son mayores en Villena, queda justificado el mayor descenso de niveles que se produce en este sector
- Estos resultados dan a entender que se está produciendo un flujo de agua desde la zona central hacia los extremos del acuífero

A continuación se realiza el mismo proceso conectando las distintas zonas tomando la hipótesis de flujo desde el centro hasta los extremos. Esto supondría que desde Yecla se produce un flujo de agua hacia Jumilla y hacia Villena. Lo que supondría una disminución del volumen almacenado en Yecla y un aumento del volumen almacenado en Jumilla y Villena.

Para ello es necesario modificar los valores del coeficiente de transferencia. Dicho coeficiente es nulo cuando las distintas zonas están desconectadas y toma valores positivos cuando se conectan entre sí.

A la hora de realizar el nuevo ajuste con las distintas zonas conectadas, además de ir variando el coeficiente de transferencia será necesario que también varíen el resto de parámetros (coeficiente de almacenamiento, cota de conexión río-acuífero, etc.), ya que si no se realizan estos cambios sería imposible conseguir un buen ajuste.

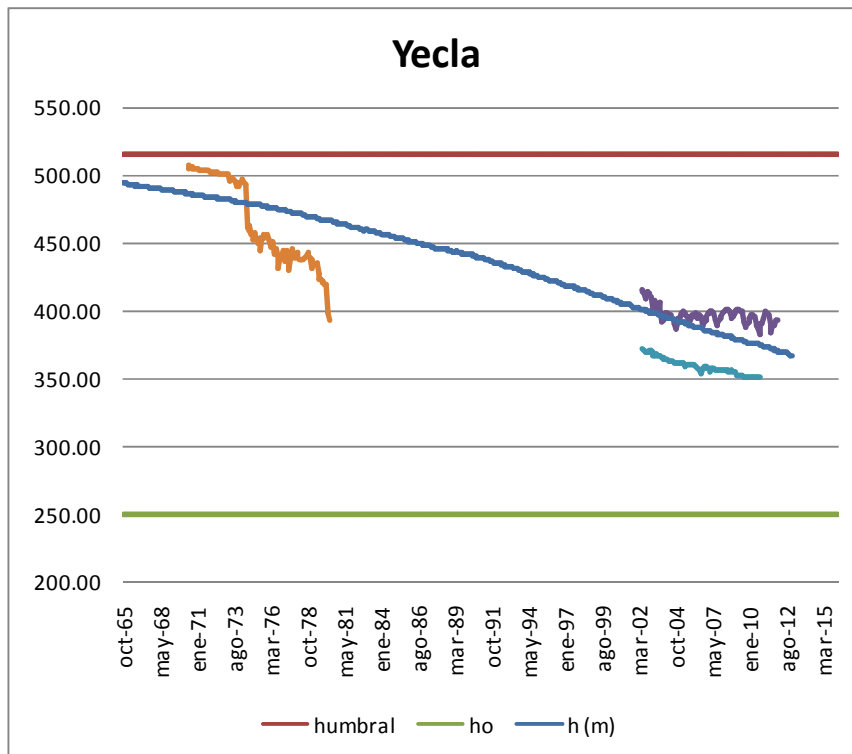
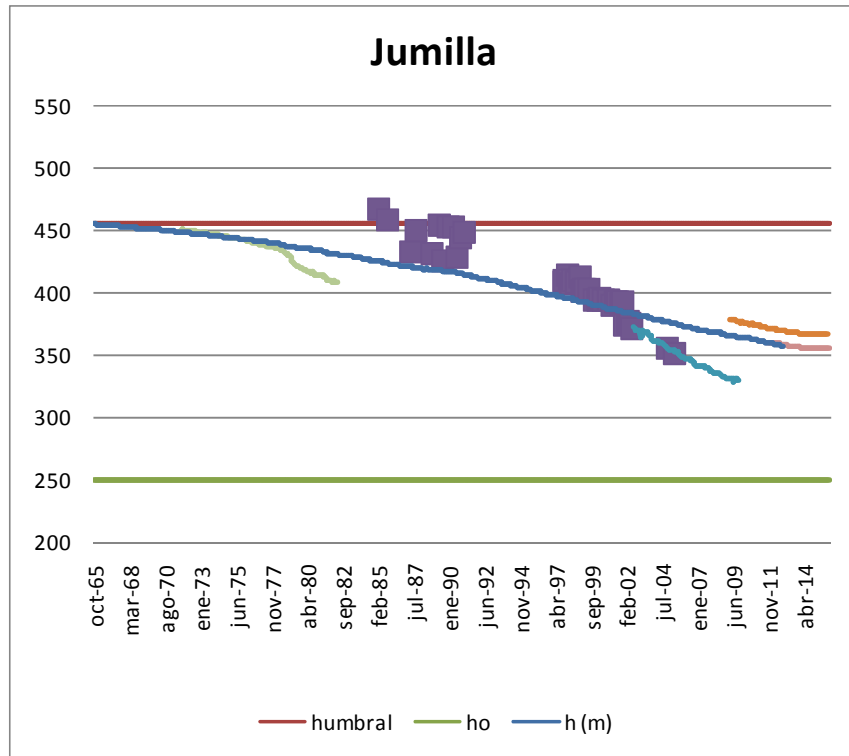
Procediendo de esta forma se observa que las zonas Yecla y Villena sí que se pueden ajustar correctamente mientras que la zona de Jumilla no se puede aproximar. Esto puede deberse a que la zona de Jumilla sigue un comportamiento distinto a las demás porque realmente se encuentra desconectada del resto de la masa.

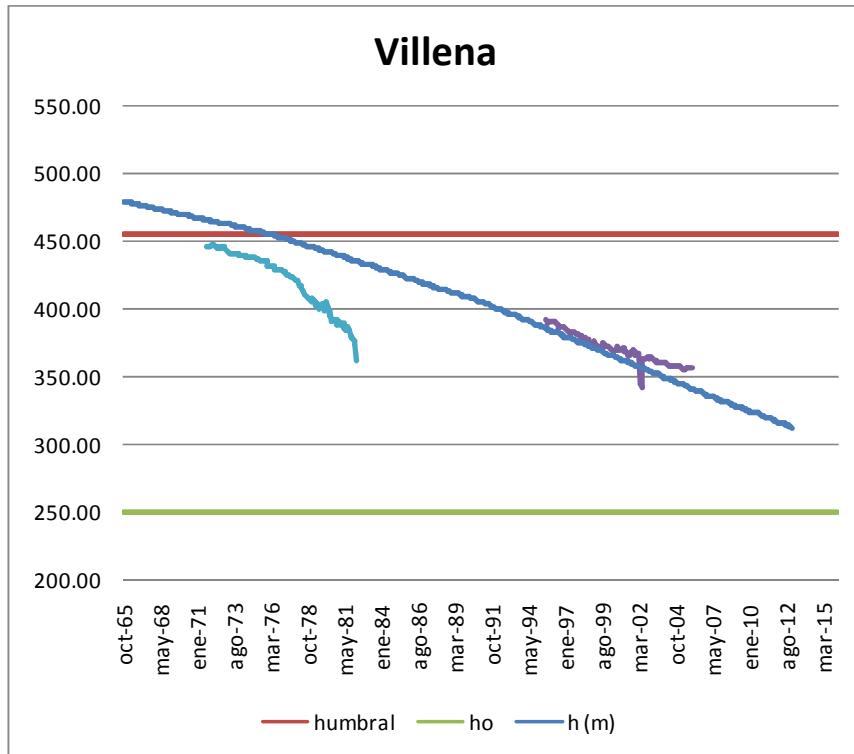
La consecuencia de este hecho es que se debe conservar el ajuste realizado en la zona de Jumilla manteniéndola desconectada del resto y que se deben ajustar correctamente las zonas de Yecla y Villena conectándolas entre sí.

El mejor ajuste conseguido se ha obtenido introduciendo en el modelo los siguientes valores de los distintos parámetros

	Jumilla	Yecla	Villena
α	0.3	0.3	0.3
s (%)	4	5	5
humb (m)	455	515	455
ho (m)	250	250	250
T	0	1.6	

Con estos valores los gráficos obtenidos son los siguientes:





Analizando los resultados obtenidos se puede apreciar claramente que se han producido cambios considerables con respecto a la situación anterior, en la que todas las zonas se encontraban desconectadas.

Puesto que la parte más occidental (Jumilla) continúa desconectada no se ha producido ninguna variación con respecto a la simulación anterior. Se aprecia como los niveles van descendiendo con el paso de los años debido a un balance negativo provocado porque los bombeos son superiores a las recargas.

En el caso de Villena se observa que, al inicio de la simulación, el nivel piezométrico se halla por encima de la altura umbral. Esto se podría deber a que, al estar recibiendo agua desde la zona de Yecla los niveles ascienden y se producen salidas hasta que los niveles quedan por debajo de dicha altura umbral. Existe la posibilidad de que dichas salidas se produzcan desde el acuífero hacia la laguna existente en la antigüedad que, aunque se encuentra desecada, sí que podría haber estado recibiendo agua durante un tiempo. Este hecho justificaría el flujo lateral Yecla-Villena.

Por último, en el caso de Yecla, se observa como los niveles al inicio de la simulación han descendido comparándolos con los obtenidos en el caso anterior. En esta ocasión, en el año 1965 el nivel ya se situaba por debajo de la altura umbral, debido a que se estaba produciendo un trasvase de agua desde la zona central de la masa hacia el extremo oriental. A partir de este momento se observa un descenso progresivo de los niveles que continúa hasta la actualidad.

6.1.3. Estudio de posibles situaciones futuras

En este apartado se va a tratar de ver cómo se desarrollará en un futuro el estado de la masa de agua subterránea suponiendo para ello distintas hipótesis. Para ello, se ampliará el estudio realizado hasta ahora, prolongándolo durante los próximos cuatro ciclos hidrológicos (2015-2021, 2012-2027, 2027-2033 y 2033-2039)

Puesto que la simulación anterior finalizaba en septiembre de 2012, para alcanzar una aproximación del estado que tendrá la masa en 2015 se harán las siguientes suposiciones:

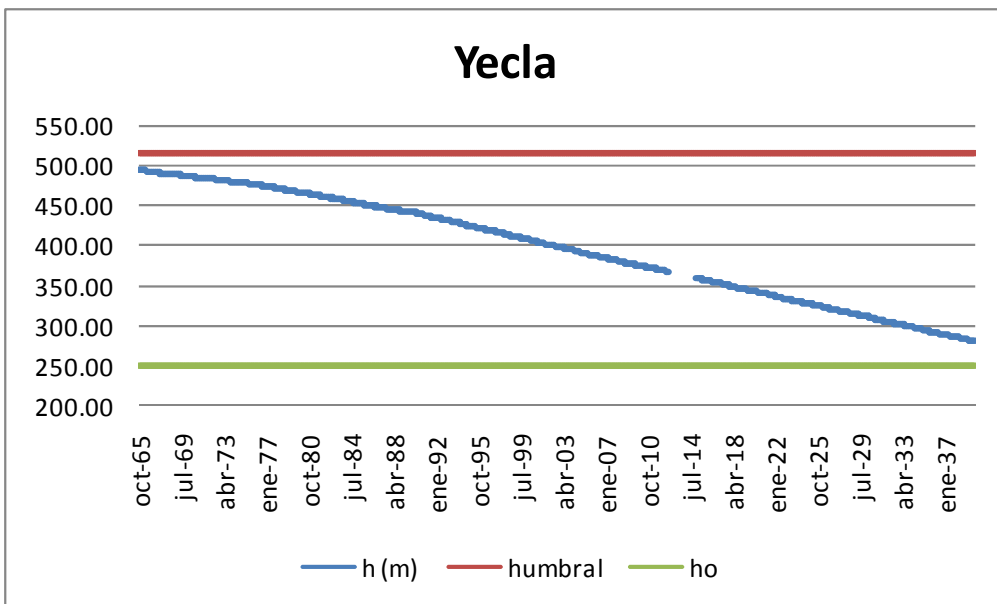
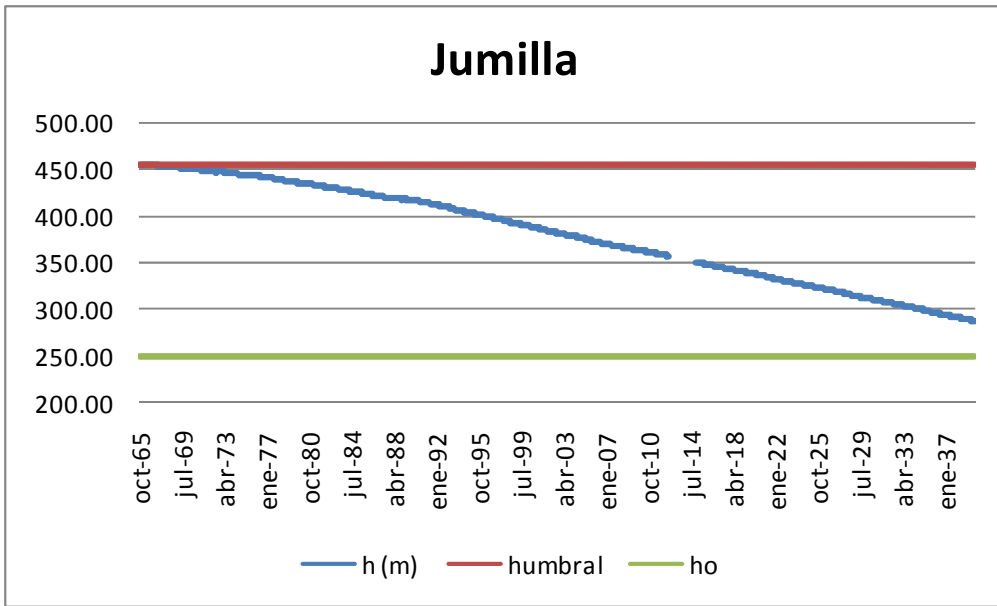
- El valor mensual de la recarga de lluvia entre septiembre de 2012 y enero de 2015 será el valor medio de los meses empleados en el modelo anterior
- Los bombeos, tanto urbanos como agrícolas, se mantendrán constantes e iguales a los que presentaba el último año de la simulación anterior
- La infiltración en cauces y los retornos de riego se considerarán constantes, al igual que se hizo en la simulación anterior

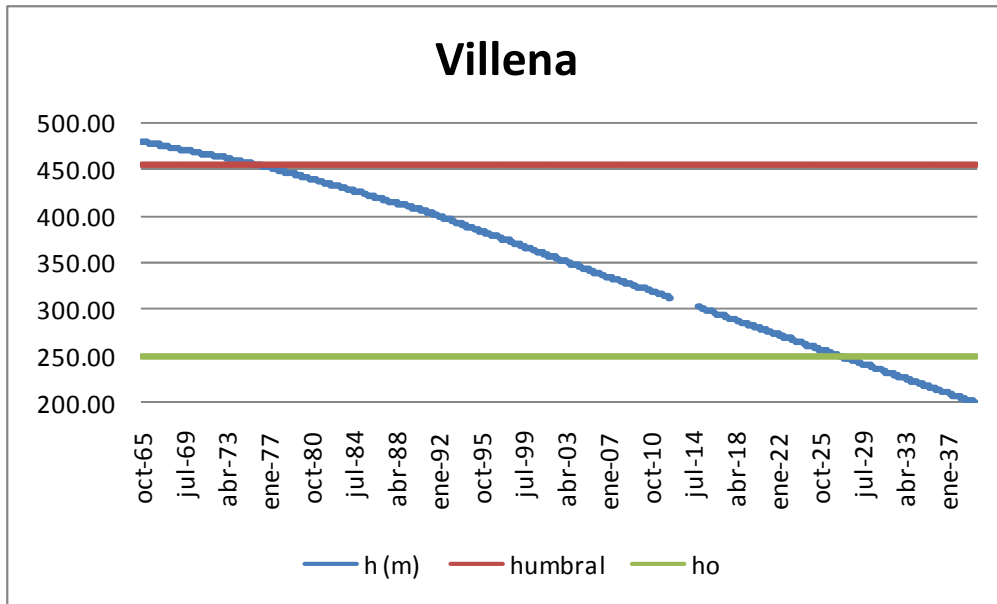
Teniendo estos aspectos en cuenta se van a plantear diferentes hipótesis que nos permitan analizar el modelo en diferentes situaciones. Lo que se pretende con ello es tratar de mejorar el estado cuantitativo de la masa de agua subterránea e intentar reducir su sobreexplotación.

- Hipótesis 1: simulación manteniendo los bombeos existentes hasta ahora

En esta primera hipótesis se mantienen los bombeos invariables con respecto a la simulación realizada entre 1965 y 2012. cabe esperar que llegará un momento en que el acuífero se vaciará por completo, ya que el descenso de los niveles alcanzará la cota del estrato impermeable que conforma la base del acuífero.

Desarrollando el modelo teniendo en cuenta esta hipótesis obtenemos los siguientes resultados.





Tal y como se esperaba, se puede observar que el descenso de los niveles continúa. En el caso de la zona de Villena se observa que en torno al año 2027 los niveles alcanzan el estrato impermeable de la base del acuífero, quedando el mismo completamente vacío. En los casos de Jumilla y Yecla esta circunstancia todavía no se ha producido en el año 2039 pero todo hace indicar que se producirá en un periodo de tiempo relativamente corto a partir de esta fecha

Para controlar el desarrollo de los niveles y poder realizar un seguimiento lo más completo posible de los mismos, sería conveniente instalar una red de piezómetros que permitan tener constancia de la evolución que sufra la masa de agua a lo largo del tiempo.

Es necesario buscar alternativas viables que eviten que se llegue a esta situación, ya que si se continúa sobreexplotando el acuífero como hasta ahora será prácticamente imposible el abastecimiento urbano de Villena en un plazo de tiempo relativamente corto y el de Jumilla en un plazo algo mayor.

Una medida que se podría plantear sería dejar de realizar los bombeos en la zona de Villena y asociarlos a la zona de Yecla que, como se aprecia, tiene los niveles más altos. Esto supondría que los descensos en Villena sean más controlados, retrasando el agotamiento del acuífero e intentando que los niveles se recuperen mientras que en Yecla estos descensos se verían incrementados y, en este caso, se agotaría el acuífero en un menor periodo de tiempo. En todo caso, esta solución es poco factible, ya que las zonas de Yecla y Villena pertenecen a distintas Confederaciones Hidrográficas, lo que supone una importante barrera para llevar a cabo esta solución.

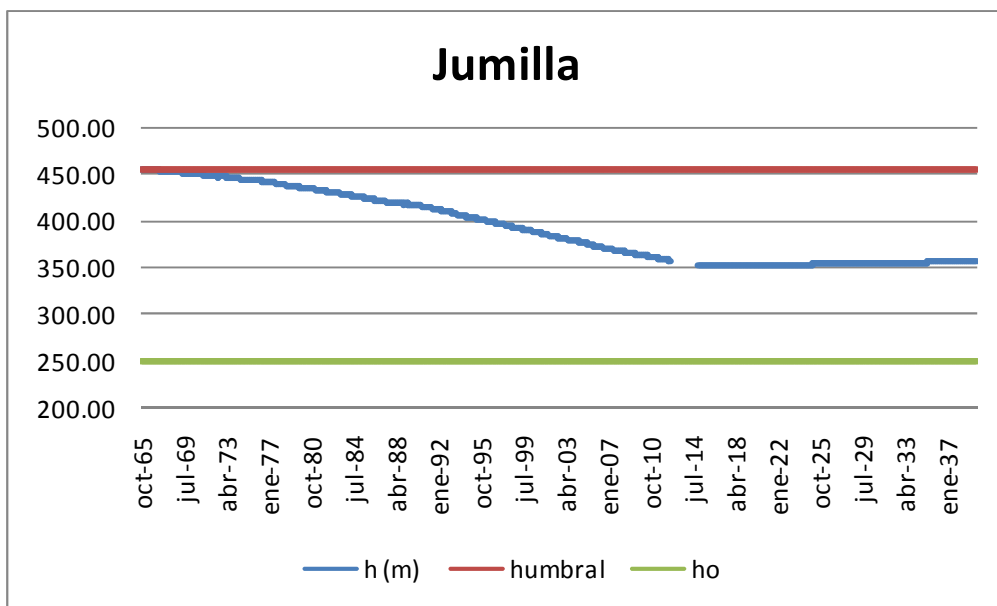
Teniendo en cuenta que no se podrán solucionar los problemas que presenta esta masa únicamente redistribuyendo los recursos dentro de la misma, será necesario obtener recursos de sistemas externos, bien sea directamente desde acuíferos próximos, trasvases de agua, etc.

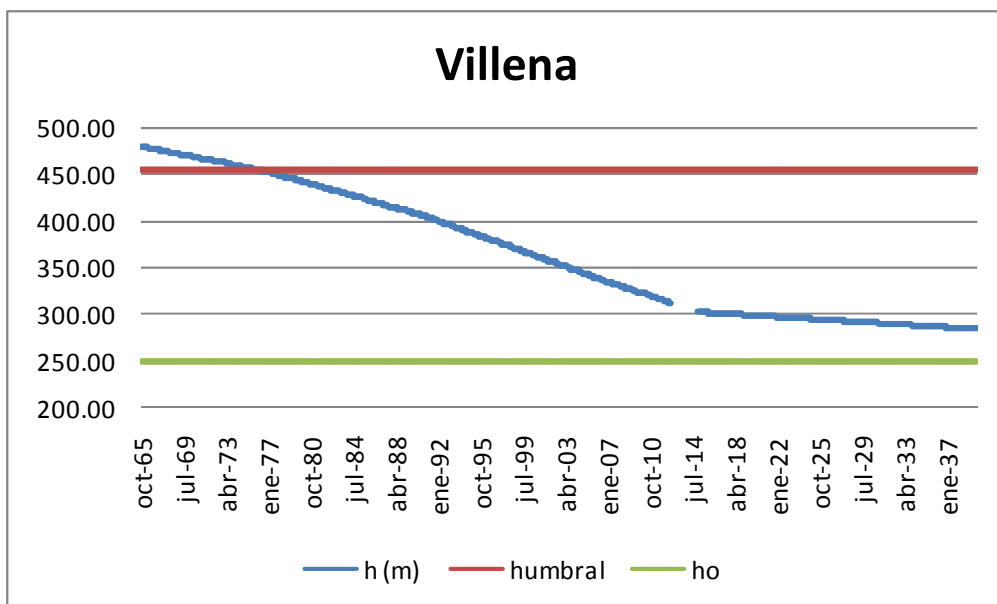
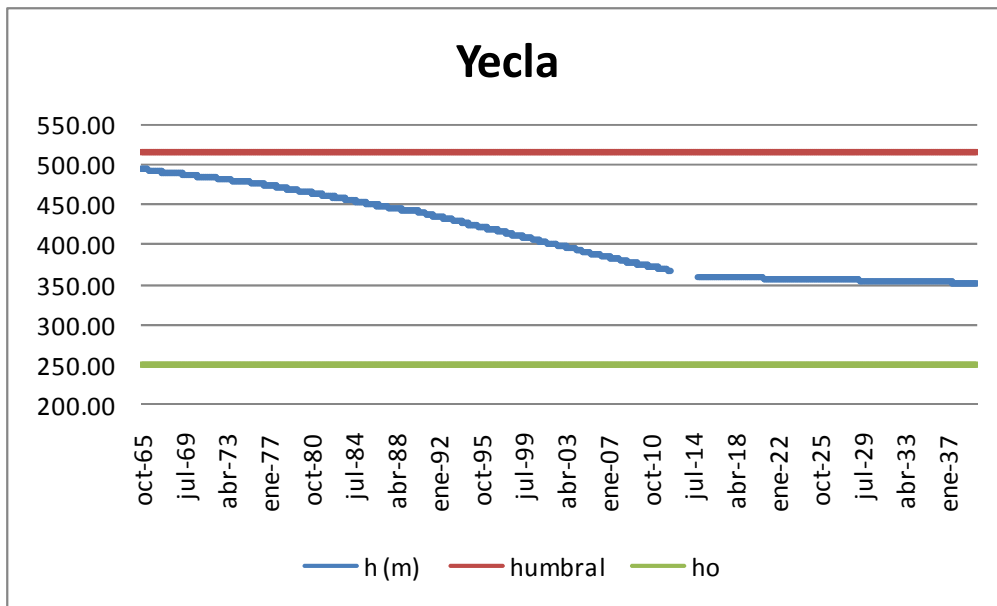
A continuación se realizarán otras hipótesis en las que se modificarán los regímenes de bombeo para comprobar de qué manera afecta este hecho al desarrollo de los niveles en el acuífero.

- Hipótesis 2: eliminación del bombeo agrícola

Esta última hipótesis supone la eliminación total de los bombeos destinados a usos agrícolas a partir del mes de enero de 2015. Esto conllevaría tener que buscar una nueva fuente de recursos hídricos pero, a priori, debería ayudar a la recuperación de los niveles de la masa de agua.

Aplicando esta hipótesis al modelo los resultados obtenidos son los siguientes





En contra de lo que se podía esperar a priori, en la única zona que se aprecia un leve ascenso de los niveles al eliminar los bombeos agrícolas es en la zona de Jumilla. Sí que es cierto que en las zonas de Yecla y Villena se ha minimizado el descenso de los niveles considerablemente, aunque estos continúan cayendo.

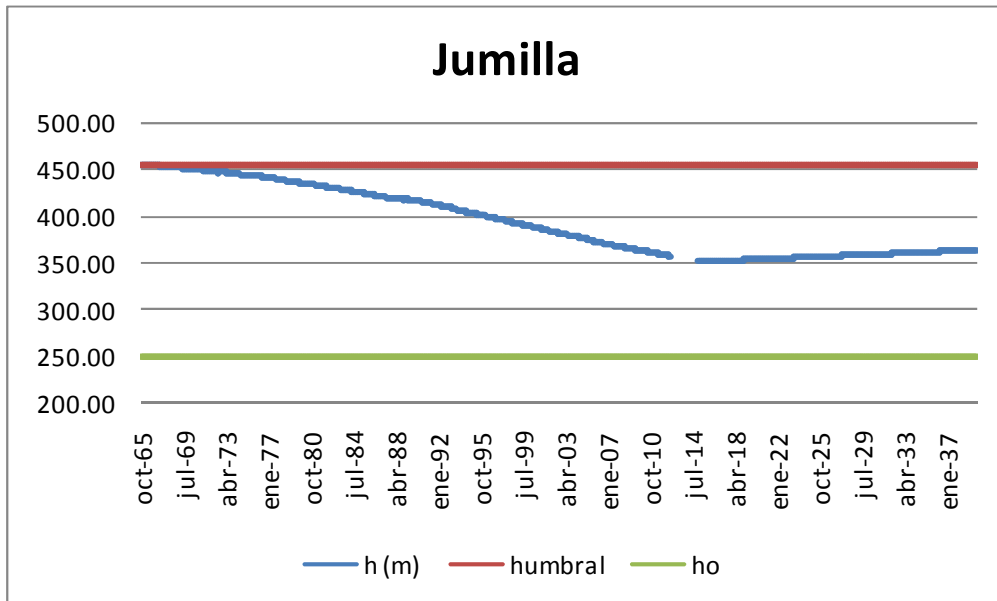
Puesto que en Jumilla se observa una ligera mejoría y en Yecla los descensos se encuentran prácticamente estabilizados, a corto plazo no supondrán un importante problema, ya que habría un amplio margen de tiempo para tratar de corregir este problema buscando distintas soluciones. En el caso de Villena los descensos continúan aunque no son tan acusados como en el caso anterior. Esto nos indica que es

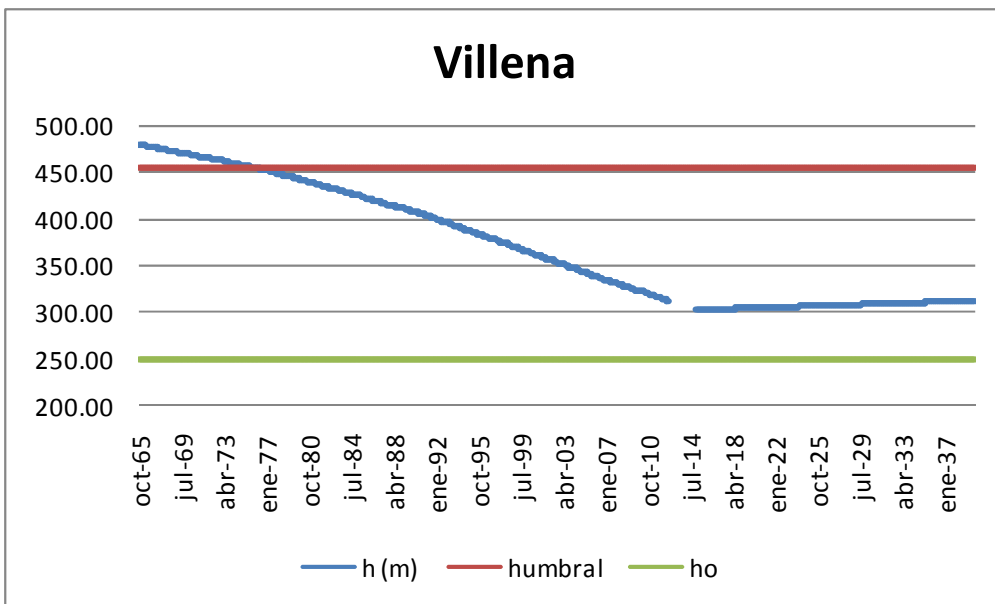
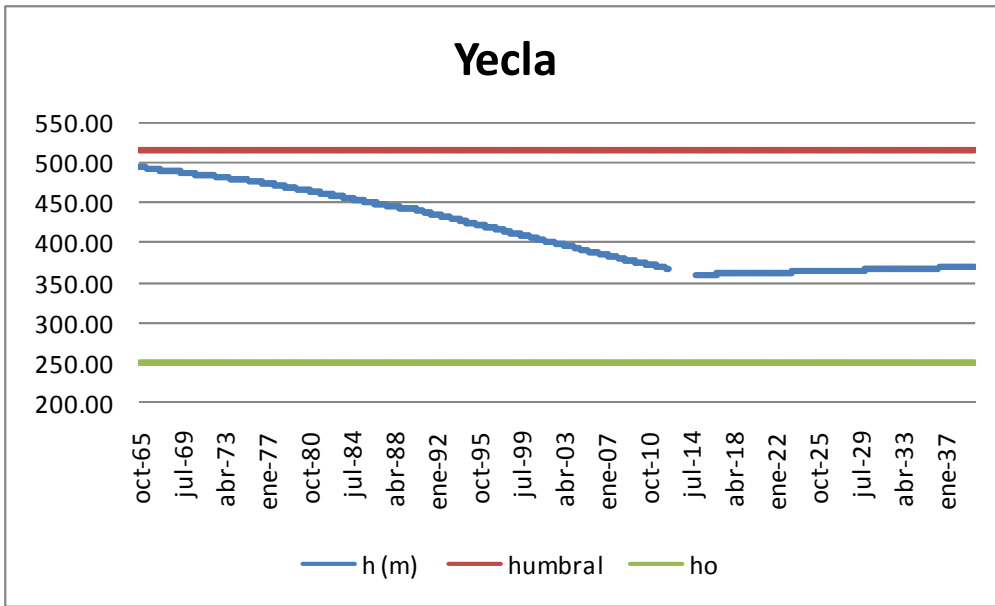
recomendable buscar nuevas fuentes de recursos exteriores al acuífero para sustituir los bombeos agrícolas de esta zona.

- Hipótesis 3: eliminación de bombeos urbanos y agrícolas

En este caso se plantea la eliminación total de todos los bombeos, ya estén destinados para abastecimiento urbano o para usos agrícolas, a partir del mes de enero del año 2015. Puesto que en la hipótesis anterior se comenzaban a recuperar los niveles en la zona de Jumilla y se producían leves descensos en el resto de la masa, se intentará comprobar si eliminando todos los bombeos se puede conseguir que los niveles aumenten en toda la extensión del acuífero.

Simulando el modelo teniendo en cuenta estas condiciones se obtienen los resultados que se muestran a continuación





Efectivamente, se observa que eliminando todo tipo de bombeos los niveles en las tres zonas del acuífero comienzan a ascender. Teniendo en cuenta que en la hipótesis anterior los niveles en la zona de Jumilla ya sufrían una ligera mejoría, es obvio que al eliminar el resto de bombeos esta mejoría se verá incrementada, ya que toda el agua que entra en el acuífero durante cada mes permanece en él al final de dicho periodo.

En el caso de la zona de Villena, los descensos eran muy pequeños al eliminar los bombeos agrícolas y, al eliminar también los urbanos, se consigue que estos niveles comiencen a recuperarse y sufran un ligero ascenso.

Finalmente cabe destacar lo que ocurre en el caso de la zona de Yecla. Puesto que no hay bombeos urbanos en esta zona lo lógico sería que los niveles se mantuvieran iguales que en el caso anterior pero se observa que en lugar de caer, van hacia arriba. Esto es debido a la conexión entre las zonas de Yecla y Villena. Puesto que la zona de Yecla cede agua a la de Villena debido a que los niveles en la primera son más altos, si tenemos en cuenta que este flujo de agua depende de la diferencia de nivel entre ambas partes, si en la zona más baja se produce un ascenso de los niveles, el caudal trasvasado será más pequeño por tanto, la zona más alta tendrá un ascenso de los niveles también.

En el caso de las tres zonas, la recuperación de los niveles es bastante lenta, ya que los bombeos que se realizaban eran muy superiores a las recargas, lo que suponía que los niveles descendieran a un ritmo relativamente rápido. Sin embargo, las recargas son de valores muy pequeños, lo que implica que, aún en ausencia de bombeos, los niveles van subiendo a un ritmo mucho más lento. Es por ello que se necesitará un largo periodo de tiempo sin realizar bombeos para que los niveles en el acuífero vuelvan a alcanzar la altura de conexión con el exterior.

La principal valoración que se puede realizar a la vista de los resultados que se han obtenido tras realizar estas tres hipótesis es que el descenso continuado de los niveles suponen un gasto energético y económico cada vez mayor. Esto es así porque conforme van bajando los niveles es mayor la altura que debe ascender el agua al extraerla con los equipos empleados para ello y, por tanto, ello conlleva un desembolso económico mayor y un gasto de energía superior.

6.2. Aplicación del modelo sobre la masa de agua subterránea Caravaca

6.2.1. Descripción y caracterización de la masa

La masa de agua subterránea de Caravaca está situada en el sector más occidental de la Región de Murcia, muy próxima al límite con la provincia de Granada. El acuífero queda situado en la margen derecha del río Segura y tiene una extensión de 677 km².

En la zona del acuífero se encuentran distintos núcleos poblacionales como son Caravaca de la Cruz, Cehegín o Moratalla, así como amplias zonas de terrenos agrícolas.

En referencia a las aguas superficiales de la zona, cabe destacar que el acuífero de Caravaca es atravesado por tres masas de agua superficial: el río Argos, el río Quípar y el Barranco de los Santos. Además dentro de la poligonal que describe también se

encuentra el Embalse de Argos. En el río Quípar, aguas abajo del acuífero pero próximo a él, se encuentra el Embalse de Alfonso XIII.

El acuífero tiene relación directa con las masas de agua que atraviesan su superficie, produciéndose distintos tramos de río ganador o río perdedor, en función de si es el acuífero el que cede agua al río o sucede lo contrario. En el caso de que sea el acuífero el que cede el agua al río, éste último mantendrá sus caudales o incluso se verán aumentados. En caso contrario, podría producirse una disminución considerable de los caudales del río en estas zonas de conexión con el acuífero.

Además de estas masas de agua superficiales, en la zona también se encuentran distintos manantiales o surgencias de agua naturales que generan pequeños humedales.

Esta masa de agua subterránea está dividida en nueve acuíferos internos que se encuentran parcialmente independizados por la presencia de materiales impermeables. Estos nueve acuíferos son

- Álamos
- Argos
- Gavilán
- Cerro Gordo
- Noguera
- Quípar
- Revolcadores-Serrata
- Sima
- Torre

Aunque estos acuíferos se encuentran parcialmente desconectados, sí que existen trasvases de agua entre ellos, por lo tanto, se considera la unidad completa del acuífero de Caravaca.

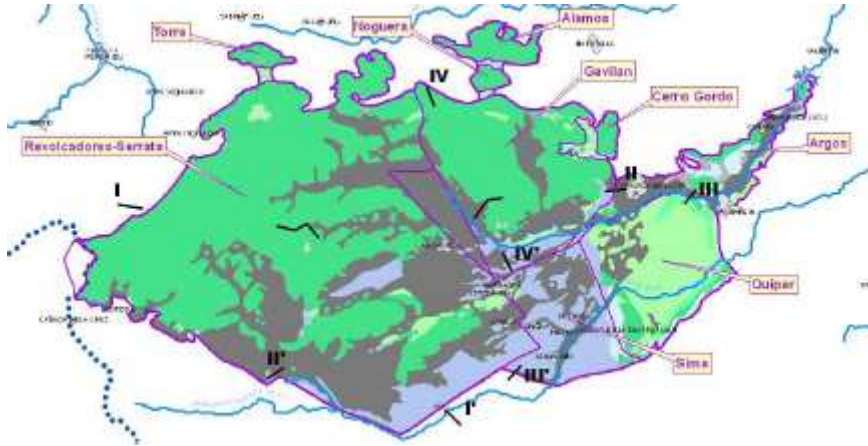
Por otra parte, el acuífero se encuentra conectado con el exterior únicamente a través de los tramos de río con los que tiene relación directa y con los manantiales que brotan a lo largo de todo su territorio.



6.2.2. Análisis de la masa mediante la aplicación del modelo

Puesto que se trata de una masa que ocupa una gran extensión de terreno (tiene una superficie total de 667 km²) se va a dividir en seis zonas para su estudio:

- Acuíferos Norte: en esta zona se agrupan los cuatro acuíferos de menor tamaño (Álamos, Cerro Gordo, Noguera y Torre). Esta agrupación se realiza debido a su proximidad y a que están totalmente desconectados del resto de la masa. Su extensión conjunta es de 22 km²
- Revolvedores-Serrata: se trata del acuífero de mayor extensión. Ocupa la zona más occidental de la masa y su extensión es de 372 km²
- Gavilán: es el segundo acuífero de mayor tamaño. Tiene una extensión de 126 km² y está situado en la zona central de la unidad
- Quípar: con una extensión de 100 km² se sitúa en la zona sureste del acuífero
- Argos: está situado en la zona más oriental de la masa y tiene una extensión de 23 km²
- Sima: situado al sur de Gavilán, su extensión es de 34 km²



El análisis de este acuífero se realizará con intervalos de tiempo mensuales, comenzando en el mes de octubre de 1965 y finalizando en el mes de septiembre de 2012, ya que las series de datos disponibles abarcan dicho periodo. Para proceder al análisis de la evolución de los niveles piezométricos que sufre el acuífero se deben introducir en el modelo todos los datos conocidos de recargas, bombeos, series de mediciones realizadas en los piezómetros, etc., y a partir de ellos se supondrán unos valores de los parámetros que se desconocen que se irán variando hasta conseguir un ajuste lo más correcto posible entre los niveles piezométricos que nos proporcione el modelo y los reales medidos en los distintos piezómetros.

A continuación se indican todos los datos que se han tenido en cuenta para realizar el análisis

- Recargas de lluvia

Se dispone de una base de datos que nos proporciona los datos de recarga de lluvia sobre la superficie del acuífero entre las fechas anteriormente mencionadas. En la base de datos de la que se han obtenido los datos la masa de agua subterránea de Caravaca aparece dividida en tres partes. Se ha estudiado la correspondencia de cada una de estas partes con las seis zonas en que se ha dividido el acuífero y se ha asignado a cada una de ellas la recarga de lluvia que le correspondería teniendo en cuenta su extensión, es decir, la recarga de lluvia se ha distribuido proporcionalmente a la superficie de cada zona.

- Infiltración de cauces

No se disponen de las series de datos mensuales pero sí que se disponen del valor medio anual de la infiltración de cauces (ramblas, pequeños arroyos, etc.) que se ha

producido en cada uno de los tres zonas en que se dividía la masa (según la base de datos empleada). Al igual que antes se conoce el dato por separado de las tres partes por separado, por lo que se distribuirán de la misma forma que se hizo con la recarga de lluvia. Esta infiltración de cauces se supone constante a lo largo del año, por lo que a cada mes le corresponde una doceava parte de la recarga total. Medida en hm^3 , el valor anual de cada una de las seis zonas es el siguiente

- Acuíferos Norte: 0 hm^3
- Revolcadores-Serrata: 0.05 hm^3
- Gavilán: 0.16 hm^3
- Quípar: 0.58 hm^3
- Argos: 0.52 hm^3
- Sima: 0.09 hm^3

En este caso los seis valores serían positivos, ya que el agua que circula por los pequeños cauces existentes se infiltra en el subsuelo y va a parar al acuífero

- Retornos de riego

En el caso de los retornos de riego ocurre lo mismo que con las infiltraciones de cauces, únicamente se dispone de datos medios anuales, por lo que la forma de distribuirlos entre las distintas zonas será análoga a la realizada anteriormente. En este caso los valores que se introducen al modelo son los siguientes

- Acuíferos Norte: 0 hm^3
- Revolcadores-Serrata: 0.28 hm^3
- Gavilán: 0.12 hm^3
- Quípar: 0.16 hm^3
- Argos: 0.08 hm^3
- Sima: 0.04 hm^3

Estos valores serán constantes a lo largo de todo el año

- **Bombeos urbanos**

Se dispone del valor medio anual de los bombeos realizados entre el año 1985 y el 2005. Al igual que en los casos anteriores, se conocen los datos de la masa de Caravaca dividida en tres partes, por lo que se procede de la misma manera que anteriormente. Se relacionan estas tres partes con las seis zonas en que se ha dividido la masa para abordar el análisis y se distribuyen los bombeos proporcionalmente a la superficie de cada una. Los valores medios anuales son los siguientes:

- Acuíferos Norte: 0 hm³
- Revolvedores-Serrata: 0.49 hm³
- Gavilán: 0.21 hm³
- Quípar: 0.27 hm³
- Argos: 0.14 hm³
- Sima: 0.07 hm³

Estos bombeos no se han de suponer constantes a lo largo de todo el año, ya que en los meses estivales se consume más agua que en los meses de invierno. Es por ello que se introducirán los datos asignando a cada mes un porcentaje distinto de los bombeos medios anuales, siguiéndose el mismo patrón a lo largo de todos los años que se analizan. La distribución mensual de bombeos urbanos se muestra en la siguiente tabla

Mes	%	Mes	%
Enero	7	Julio	11
Febrero	7	Agosto	11
Marzo	7	Septiembre	11
Abril	7	Octubre	7
Mayo	7	Noviembre	7
Junio	11	Diciembre	7

También se considera que el volumen medio de agua bombeada para usos urbanos no ha permanecido constante a lo largo de los años. Esto es debido al progresivo aumento de la población, lo que ha provocado que se demande una mayor cantidad de agua para poder abastecer correctamente a los distintos núcleos poblacionales. Es por tanto que en la actualidad sí que se aplicará el volumen conocido pero estos valores se irán reduciendo conforme se retrocede en el tiempo, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Periodo	%
oct-65 - sept-75	80
oct-75 - sept-85	90
oct-85 - sept-12	100

- Bombeo agrícola

En el caso de los bombeos agrícolas ocurre lo mismo que con los urbanos, por lo que se procederá de forma análoga. Se toman los bombeos agrícolas medios anuales de las tres partes en que se dividía el acuífero de Caravaca en la base de datos y se distribuyen proporcionalmente a la superficie de cada una de las seis zonas tras haber realizado la correspondencia entre las distintas zonificaciones. Los valores de dichos bombeos son los que se indican a continuación.

- Acuíferos Norte: 0.2 hm³
- Revolcadores-Serrata: 3.6 hm³
- Gavilán: 1.52 hm³
- Quípar: 2.01 hm³
- Argos: 1.05 hm³
- Sima: 0.51 hm³

Al igual que ocurría con los bombeos urbanos se realiza una distribución temporal de los bombeos agrícolas a lo largo del año pero en esta ocasión se hace en tres niveles. Un primer nivel para los meses de verano en los que se necesita más agua para regar los cultivos, un segundo nivel para los meses más fríos, que serán los que menos agua necesitarán y un tercer nivel que se empleará para realizar la transición entre los dos anteriores, teniendo los bombeos un valor intermedio. La distribución de los bombeos agrícolas a lo largo del año queda resumida en la siguiente tabla:

Mes	%	Mes	%
Enero	3	Julio	15
Febrero	3	Agosto	15
Marzo	3	Septiembre	15
Abril	7	Octubre	7
Mayo	7	Noviembre	7
Junio	15	Diciembre	3

El aumento de la población también ha provocado un aumento de la producción, ya que se necesita mayor cantidad de alimentos para satisfacer las necesidades de la población. Como consecuencia, los bombeos agrícolas han ido aumentando a lo largo de los años, hecho que se refleja a la hora de introducir los datos al modelo. Este aumento de los bombeos queda reflejado a continuación

Periodo	%
oct-65 - sept-70	50
oct-70 - sept-75	60
oct-75 - sept-80	70
oct-80 - sept-85	80
oct-85 - sept-90	90
oct-90 - sept-12	100

Una vez expuestos los datos de que se dispone y que deben ser introducidos en el modelo se tratará el procedimiento a seguir para conocer los niveles piezométricos que presenta cada una de las zonas a lo largo del tiempo.

En primer lugar se realizará un análisis con las seis zonas desconectadas entre sí, despreciando los flujos de agua entre las mismas, para conocer dónde se sitúa el nivel piezométrico en cada una de ellas y la relación que existe entre ellos, es decir, en qué zonas es más alto y en cuáles es más bajo para de esta manera poder determinar en qué dirección se producirán estos flujos de agua en un principio.

Para ello nos ayudaremos de los piezómetros que nos proporcionan las series de datos medidas sobre el comportamiento real del acuífero. En la masa de agua subterránea de Caravaca se dispone de 15 piezómetros que se distribuyen de la siguiente manera:

- En Acuíferos Norte no existe ningún piezómetro
- En Revolcadores-Serrata existen 9 piezómetros
- En Gavilán existe 1 piezómetro
- En Quípar existen 2 piezómetros
- En Argos existe 1 piezómetro
- En Sima existen 2 piezómetros

El procedimiento a seguir consiste en suponer unos valores de la cota del fondo del acuífero, la cota de conexión río-acuífero, el coeficiente de descarga del acuífero y el coeficiente de almacenamiento del acuífero. Una vez introducidos estos valores en el modelo se irán variando hasta conseguir que los niveles piezométricos que nos

proporciona el modelo se asemejen en la medida de lo posible a los niveles reales medidos en los piezómetros.

Para iniciar la simulación del modelo se introducirán unos valores aleatorios de estos cuatro parámetros en cada una de las zonas. Con estos valores se calculará el volumen umbral de cada una de ellas, que se tomará como volumen existente en el acuífero al inicio del mes de octubre de 1965, punto en que empieza la simulación.

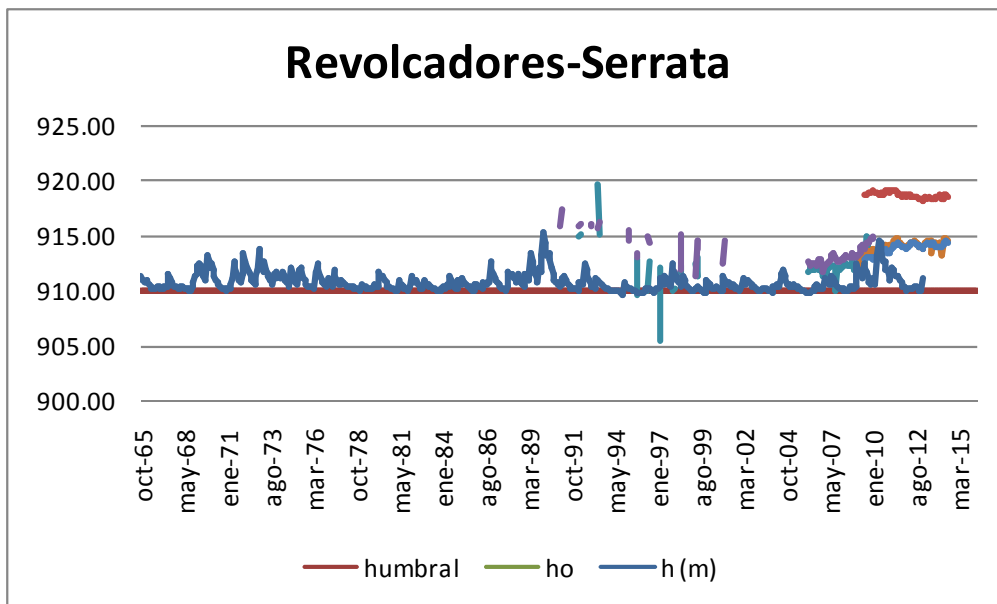
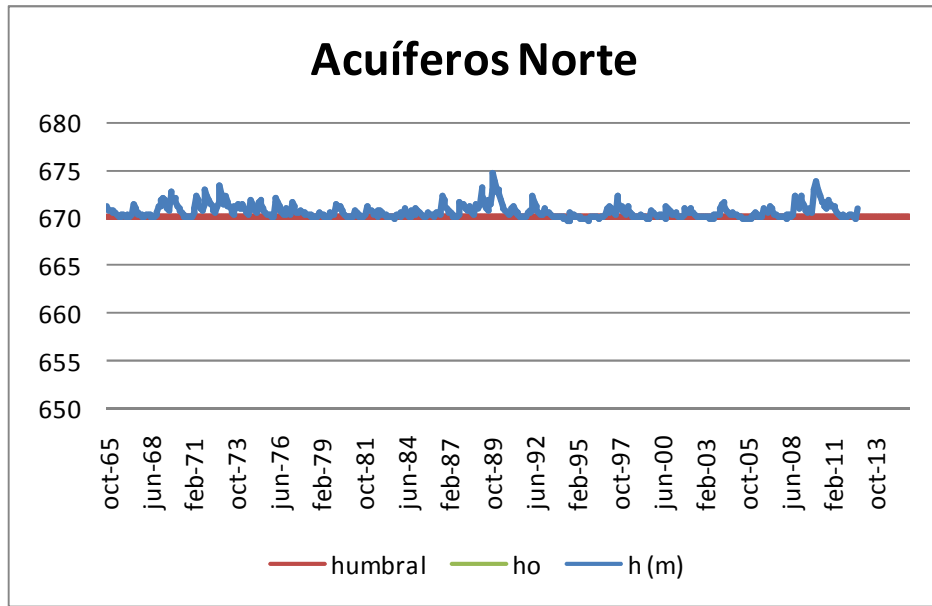
Una vez obtenido este volumen inicial de la simulación se aplican las ecuaciones indicadas anteriormente empleando los datos que se han expuesto al principio de este apartado. Con ello se obtiene la variación de la altura del agua en cada una de las zonas del acuífero, es decir, se obtiene la altura del nivel piezométrico en cada mes de simulación.

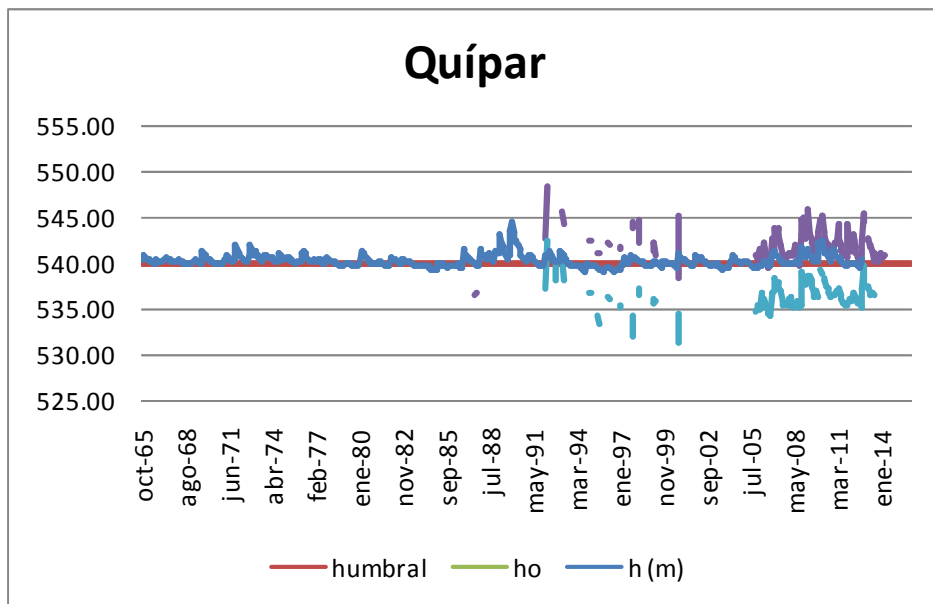
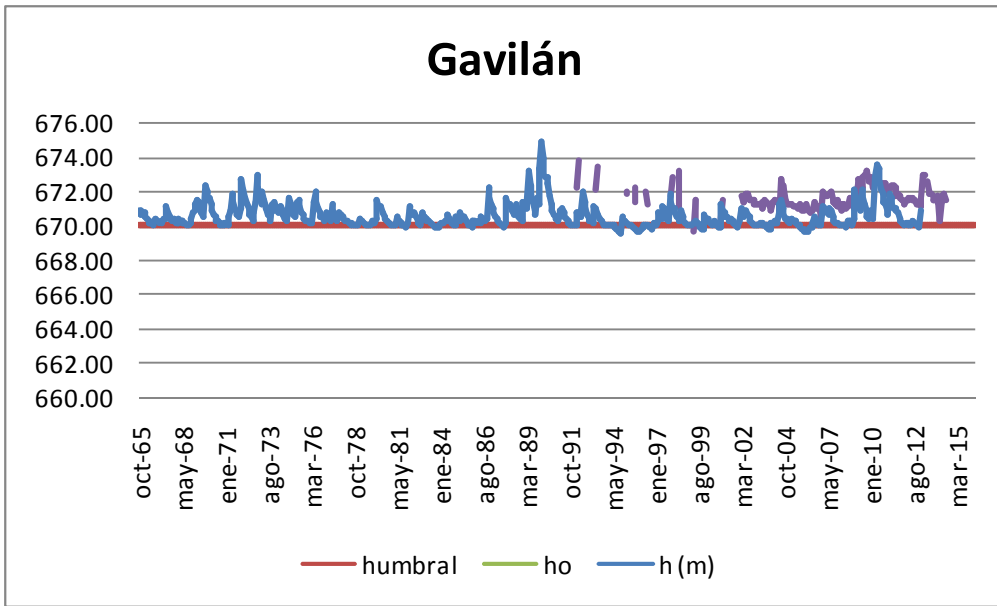
Variando estos valores de cota del fondo del acuífero, cota de conexión río-acuífero, coeficiente de almacenamiento y coeficiente de descarga se van modificando los resultados del modelo y de esta forma se va buscando el ajuste entre los valores reales y los simulados.

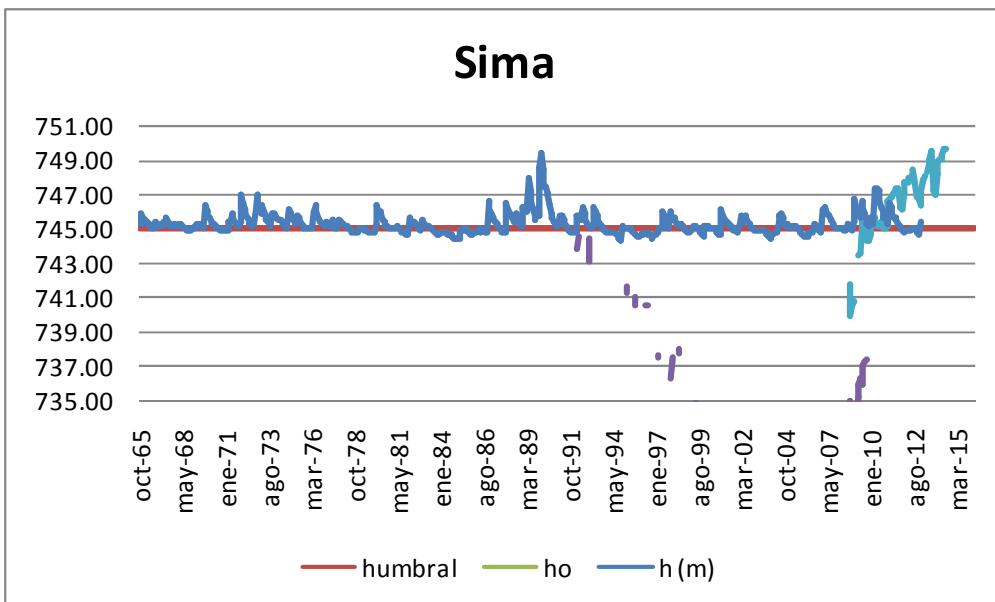
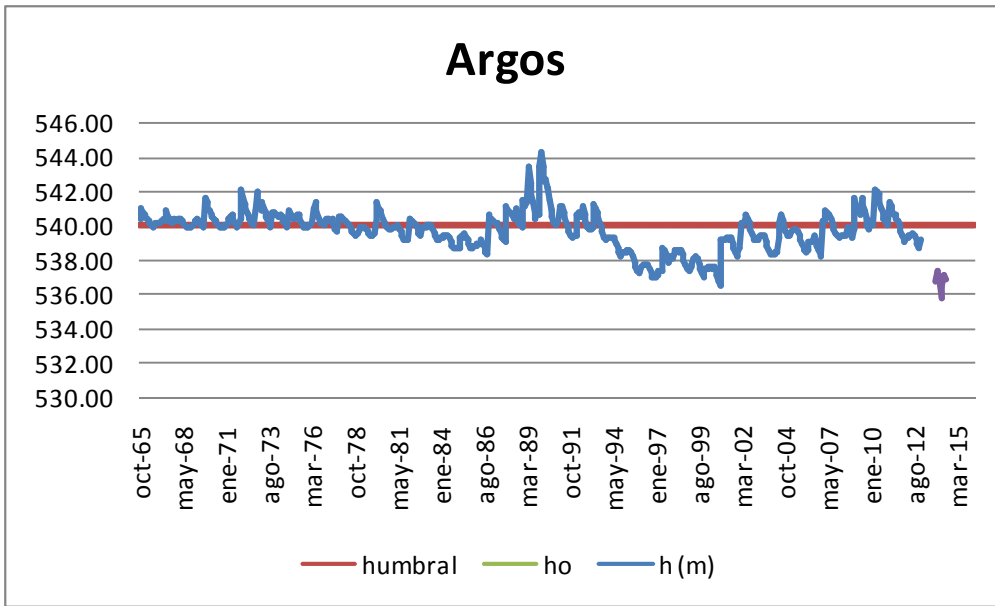
Una vez realizado este proceso obtenemos un ajuste con los siguientes parámetros

	Acuíferos Norte	Revolcadores-Serrata	Gavilán	Quípar	Argos	Sima
α	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
s (%)	2	2	2	2	2	2
humb (m)	670	910	670	540	540	745
ho (m)	620	845	620	500	500	650

Teniendo en cuenta los valores de la tabla, la simulación del modelo proporciona los siguientes resultados gráficos







A la vista de los resultados obtenidos se observa que los niveles en las seis zonas sufren oscilaciones pero siempre en torno a la altura umbral o altura de conexión con la superficie. Esto demuestra que el acuífero no se encuentra sobreexplotado y verifica los datos que aportaba la Confederación Hidrográfica del Segura en su Propuesta de Plan Hidrológico de Cuenca, donde indicaba que el índice de extracciones (que relaciona las extracciones con los recursos disponibles) era de 0.25.

De estas seis masas sí que se puede apreciar que la denominada Argos se encuentra en determinados periodos de tiempo con oscilaciones más pronunciadas y sus niveles se

encuentran por debajo de la altura umbral, distanciándose más que en el resto de los casos.

A continuación se realiza el mismo proceso conectando las distintas zonas tomando la hipótesis de flujo desde el oeste hacia el este. Esto supondría que desde Revocadores-Serrata se produce un flujo de agua hacia Gavilán y hacia Sima y de estos hacia Quípar y hacia Argos. Esta conexión supondrá cambios de volúmenes en las cantidades de agua almacenada en cada una de estas zonas.

La zona de Acuíferos Norte no se conecta con ninguna otra, ya que está desconectada hidráulicamente del resto de la masa debido al afloramiento de materiales impermeables en superficie.

Para ello es necesario modificar los valores del coeficiente de transferencia. Dicho coeficiente es nulo cuando las distintas zonas están desconectadas y toma valores positivos cuando se conectan entre sí.

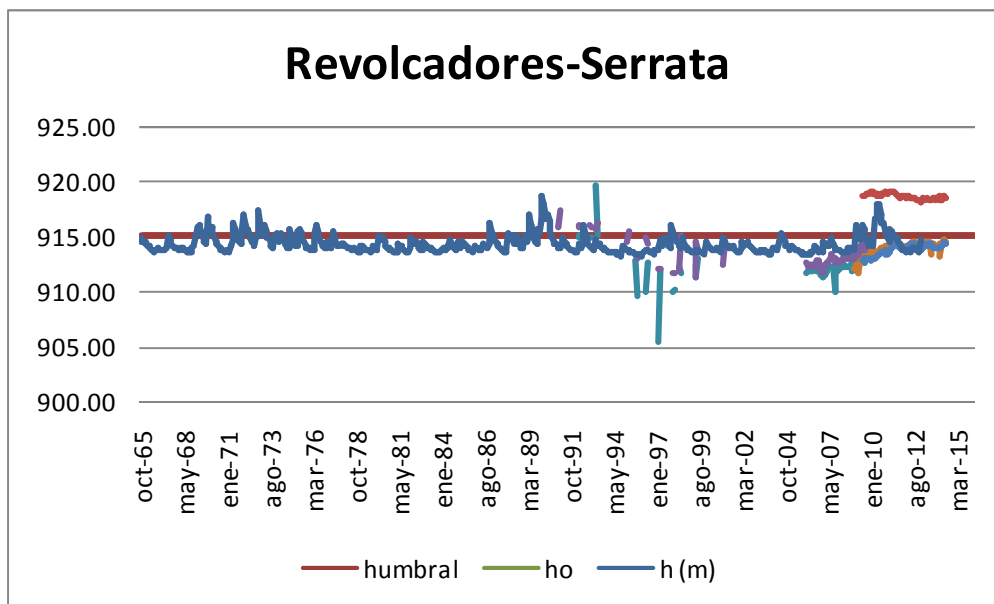
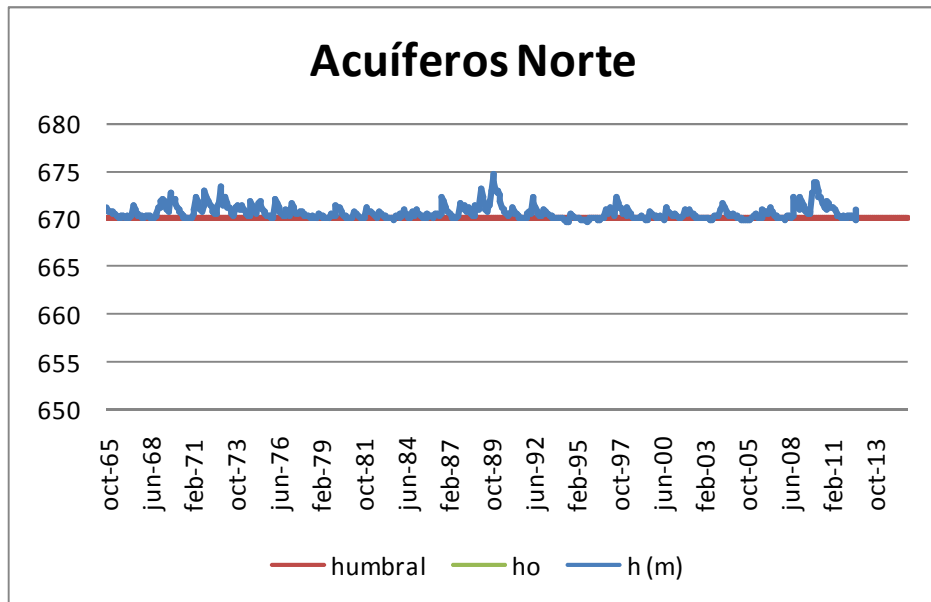
A la hora de realizar el nuevo ajuste con las distintas zonas conectadas, además de ir variando el coeficiente de transferencia es posible que sea necesario que también varíen el resto de parámetros (coeficiente de almacenamiento, cota de conexión río-acuífero, etc.), ya que si no se realizan estos cambios sería complicado conseguir un buen ajuste.

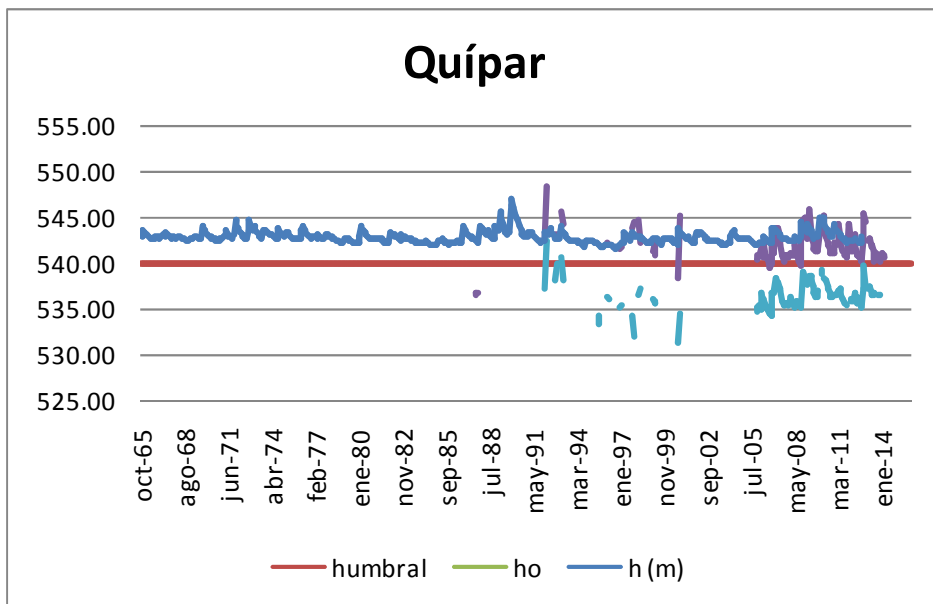
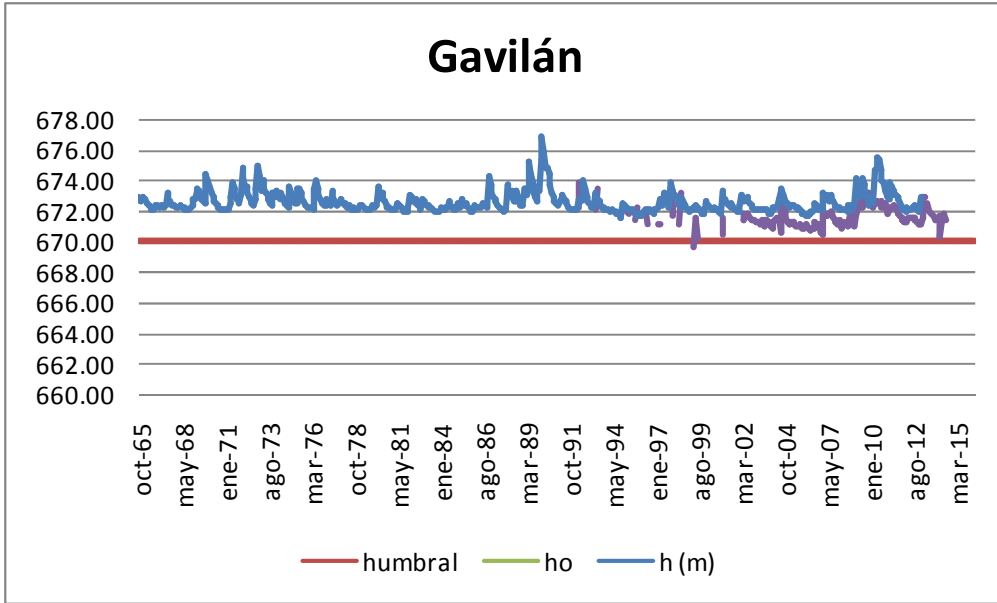
El mejor ajuste conseguido se ha obtenido introduciendo en el modelo los siguientes valores de los distintos parámetros

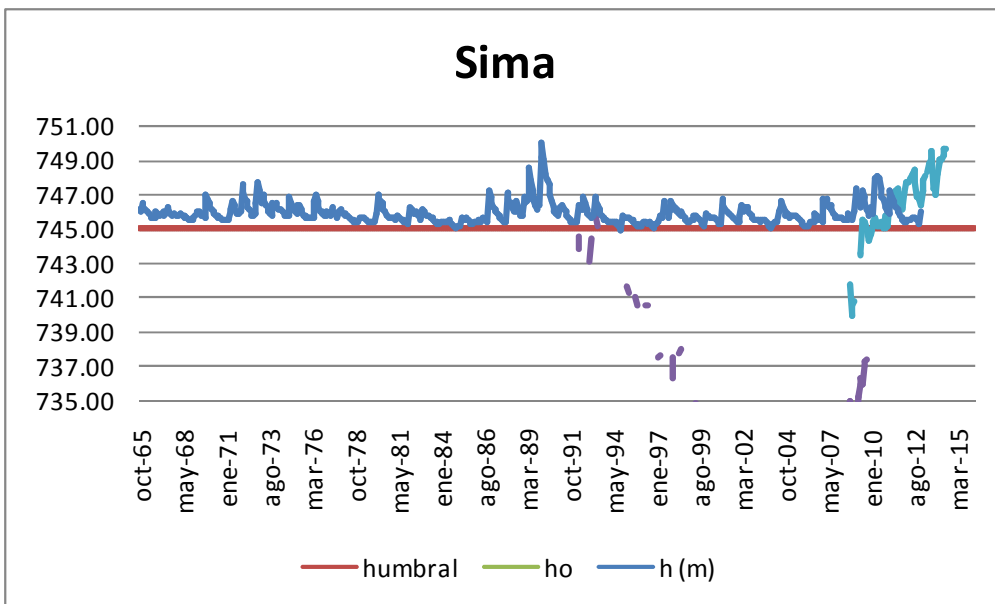
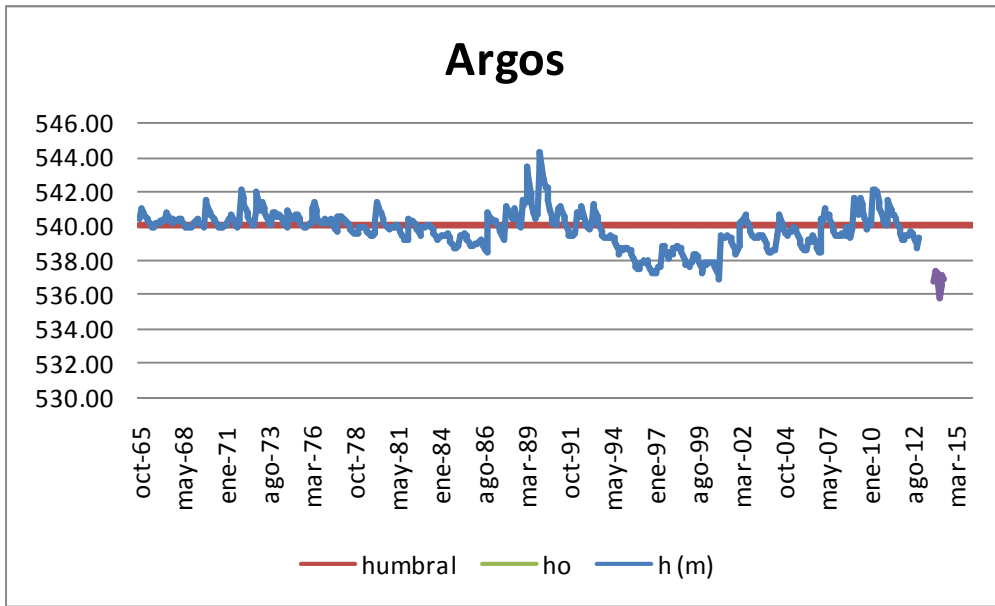
	Acuíferos Norte	Revolcadores-Serrata	Gavilán	Quípar	Argos	Sima
α	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	2	2	2	2	2	2
	670	915	670	540	540	745
	620	845	620	500	500	650

Conexión	T
Revolcadores-Serrata - Gavilán	0.03
Revolcadores-Serrata - Sima	0.02
Gavilán - Quípar	0.04
Gavilán - Argos	0
Gavilán - Sima	0.04
Quípar - Argos	0.05
Quípar - Sima	0

Se observa que para conseguir un buen ajuste se han dejado desconectados los acuíferos Gavilán y Argos y los acuíferos Quípar y Sima. De esta manera, los resultados obtenidos son los siguientes:







Si se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los acuíferos y se comparan con los obtenidos en la simulación de acuíferos desconectados se pueden hacer varias apreciaciones importantes

- Acuíferos Norte se mantiene igual, ya que continúa desconectado del resto de la masa. Como se ha indicado anteriormente, esto es debido a que afloran estratos impermeables a la superficie y por tanto es imposible que se transfiera agua desde esta zona hasta el resto
- Revolvedores-Serrata sufre un pequeño descenso de los niveles a lo largo de todo el periodo de tiempo estudiado, quedando prácticamente en todo el

análisis por debajo de la altura de conexión con la superficie del terreno. Este hecho se debe a la entrega de agua desde Revolcadores-Serrata hasta sus dos acuíferos vecinos (Gavilán y Sima)

- Gavilán experimenta un aumento importante de los niveles, convirtiéndose de esta manera en una zona en la que se está cediendo agua al medio continuamente. Esto es lo que se deduce de ver que los niveles se encuentran siempre por encima de la altura umbral y se debe a que recibe más agua desde otros acuíferos de la que entrega.
- Quípar tiene un comportamiento muy similar al de Gavilán, estando sus niveles siempre por encima de la altura de conexión con el terreno y cediendo agua al medio
- Argos presenta un comportamiento muy similar al que mostraba anteriormente, con oscilaciones continuas en las que en ocasiones se encuentra por encima de la altura umbral y en otras se encuentra por debajo. Cabe destacar que temporalmente sufre grandes bajadas de niveles y que desde mediados de la década de 1990 estos niveles se han encontrado por debajo de lo que venía siendo habitual. A pesar de que entre 2005 y 2010 los niveles sufrieron un repunte, en la actualidad se encuentran de nuevo en descenso
- Sima tiene un comportamiento muy similar al de Gavilán y Quípar aunque sus niveles se encuentran más próximos a la altura umbral que en los otros dos casos. Aún así, se trata de una zona que está cediendo agua al exterior casi continuamente

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se podría afirmar que en su conjunto la masa está cediendo agua al exterior de forma prácticamente continua ya que, aunque esto no sucede en toda su superficie, sí que ocurre en la gran mayoría de zonas de las que se compone.

6.2.3. Estudio de soluciones que mejoren el estado cuantitativo de la masa

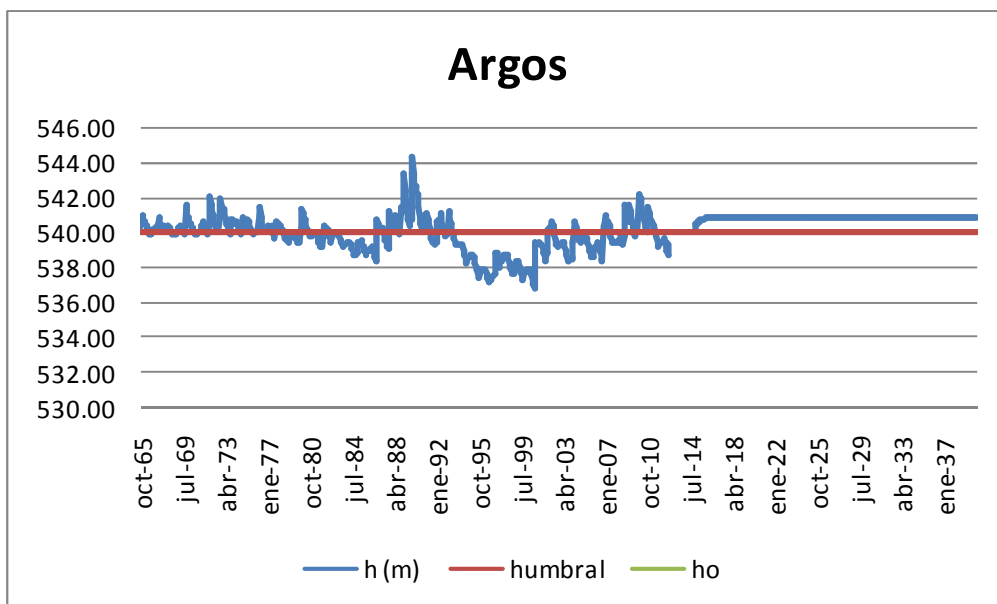
Puesto que el acuífero no se encuentra sobreexplotado y que los niveles en prácticamente toda su extensión se mantienen constantes y en torno a la altura umbral carece de sentido realizar simulaciones futuras para determinar posibles problemas que se puedan derivar de la extracción de agua. Esto cobraría sentido en el caso de que los bombeos aumentaran considerablemente y el acuífero comenzase a tener problemas de sobreexplotación, en cuyo caso sería conveniente realizar un estudio similar al realizado en el acuífero Jumilla-Villena para intentar minimizar los problemas que pueda provocar esta circunstancia.

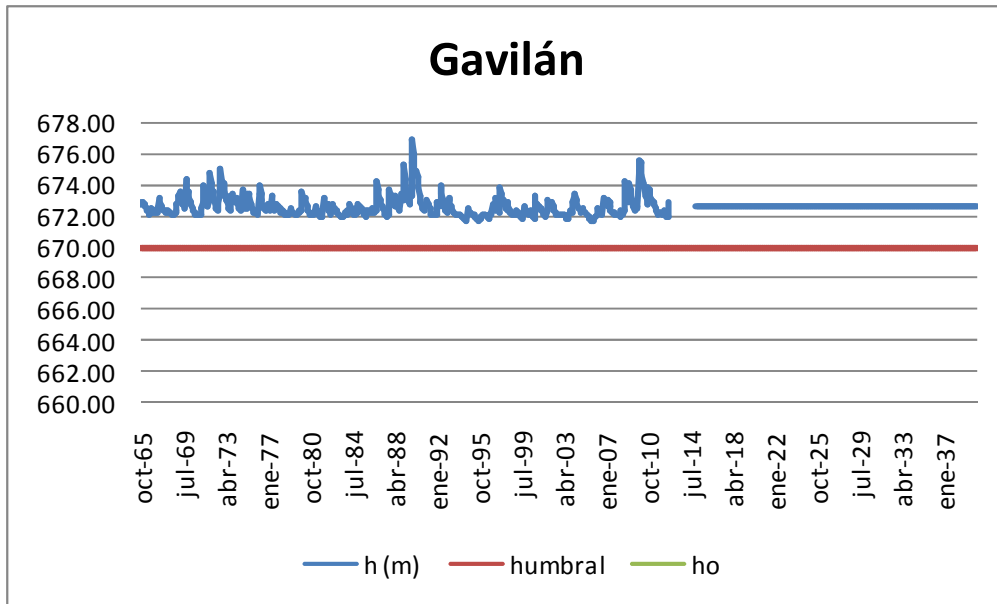
Puesto que se ha visto que la zona que más problemas da es la de Argos sí que se va a estudiar como intentar conseguir que los niveles no sufran grandes descensos. Para ello se eliminarán los bombeos de esta zona y se le asignarán a otra próxima, con la intención de comprobar si sustituyendo estos bombeos se consigue un mejor resultado.

- Hipótesis 1: asignación de los bombeos de Argos a Gavilán

En esta hipótesis se eliminarán los bombeos, tanto urbanos como agrícolas, de la zona de Argos y se asignarán a la zona de Gavilán, que se encuentra colindando con ella por el oeste. La aplicación de estas condiciones se iniciará en el mes de enero de 2015 y se prolongará durante los cuatro próximos ciclos hidrológicos, de seis años cada uno, por lo que estas condiciones se mantendrán hasta 1939.

Los resultados obtenidos con esta simulación se muestran a continuación





Se observa que se ha conseguido el objetivo que se buscaba, es decir, los niveles en el acuífero Argos se encontrarían por encima de la altura umbral, lo que indica que ya se han evitado los descensos que sufrían antes de eliminar estos bombeos y ahora los niveles han aumentado hasta el punto que el acuífero es capaz de ceder agua al exterior del sistema.

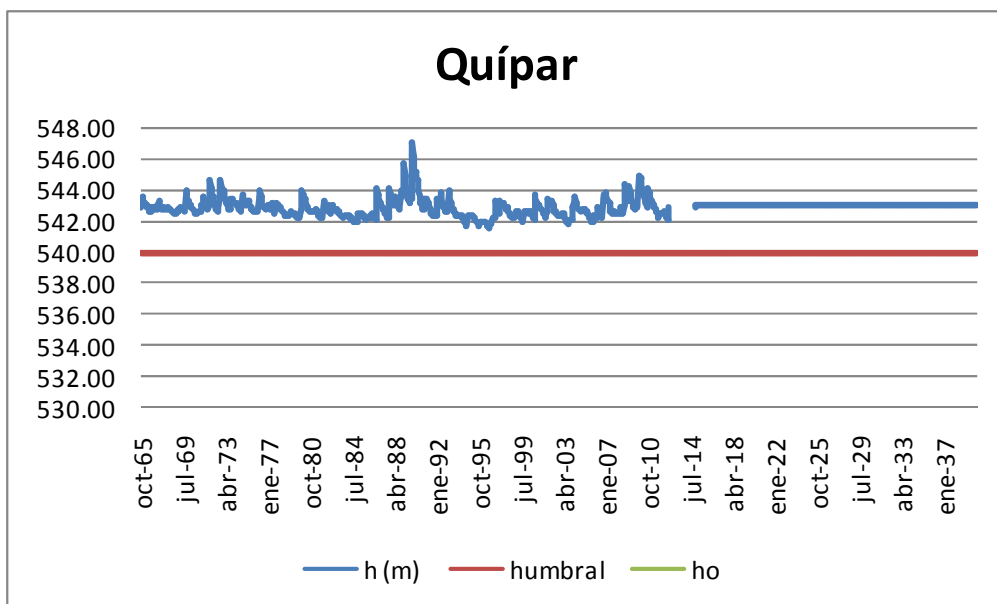
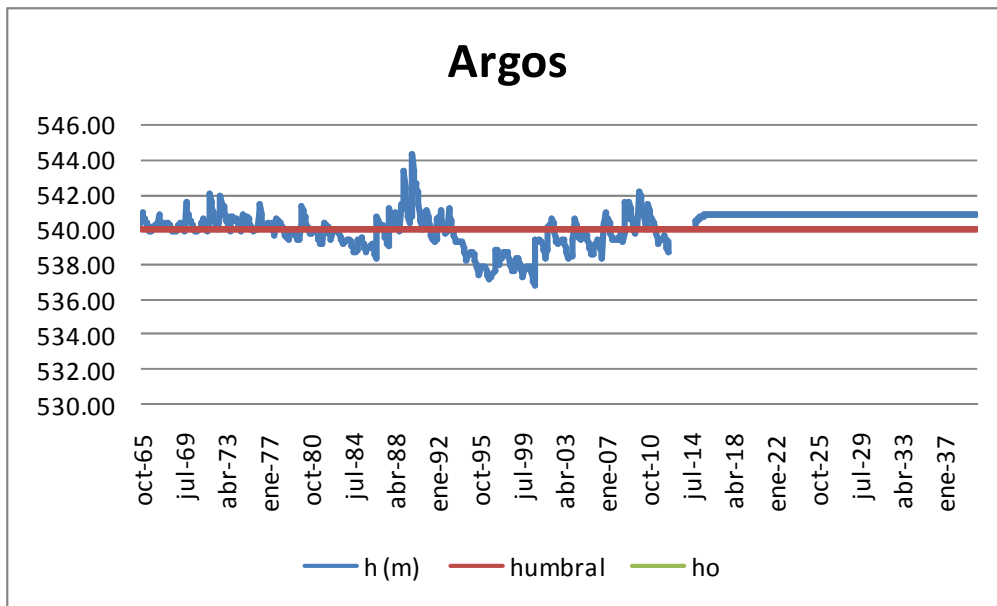
Por su parte, Gavilán continúa teniendo buenos niveles, lo que indica que no le afecta en exceso el absorber los bombeos derivados desde Argos. sus niveles se mantienen también por encima de la altura de conexión con la superficie del terreno por lo que el acuífero está desaguando al exterior.

Cabe destacar que en ambos casos se aprecia que los niveles se mantienen prácticamente constantes a partir del año 2015. Esto es debido a que, al ser los bombeos y las recargas constantes, siempre entra la misma cantidad de agua y mediante las salidas al exterior y los trasvases de agua entre las distintas zonas que componen la masa completa, ésta es capaz de regular sus niveles.

- Hipótesis 2: asignación de los bombeos de Argos a Quípar

En este caso se realizará el mismo análisis, pero en esta ocasión asignado a Quípar los bombeos urbanos y agrícolas que se producían en Argos. Al igual que ocurría en el caso anterior, estos dos acuíferos también se encuentran en contacto, ya que Quípar está situado al suroeste de Argos. la simulación se realizará en el mismo intervalo de tiempo (1965-2039) modificando los bombeos a partir de enero de 2015.

Los resultados que se obtienen en este análisis se recogen en las gráficas siguientes



A la vista de los resultados se aprecia que el comportamiento que sefre el acuífero Argos es idéntico al que sufría en el caso anterior, ya que se le han eliminado la misma cantidad de extracciones.

Además al acuífero Quípar le ocurre exactamente lo mismo que le ocurría anteriormente a Gavilán, es decir, apenas le afecta el absorber los bombeos derivados desde Argos, ya que se observa que sus niveles se mantienen prácticamente constantes, al igual que ocurría en el caso anterior.

La valoración que se debe realizar de la aplicación de estas dos hipótesis es que cabe esperar que en el futuro, al ser las entradas y salidas constantes según el modelo analizado, el acuífero tendrá un comportamiento similar al que tiene en la actualidad ya que, aunque en los gráficos aparecen niveles prácticamente constantes, en la realidad estos fluctuarán debido a que tanto las recargas como los bombeos no seguirán los patrones introducidos, sino que serán variables a lo largo del tiempo.

En el caso del acuífero Argos se observa que derivando sus bombeos a cualquiera de los acuíferos colindantes se consigue que sus niveles dejen de bajar, por lo que sería una opción viable para preservar el buen estado de la masa de agua. A la vista de los resultados no se observa que los desvíos de bombeos a un acuífero u otro sean un factor que vaya a cambiar en exceso el comportamiento de la masa, ya que en ambos casos los niveles se desarrollan de forma muy similar, por tanto, en el caso de que se realizara este desvío de bombeos, habría que basarse en otros parámetros para decidir hacia que zona se realiza este desvío.

7. Conclusiones

Una vez finalizado el análisis objeto de este estudio se pueden obtener una serie de conclusiones teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el mismo.

En el acuífero de Jumilla-Villena

- Con el régimen de explotación actual los niveles van sufriendo un progresivo descenso en toda la masa. Si se continúa explotando el acuífero de la misma manera en que se ha hecho hasta ahora se corre el peligro de que se quede completamente vacío en un periodo de tiempo no excesivamente largo.
- Se recomienda realizar un seguimiento exhaustivo de la evolución de los niveles mediante la instalación de una red de piezómetros para poder controlar en cada momento la situación de la masa de agua
- Con la finalidad de mejorar el estado de la masa de agua subterránea y de permitir la recuperación de sus niveles se podría estudiar la opción de reducir los bombeos y buscar nuevas fuentes de abastecimiento, tanto urbano como agrícola.
- la continuidad de sobreexplotación sobre el acuífero derivará en un mayor coste económico y energético, debido a que con el paso del tiempo, los niveles están cada vez más bajo, lo que supondrá una mayor dificultad de explotación de la masa

En el acuífero de Caravaca

- Se observa que no tiene problemas de sobreexplotación, ya que en toda su extensión los niveles presentan un buen estado, sufriendo oscilaciones en torno a la altura umbral y cediendo agua al medio exterior durante prácticamente todo el periodo de análisis
- La única zona que presenta algún problema es la de Argos. para solucionarlo se plantea la posibilidad de derivar sus bombeos a una zona próxima dentro del acuífero, ya que se estima que será capaz de absorber estos bombeos sin sufrir descensos importantes y se conseguirá detener los descensos de Argos

8. Referencias

- Confederación Hidrográfica del Segura <https://www.chsegura.es/chs/>
- Confederación Hidrográfica del Júcar <http://www.chj.es/>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
<http://www.magrama.gob.es/es/>
- Instituto Geológico y Minero de España <http://www.igme.es/>
- Propuesta de proyecto del Plan Hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21. Memoria. Confederación Hidrográfica del Segura. Diciembre de 2014
- Propuesta de proyecto del Plan Hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21. Anejo 3: Usos y demandas. Confederación Hidrográfica del Segura. Diciembre de 2014
- Propuesta de proyecto del Plan Hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21. Anejo 8: Objetivos medioambientales y exenciones. Confederación Hidrográfica del Segura. Diciembre de 2014