

Trabajo Fin de Máster

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO DE REQUENA-UTIEL. ESTUDIO DEL PLAN DE EXPLOTACIÓN DE LA MASA DE AGUA.

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

IRATI FERNÁNDEZ URIZAR

Tutor:

EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es:

JAIME GÓMEZ HERNÁNDEZ

Septiembre, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua.

Título del TFM en inglés: Mathematical modeling of groundwater flow of the Requena-Utiel aquifer. Study of the plan of exploitation of the groundwater body.

Título del TFM en Valenciano: Modelació matemàtica del flux d'aigua subterrània de l'aquífer de Requena Utiel. Estudi del pla d'explotació de la massa d'aigua.

Alumno: Irati Fernandez Urizar

Tutor: Eduardo Cassiraga

Cotutor/es: Jaime Gómez Hernández

Fecha de Lectura: Septiembre, 2017

Resumen

En español

La masa de agua subterránea Requena–Utiel está situada en la zona central de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, dentro del sistema de explotación Júcar (en un 96,8 %). El 3,2 % restante pertenece al sistema de explotación Túria. Tiene una superficie total de 987,9 km² localizada principalmente en la provincia de Valencia (966,4 km²) y con una pequeña parte en la provincia de Cuenca (21,5 km²). Sobre la masa de agua subterránea discurre el río Magro cuya relación con dicha masa es de carácter ganador a lo largo de toda su longitud.

En los últimos años, a partir de los datos proporcionados por el programa de seguimiento del estado cuantitativo de la masa de agua, se ha comprobado que se está produciendo una tendencia no sostenible en los descensos de los niveles piezométricos. Además, sobre el río Magro y relacionado con la masa de agua subterránea en cuestión, se encuentra el embalse de Forata, con una capacidad máxima de 38,5 hm³ que destina sus reservas a riego. En los últimos años las aportaciones al embalse han disminuido considerablemente, lo que ha ocasionado problemas en la satisfacción de las demandas.

En consecuencia, en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021, aprobado mediante el Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, la masa de agua subterránea Requena-Utiel ha sido declarada en mal estado cuantitativo.

Antes de aprobar este último Plan Hidrológico, los usuarios de las Comunidades de Regantes de la zona venían manifestando que los 450 m³/ha/año que establecía el Plan Hidrológico del ciclo 2009-2015, aprobado por el Real Decreto 595/2014, de 11 de julio, para el cultivo de la vid, uso principal del recurso de esta masa de agua subterránea, era insuficiente, especialmente en años secos.

Con la finalidad de recuperar el buen estado de la masa de agua subterránea y dar una solución a los usuarios de dicho recurso, en diciembre de 2016 se redactó el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Junto con el citado plan se plantea la necesidad de diseñar una herramienta de apoyo para la implementación del mismo. Se trata de elaborar un modelo matemático del sistema de acuíferos de Requena-Utiel que permita un mejor conocimiento del mismo que el que hasta ahora se tiene.

Para lograr dicho objetivo se ha llevado a cabo un análisis de la mejor información disponible y de los antecedentes al presente trabajo, lo que ha permitido el establecimiento de un modelo conceptual bien definido. Dicho modelo ha servido de base para la elaboración posterior del modelo matemático, construido utilizando el código MODFLOW y la interfaz gráfica ModelMuse. Después de la construcción del modelo, se ha procedido a su calibración, que ha consistido en un proceso muy laborioso y complejo.

Por último, con el modelo calibrado y con el fin de predecir el comportamiento del sistema ante diferentes situaciones o hipótesis, se han simulado tres diferentes escenarios. La finalidad de los dos primeros ha sido conocer la diferencia que produciría en el futuro la aplicación de los condicionantes establecidos en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. El último escenario trata de representar el posible efecto que el cambio climático tendría sobre el sistema.

En valenciano

La massa d'aigua subterrània Requena-Utiel està situada en la zona central de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer, dins del sistema d'explotació Xúquer (en un 96,8 %) . El 3,2 % restant pertany al sistema d'explotació Túria. Té una superfície total de 987,9 km² localitzada principalment en la província de València (966,4 km²) i amb una xicoteta part en la província de Conca (21,5 km²) . Sobre la massa d'aigua subterrània discorre el riu Magre la relació del qual amb la dita massa és de caràcter guanyador al llarg de tota la seua longitud.

En els últims anys, a partir de les dades proporcionats pel programa de seguiment de l'estat quantitatiu de la massa d'aigua, s'ha comprovat que s'està produint una tendència no sostenible en els descensos dels nivells piezomètrics. A més, sobre el riu Magre i relacionat amb la massa d'aigua subterrània en qüestió, es troba l'embassament de Forata, amb una capacitat màxima de 38,5 hm³ que destina les seues reserves a reg. En els últims anys les aportacions a l'embassament han disminuït considerablement, la qual cosa ha ocasionat problemes en la satisfacció de les demandes.

En conseqüència, en el Pla Hidrològic de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer del cicle 2015-2021, aprovat per mitjà del Reial Decret 1/2016, de 8 de gener, la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel ha sigut declarada en mal estat quantitatiu.

Abans d'aprovar este últim Pla Hidrològic, els usuaris de les Comunitats de Regants de la zona venien manifestant que els 450 m³/ha/any que establia el Pla Hidrològic del cicle 2009-2015, aprovat pel Reial Decret 595/2014, d'11 de juliol, per al cultiu de la vinya, ús principal del recurs d'esta massa d'aigua subterrània, era insuficient, especialment en anys secs.

Amb la finalitat de recuperar el bon estat de la massa d'aigua subterrània i donar una solució als usuaris del dit recurs, al desembre de 2016 es va redactar el Pla d'explotació de la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel. Junt amb el citat pla es planteja la necessitat de dissenyar una ferramenta de suport a la implementació del Pla d'explotació per a la massa d'aigua. Es tracta d'un model matemàtic del sistema d'aqüífers de Requena-Utiel que permeta un millor coneixement del mateix que el que fins ara es té.

Amb el dit objectiu s'ha portat una anàlisi de la millor informació disponible i dels antecedents al present

treball, la qual cosa ha permès l'establiment d'un model conceptual ben definit. El dit model ha servit de base per a l'elaboració posterior del model matemàtic, constuïdo utilitzant el codi MODFLOW i la interfície gràfica ModelMuse. Després de la construcció del model, s'ha procedit a la seua calibratge, que ha consistit en un treball molt laboriós i complex.

Finalment, amb el model construït i calibrat, a fi de predir el comportament del sistema davant de diferents situacions o hipòtesis, s'han simulat tres diferents escenaris. La finalitat dels dos primers ha sigut conèixer la diferència que produiria en el futur l'aplicació dels condicionants establits en el Pla d'Explotació de la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel. L'últim escenari tracta de representar el possible efecte que el canvi climàtic tindria sobre el sistema.

En inglés

The groundwater body Requena-Utiel is located in the central area of the Jucar Hydrographic demarcation, within the Jucar exploitation system (in 96,8%). The rest 3,2% belongs to the Túria exploitation system. It has a total Surface area of 987, 9 km² mainly located in the province of Valencia (966,4 km²) and a small part in the province of Cuenca (21,5 km²). Over the groundwater body, it flows the river Magro, whose relation with the body is winner behavior, all through the length of the river.

In recent years, with the help of the data supplied by the following up quantitative status of the groundwater body, it has been proven that there is a non-sustainable trend in the declines of the phreatic levels. Furthermore, over the Magro river and with the referred groundwater body, there is the Forata reservoir, with a maximum capacity of 38,5 hm³, that it is used for irrigation purposes. During the last years, the contributions to the reservoir have decreased considerably, which has led to problems in the levels of satisfaction of the demands.

Accordingly, the Hydrologic Plan of the Hydrographic demarcation of the Jucar river, period 2015-2021, approved by Royal Decree 1/2016, on 8th January, the Requena-Utiel groundwater body, has been declared in a bad quantitative status.

Before this last Hydrologic Plan was approved, the irrigation communities users expressed the argument that the 450 m³/ha/year established by the Hydrologic Plan for the period 2009/2015, approved by Royal Decree 595/2014, on 11th July, for the grape growing, the principal use for this groundwater body resource, was poor, especially during dry years.

In order to recover the good condition of the groundwater body and provide a solution to the users of this resource, in december of 2016, the Plan Explotaitation of the Requena-Utiel aquifer was drafted. Together with this plan, there is a need to design a tool to support the implementation of the plan. It deals with a mathematical model for the groundwater reserves of Requena-Utiel, that will allow a better knowledge than the one is being used now.

In the conext to the above referred situation, an analysis of the best available information and of the antecedents to the present work has been carried out, which has allowed the establishment of a well defined conceptual model. This model has served as a basis for the later elaboration of the mathematical model, constructed using the code MODFLOW and the graphical interface ModelMuse. After the construcción, the model has been calibrated, which has consisted in a laborious and complex work.

Finally, with the constructed and calibrated model, in order to predict the behavior of the system in different situations or hypotheses, three different scenarios have been simulated. The purpose of the first two has been to know the difference that would produce in the future the application of the conditions



established in the Plan of Exploitation of Requena-Utiel aquifer. The last one tries to represent the possible effect that climate change would have on the system.

Palabras clave español (máximo 5): Modelación matemática, Flujo subterráneo, Gestión del agua, Masa de agua subterránea Requena-Utiel

Palabras clave valenciano (máximo 5): Modelació matemática, Flux subterrani, Gestió d'aigua, Massa d'aigua subterrània Requena-Utiel

Palabras clave inglés (máximo 5): Mathematical modeling, Groundwater Flow, Water management, Requena-Utiel groundwater body

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación y objetivos.....	1
1.2 Antecedentes	3
2. MODELO CONCEPTUAL	7
2.1 Localización del área de estudio	7
2.2 Contexto hidrológico	8
2.2.1 Climatología	8
2.2.2 Recursos hídricos superficiales	10
2.3 Contexto hidrogeológico.....	12
2.3.1 Límites del sistema	13
2.3.2 Unidades hidrogeológicas	14
2.3.3 Dominios hidrogeológicos.....	14
2.4 Bombeos	16
2.4.1 Demanda agrícola.....	16
2.4.2 Demanda urbana.....	17
2.5 Modelo hidrogeológico conceptual	18
3. SELECCIÓN DEL CÓDIGO	23
3.1 Código y modelo matemático	23
4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	25
4.1 Discretización espacio-temporal y diseño de la malla.....	25
4.1.1 Diseño de la malla	25
4.1.2 Discretización temporal.....	25
4.2 Condiciones de contorno	25
4.2.1 Límites laterales.....	26
4.2.2 Cauces superficiales	28
4.2.3 Recarga por infiltración de la precipitación	30
4.3 Condición inicial.....	32
4.4 Parámetros hidrogeológicos.....	33
4.5 Bombeos	34
4.5.1 Demanda agrícola.....	34
4.5.2 Demanda urbana.....	36

5. PROCESO DE CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO.....	39
5.1 Calibración del modelo en régimen no influenciado	40
5.1.1 Calibración de las condiciones de contorno. Límites laterales.....	41
5.1.2 Calibración de las propiedades físicas de los cauces.....	41
5.2 Análisis de los resultados del modelo en régimen no influenciado	42
5.2.1 Balance del sistema	42
5.2.2 Interacción entre el río y el acuífero	44
5.2.3 Análisis piezométrico	45
5.2.4 Análisis de la bondad de ajuste del modelo.....	47
5.3 Calibración del modelo en régimen influenciado	49
5.3.1 Calibración de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas	50
5.3.2 Calibración de las condiciones de contorno	51
5.4 Análisis de los resultados del modelo en régimen influenciado	52
5.4.1 Balance del sistema	52
5.4.2 Interacción entre el río y el acuífero	58
5.4.3 Análisis piezométrico	59
5.4.4 Análisis de la bondad de ajuste del modelo.....	61
6. APLICACIÓN DEL MODELO.....	71
6.1 Escenario 1: Plan Hidrológico del Júcar 2009-2015	71
6.2 Escenario 2: Aplicación del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel	73
6.3 Escenario 3: Análisis de las consecuencias del cambio climático.....	77
6.4 Análisis de la evolución piezométrica en los diferentes escenarios	80
7. RECOMENDACIONES Y PROSPECTIVA.....	85
8. CONCLUSIONES	89
9. BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	7
Figura 2. Evolución de la temperatura en la estación de Requena. Periodo 2001-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR.....	9
Figura 3. Evolución de la precipitación mensual acumulada en la estación de Requena. Periodo 2001-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR.....	10
Figura 4. Evolución de la precipitación mensual media (2001-2016) en la estación de Requena. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR.....	10
Figura 5. Masas de agua superficial de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	11
Figura 6. Caudales medios diarios registrados en la estación de aforos de Requena. Periodo 1914-2016. Fuente: Elaboración propia con datos del CEDEX	12
Figura 7. Delimitación del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia	12
Figura 8. Dominios hidrogeológicos definidos en el estudio. Fuente: Elaboración propia	15
Figura 9. Unidades de Demanda Agraria del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CHJ	17
Figura 10. Unidades de Demanda Urbana del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ	18
Figura 11. Representación del modelo conceptual. Fuente: Elaboración propia	20
Figura 12. Mapas piezométricos. Años 1970/74,2005 y 2008 respectivamente. Fuente: CHJ (2015)	21
Figura 13. Relaciones río-acuífero, ámbito CHJ. Fuente: Vázquez, S. P. (2017).....	29
Figura 14. Zonificación de la recarga definida en el modelo. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 15. Evolución de la recarga total de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de Patricial (Pérez-Martín, 2005)	31
Figura 16. Condición inicial en la simulación transitoria. Fuente: Elaboración propia .	33
Figura 17. Evolución de las extracciones anuales para riego. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la CHJ.....	35
Figura 18. Pozos de bombeo destinados a uso agrícola. Fuente: Elaboración propia....	36
Figura 19. Evolución de las extracciones anuales para uso urbano. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la CHJ.....	37

Figura 20. Pozos de bombeo destinados al abastecimiento urbano. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 21. Esquema del balance de flujos resultante en el sistema en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 22. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa superior. Fuente: Elaboración propia	45
Figura 23. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa intermedia. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 24. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa inferior. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 25. Piezómetros de observación utilizados en la simulación estacionaria. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 26. Análisis estadístico de los valores simulados frente a los observados. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 27. Subdominios definidos en el proceso de calibración de los parámetros hidrogeológicos. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 28. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en periodo transitorio. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 29. Evolución temporal de los componentes del balance en régimen influenciado, periodo 1980/81-2015/16. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 30. Esquema del balance de flujos resultante en el sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 31. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa superior, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 32. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa intermedia, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 33. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa inferior, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 34. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa superior. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 35. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa intermedia. Fuente: Elaboración propia.....	60

Figura 36. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa inferior. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 37. Detalle de la influencia de los bombeos en la piezometría del sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 38. Piezómetros de observación empleados en el proceso de calibración. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 39. Análisis estadístico de los valores simulados frente a los observados. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 40. Análisis cuantitativo de la calibración. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 41. Ajustes obtenidos en los piezómetros seleccionados. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 42. Evolución de alturas piezométricas en el piezómetro 08.24.032, periodo oct-2012 hasta la actualidad. Fuente: CHJ, 2017	69
Figura 43. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 44. Caracterización del tipo de año de acuerdo con los datos registrados en el pluviómetro de Requena. Fuente: Elaboración propia	75
Figura 45. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 46. Caracterización del tipo de año de después de aplicar una reducción del 12% a la precipitación registrada en la estación de Requena. Fuente: Elaboración propia....	78
Figura 47. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 48. Evolución de las alturas piezométricas en los piezómetros analizados en los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades de Demanda Urbana dentro del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos PHJ 2015-2021	17
Tabla 2. Elementos del balance del sistema. Modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Elaboración propia.....	19
Tabla 3. Bibliografía de los parámetros hidrogeológicos. Fuente: Elaboración propia con datos de Custodio, E. et al. (1983), Freeze, R.A., et al. (1979).	33
Tabla 4. Parámetros utilizados para la solución. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 5. Flujos conocidos del sistema. Fuente: Elaboración propia	40
Tabla 6. Flujos estimados para diferentes tramos del río. Fuente: Elaboración propia..	42
Tabla 7. Balance de la masa de agua para el periodo 1940/41-1979/80, régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	42
Tabla 8. Relación río-acuífero para el periodo 1940/41-1979/80, régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 9. Análisis de bondad de ajuste del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 10. Componentes principales del balance del sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 11. Parámetros hidrogeológicos finales. Fuente: Elaboración propia	50
Tabla 12. Balance medio de la masa de agua para el periodo 1980/81-2015/16, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 13. Relación río-acuífero para el periodo 1980/81-2015/16, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 14. Análisis de bondad de ajuste del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 15. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.....	71
Tabla 16. Caracterización del tipo de año establecido en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 17. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.....	76

Tabla 18. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario
3. Fuente: Elaboración propia..... 79

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la explotación del recurso subterráneo ha sufrido un crecimiento considerable a lo largo del mundo. En consecuencia, se ha incrementado la necesidad de avanzar en la búsqueda de las claves específicas para conseguir una gestión sostenible de dicho medio.

La Comunidad Valenciana es una de las comunidades en las que las aguas subterráneas constituyen uno de los pilares más importantes para el desarrollo socioeconómico de la zona. Aproximadamente, el 60% de la superficie está ocupada por afloramientos muy permeables, por lo que su explotación permite el abastecimiento de un porcentaje muy significativo de la población y el riego de miles de hectáreas. Debido al intenso incremento del uso del citado recurso, en los últimos años, se han venido manifestando problemas ambientales, tales como la sobreexplotación de acuíferos, afecciones a los caudales circulantes en los ríos y manantiales y la degradación de la calidad del recurso, que provocan intranquilidad en la sociedad. Se trata de uno de los principales enigmas actuales y futuros para el alcance de la compatibilidad entre el desarrollo socioeconómico y el mantenimiento de una buena calidad ambiental.

1.1 Justificación y objetivos

El flujo subterráneo forma un componente vital del ciclo de agua, estando directamente relacionado con el resto de los elementos del mismo. En zonas áridas, dicho flujo puede constituir el caudal base de los ríos, evitando su desaparición. Además, actualmente, se trata de un recurso indispensable tanto para el abastecimiento urbano, como agrario.

En los últimos años, en la Comunidad Valenciana la explotación de dicho recurso ha sufrido un crecimiento considerable, por lo que los niveles piezométricos se han visto notablemente afectados. Dicho fenómeno se ha reflejado en la masa de agua subterránea Requena-Utiel, objeto de este estudio. Directamente relacionado con la citada masa, se encuentra el embalse de Forata. Junto con el descenso de los niveles piezométricos del sistema de acuíferos, los volúmenes embalsados han sufrido una notable bajada, ocasionando problemas en la satisfacción de las demandas.

En consecuencia, en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (en adelante, PHJ) del ciclo 2015-2021, aprobado mediante el Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, esta masa ha sido declarada en mal estado cuantitativo.

Con la finalidad de recuperar el buen estado de la misma y dar una solución a los usuarios de dicho recurso, se establece, entre otras cuestiones, la necesidad de elaborar un modelo numérico que analice el comportamiento de la masa de agua, así como las posibles relaciones río-acuífero y el efecto de los bombeos y reservas asignadas en los últimos años. Dicho modelo debe servir de base para la planificación y gestión sostenible de los recursos de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.

Además, con objeto de obtener un conocimiento más exhaustivo de la zona y determinar la causa de la disminución de los niveles del embalse de Forata, se ha decidido estudiar, junto con la masa de agua subterránea Requena-Utiel, la masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara.

A la luz de lo comentado, se propone:

- Establecer el propósito del modelo, en base a los requerimientos planteados en el documento del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel (CHJ, 2016).
- Elaborar un modelo conceptual del funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta toda la información disponible y los antecedentes de los que se disponga.
- Diseñar y construir el modelo numérico utilizando el código MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, R.B., 2009).
- Calibrar el modelo para la correcta reproducción de las variables de estado del sistema.
- Simular escenarios de acuerdo con los condicionantes que se recogen en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel (CHJ, 2016).

Para alcanzar los citados objetivos se necesita un conocimiento exhaustivo de la zona de estudio, en cuanto a la explotación, geometría y definición de los límites del sistema, y de la evolución presentada por el acuífero en las últimas décadas. Además, es preciso conocer los mecanismos de interacción entre el río y el acuífero, las formaciones hidrogeológicas existentes en la zona y los parámetros hidrogeológicos que las caracterizan. Para ello, se establece la necesidad del uso de un Sistema de Información

Geográfica (SIG), que permita integrar en el modelo la información precisa para el desarrollo del mismo. Con todo ello, se espera conseguir una herramienta esencial y útil para alcanzar una gestión sostenible del sistema.

1.2 Antecedentes

Con el fin de llevar a cabo una correcta gestión y planificación de los recursos hídricos de la zona de estudio, en el año 2001 se realizó el primer Plan de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 08.24 Utiel-Requena, elaborado de acuerdo con el art. 85.3 de la Normativa del Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar (CHJ, 1997) y la consulta del RD 1664/98 relativo a la aprobación de los planes hidrológicos de cuenca.

Los objetivos principales de los planes de explotación son garantizar la permanencia de aprovechamientos vigentes en el momento de aprobación del mismo, impedir el deterioro de los recursos hídricos por procesos contaminantes y potenciar las medidas para restaurar las problemáticas y desequilibrios existentes, en este caso haciendo hincapié en la intensa explotación del acuífero por riego de viñedo (CHJ, 2001).

Para la elaboración del Plan de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 08.24 Utiel-Requena 2001, se llevaron a cabo varios análisis y estudios que permitieron un conocimiento profundo y actualizado del funcionamiento de la misma. Entre todos los estudios, se realizó un modelo matemático de simulación, mediante la herramienta Visual Modflow 2.8.2.

Primeramente, se elaboró un modelo de flujo en régimen estacionario para la situación piezométrica de septiembre del año 2000, que describía el funcionamiento de la unidad hidrogeológica en aquel instante. Las extracciones cuantificadas suponían una salida de 22.359.521 m³/año, producidas a través de 630 pozos de bombeo.

Después, se decidió analizar un escenario que contemplase todas las solicitudes de derechos concesionales que se estaban tramitando en el año 2000. Las salidas por extracciones aumentaron a 23.846.863 m³/año, debido a un incremento de 96 pozos de bombeo.

Para finalizar, se estudió un horizonte futuro, una situación hipotética basada en un estudio de demandas futuras. Se tuvieron en cuenta las mayores parcelas de viñedo de secano, suponiendo que podían ser transformadas en regadío antes del año 2008. A pesar de existir problemas de convergencia y una baja calibración del citado escenario,

el resultado fue que bajo esas condiciones la Unidad Hidrogeológica (UHG) se encontraría en una situación de sobreexplotación.

A la luz de los resultados obtenidos, se concluía que era necesario prestar especial atención a los aspectos cuantitativos del sistema de acuíferos, debido a la transformación de los usos del suelo que se estaba experimentando y al carácter dinámico de la UHG. En consecuencia, el plan de explotación planteaba una serie de cuestiones a considerar con objeto de adquirir un control sobre la situación y alcanzar una gestión sostenible del sistema. Especialmente, remarcaba la necesidad de una actualización a medio o a corto plazo del plan.

Del año 2001 en adelante, se realizaron varios trabajos y estudios encaminados a obtener una mejor definición de las masas de agua, así como un mayor conocimiento de las relaciones entre las mismas.

En el año 2005, con objeto de dar cumplimiento a las condiciones definidas en el art.5 de la Directiva Marco del Agua (DMA), se llevó a cabo la primera de las delimitaciones de las masas de agua subterráneas bajo la Dirección General del Agua (DGA). Dicha delimitación fue recogida en el “*Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias*” (IGME-DGA, 2005). El art. 5 de la DMA definía la masa de agua subterránea 080.026 Requena-Utiel.

Más adelante, con la aprobación de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) por la Orden ARM/3656/2008, de 10 de septiembre, se establecieron criterios técnicos para una mejor definición de las masas. Por ello, la entrada en vigor de la IPH requirió una revisión de los límites contemplados en el estudio realizado en el año 2005. Por consiguiente, dichas divisorias fueron adaptadas de acuerdo con las unidades litológicas contenidas en el Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España (IGME, 2006).

Además, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), elaboró una caracterización adicional, mejorando la adaptación ya realizada (IGME-DGA, 2009a). Dentro de estos trabajos, se llevó a cabo la caracterización adicional de las masas de agua en riesgo correspondientes a la Demarcación Hidrográfica del Júcar (IGME-DGA 2009b).

Con la finalidad de adaptar y complementar la información de la caracterización de las masas de agua tras la publicación de la IPH, en abril de 2011, el IGME publicó otro

documento formado por un conjunto de fichas que constituían una determinación básica de cada una de las nuevas masas, las cuales formaban la base de gestión del PHJ 2009-2015 (IGME, 2011).

Dichos trabajos posibilitaron un mayor conocimiento general de la hidrología subterránea de la Comunidad Valenciana, lo que conllevó a una mejor definición de las masas de agua subterráneas. Por consiguiente, la masa de agua subterránea objeto de este estudio, fue definida como 080.133 Requena-Utiel, coincidente con límites ajustados de la masa 080.026 Requena-Utiel (art. 5 de la DMA) e integrada en la UHG 8.24 Utiel-Requena.

En paralelo, se redactó el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2009-2015, aprobado por el Real Decreto 595/2015, de 11 de julio. Para la zona de estudio, dicho plan establecía ciertas condiciones y medidas a aplicar para avanzar en la gestión sostenible del sistema. Teniendo en cuenta que la problemática principal de la UHG se debía al aumento de las extracciones, se definió una dotación bruta de apoyo de $450 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para el riego de la vid.

Sin embargo, desde la aprobación del mismo, los usuarios de la zona han manifestado que la dotación definida era insuficiente para el riego de la vid, especialmente en años secos y que consideraban necesario aumentarla.

Además, debido al desarrollo socioeconómico de la zona, la explotación de los recursos hídricos subterráneos se incrementó, por lo que los derechos concesionales y, en consecuencia, las superficies de regadío aumentaron considerablemente provocando un descenso no sostenible en la piezometría del sistema.

Por consiguiente, en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021, aprobado mediante el Real Decreto 1/2015, de 8 de enero, la masa de agua subterránea Requena-Utiel fue declarada en mal estado cuantitativo.

Teniendo en consideración todos los requerimientos, el plan vigente ha incrementado la dotación bruta a $1250 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para las masas de agua subterránea que presenten presión significativa por bombeos o que se encuentren en mal estado cuantitativo. Sin embargo, en el caso de Requena-Utiel, a partir de un acuerdo entre la Administración y los usuarios, y teniendo en cuenta los condicionantes de la zona, se ha establecido una dotación bruta media de $600 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para la superficie consolidada de vid, así como

para la superficie de nueva transformación de vid, olivar y almendro, que dependerá de las condiciones climáticas de cada año (año húmedo, medio o seco).

Igualmente, en el artículo 20.C.9 del Anexo XI de la Normativa del PHJ 2015-2021, se establece que *“Se reservan 6,5 hm³/año de recursos subterráneos de la masa de agua subterránea de Requena-Utiel para atender futuros crecimientos en la unidad de demanda urbana de Subterráneos de Requena y de la industria de la zona, así como para la adecuación de concesiones de regadío y dotaciones en la comarca Requena-Utiel. Esta reserva podrá materializarse una vez se realice un plan de explotación de la masa de agua subterránea”*.

Los 6,5 hm³/año reservados se distribuirán de la siguiente manera:

- Un volumen de 5,5 hm³/año se almacenará para redotar a los usuarios con concesiones vigentes para regadío de cultivos de vid y dotar a concesiones que se encuentran en proceso de tramitación.
- 0,5 hm³/año se utilizarán para la mejora de la garantía de los regadíos superficiales con derechos concesionales vigentes.
- El volumen restante completará los posibles crecimientos en la Unidad de Demanda Urbana de Subterráneos de Requena y de la industria de la zona.

Además, el art. 20.C.13 de la citada normativa establece una reserva adicional de 2 hm³/año para atender nuevos usos de poca importancia.

Por lo tanto, debido a la necesidad de disponer de un plan de explotación actualizado de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, en diciembre de 2016 se aprobó la redacción del mismo, de acuerdo con lo dispuesto en el PHJ 2015-2021. Junto con este plan, se establece la necesidad de elaborar un modelo matemático que ayude a predecir el comportamiento del sistema y la evolución del mismo.

2. MODELO CONCEPTUAL

A lo largo de este capítulo se describe la zona de estudio, detallando su localización, características principales del sistema y el modelo conceptual propuesto.

2.1 Localización del área de estudio

La masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel, que se sitúa en el sudeste de la Península Ibérica, en el centro de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (ver figura 1), cuenta con una superficie total de 987,9 km². La mayor parte de la misma (966,4 km²) se localiza en la provincia de Valencia, perteneciendo la parte restante a la provincia de Cuenca. Junto a la citada masa, se encuentra la masa de agua subterránea 080.139 Cabrillas-Malacara, con una superficie total de 286,34 km², de los cuales casi el 100% es de una permeabilidad media. De toda la zona de estudio, aproximadamente el 96,5% se encuentra dentro del sistema de explotación Júcar y la parte restante pertenece al sistema de explotación Turia.

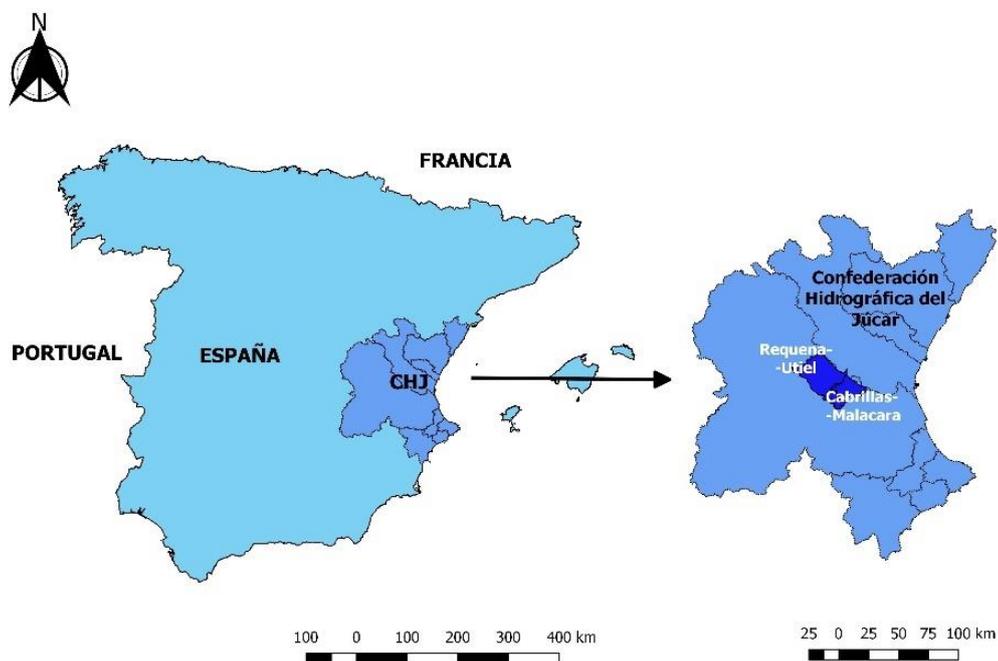


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

2.2 Contexto hidrológico

2.2.1 Climatología

La zona de estudio presenta un clima mediterráneo con algunos rasgos de continentalidad debido a la altitud en algunas zonas y el alejamiento al mar.

- *Temperatura*

Respecto a la temperatura, se caracteriza por un verano corto y un invierno largo. Durante los meses de verano, sobre todo en julio y agosto, se registran temperaturas incluso hasta de 40 °C en las horas centrales del día, apreciándose decrecimientos importantes por las noches. La amplitud térmica es la que le aporta rasgos de continentalidad al clima de la zona. Sin embargo, desde noviembre hasta abril se pueden registrar frecuentes heladas, alcanzando mínimas de 15 °C bajo cero.

Debido al relieve de la zona, se aprecia un decrecimiento de temperaturas con la altura, lo que provoca fenómenos de inversión térmica muy marcados en algunos valles y fondos abrigados.

Como ejemplo, se ha decidido analizar la temperatura de una estación de la zona de estudio. De acuerdo con el Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H.), la Confederación Hidrográfica del Júcar no tiene ninguna estación meteorológica de temperatura en la zona. Por lo tanto, se ha recurrido al Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), siendo este la mayor fuente de información de carácter agroclimático en la actualidad. En esta red, se ha detectado una medición continuada de la temperatura en el municipio de Requena.

Dicha estación se encuentra a una altitud de 692 m y fue instalada en verano del año 1999, continuando su medición hasta la actualidad.

Tal y como se observa en la figura 2, la temperatura media mensual alcanza los 23 °C en los meses de verano, decreciendo dicho valor a 5 °C en los meses de invierno. A lo largo del periodo 2001-2016, la temperatura media registrada es de 13 °C. No obstante, analizando las máximas y mínimas, se pueden observar meses, en los cuales las temperaturas han alcanzado máximas de 37 °C en verano y mínimas de -3 °C en los meses de invierno.

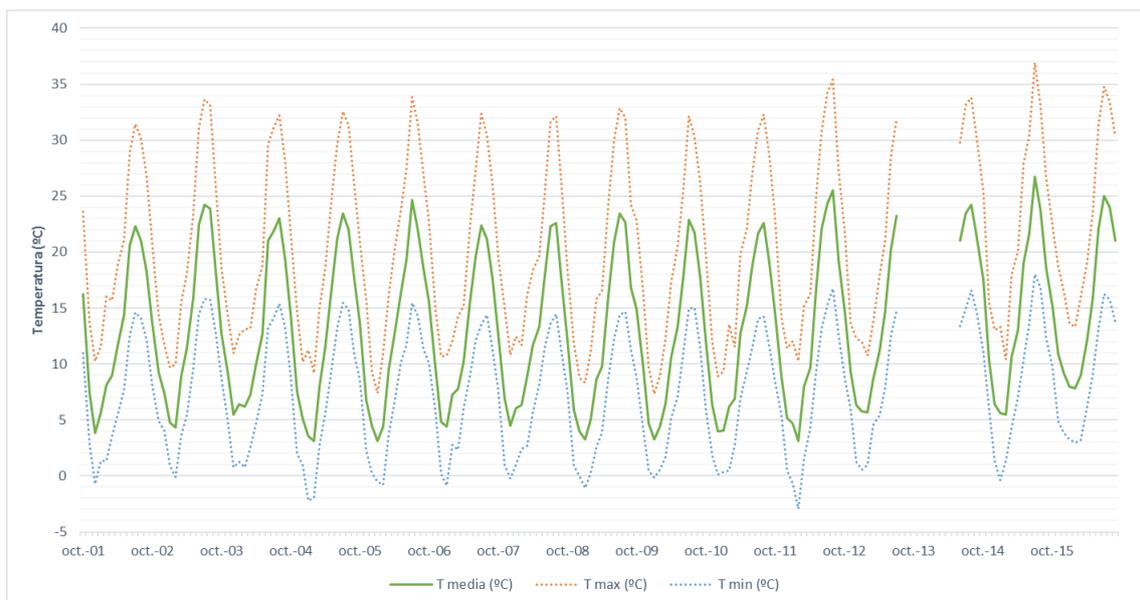


Figura 2. Evolución de la temperatura en la estación de Requena. Periodo 2001-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR

- *Precipitación*

En cuanto a las precipitaciones, éstas son irregulares, siendo los meses de mayo y octubre los más lluviosos, que coinciden con los meses de recolección de la uva. En verano apenas se registran precipitaciones, lo que provoca ascensiones rápidas de masas de aire recalentado que vienen seguidas de tormentas de granizo.

La Confederación Hidrográfica del Júcar tiene cuatro pluviómetros en la zona de estudio, ubicados en diferentes municipios. No obstante, con objeto de presentar un ejemplo completo de climatología de la zona, se ha decidido continuar con la estación de Requena de la red SIAR.

En la figura 3 y figura 4 se aprecia que las precipitaciones son irregulares a lo largo de los años, dependiendo de las condiciones meteorológicas registradas. No obstante, de acuerdo con las precipitaciones mensuales medias del periodo 2001-2016, se reafirma que los meses más húmedos son septiembre, octubre, mayo y abril. En cambio, julio y agosto se corresponden como los meses más secos.

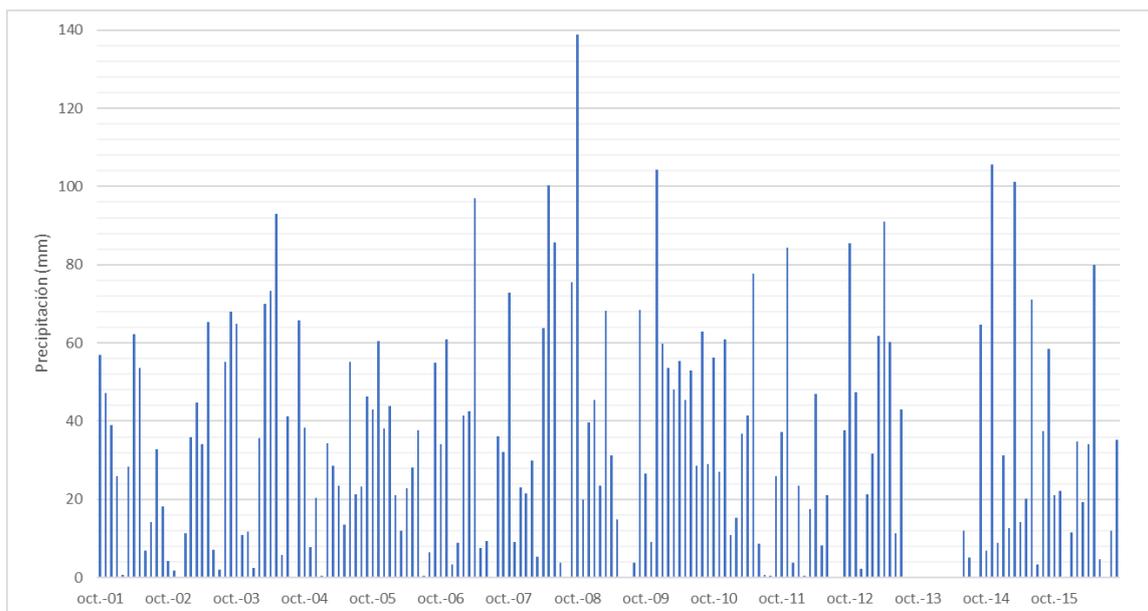


Figura 3. Evolución de la precipitación mensual acumulada en la estación de Requena. Periodo 2001-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR

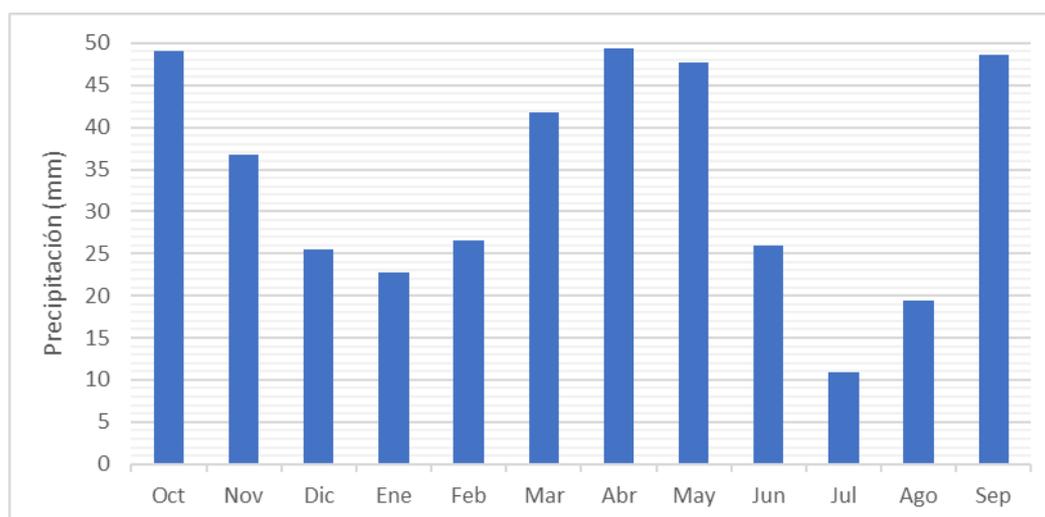


Figura 4. Evolución de la precipitación mensual media (2001-2016) en la estación de Requena. Fuente: Elaboración propia con datos de la red SIAR

En conclusión, el clima de la región se caracteriza por su sequedad, con dos estaciones lluviosas, un verano corto y un invierno de heladas muy largo. Otro aspecto que le caracteriza es la amplitud térmica que se puede dar entre las estaciones cálidas y frías o incluso entre el día y la noche.

2.2.2 Recursos hídricos superficiales

Ubicado en el río Magro, a la altura del municipio de Requena, se localiza la única estación de aforos de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) de la zona (ver figura 5). El río Magro es la principal masa que se encuentra directamente relacionada

con las masas de agua subterráneas Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, siendo de carácter ganador a lo largo de toda su longitud.

En la figura 6 se representan los datos registrados en la estación de Requena. Tal y como se puede observar, la serie hidrológica ha sufrido una evolución muy marcada a lo largo del periodo representado.

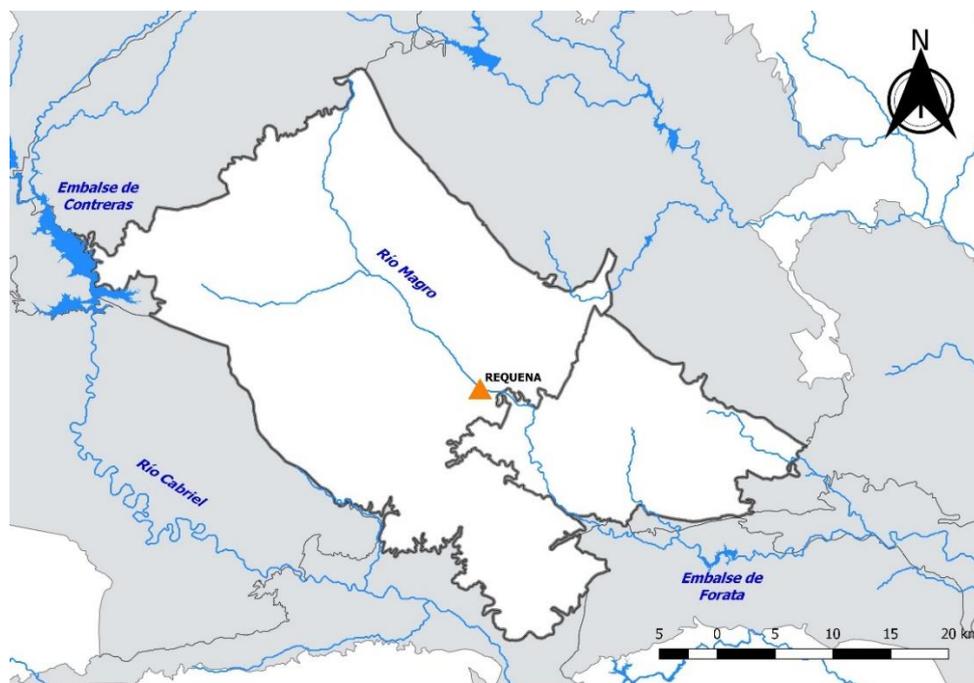


Figura 5. Masas de agua superficial de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los datos de la serie 2004-2016, la media de caudales registrada es de 127 l/s, mientras que en el periodo 1914-1979 la aportación media era de 672 l/s. Una de las posibles causas de dicha disminución puede ser el aumento del volumen de agua subterránea bombeada que ha habido en las últimas décadas, provocando un descenso de los niveles piezométricos. Dichos descensos pueden haber influido directamente en los flujos que el sistema de acuíferos aporta a los ríos.

Aguas abajo de la estación de Requena se localiza el embalse de Forata. Debido a la disminución de las aportaciones, los niveles del embalse han disminuido considerablemente, lo que ha ocasionado problemas puntuales en la satisfacción de las demandas.

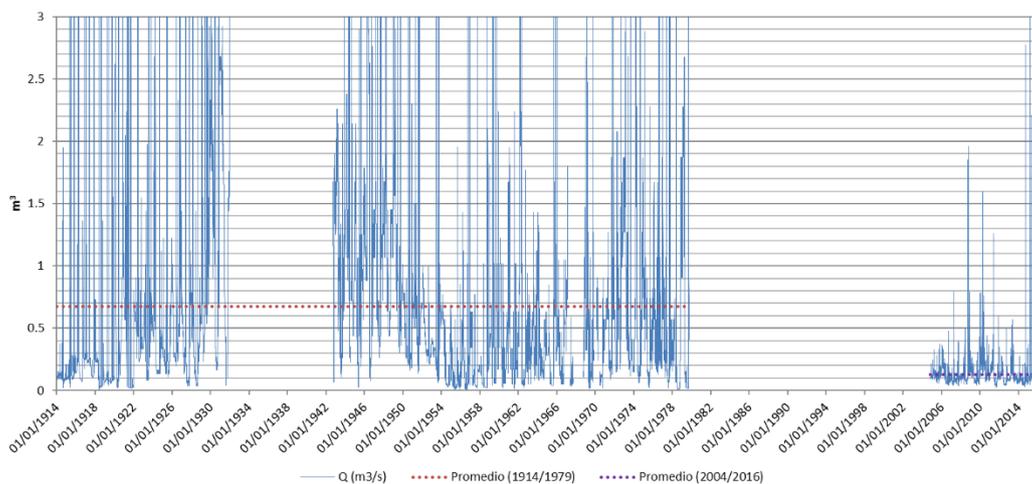


Figura 6. Caudales medios diarios registrados en la estación de aforos de Requena. Periodo 1914-2016. Fuente: Elaboración propia con datos del CEDEX

No obstante, tal y como se observa en la gráfica de la figura 6, desde 1980 hasta el 2004 existe una interrupción en el registro de los datos, que se corresponde con el periodo en el cual hubo el cambio drástico de las aportaciones, por lo que, a priori, no es posible conocer la causa exacta de la misma.

2.3 Contexto hidrogeológico

Las masas de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel y 080.139 Cabrillas-Malacara se encuentran delimitadas por otras masas que se representan en la figura 7.

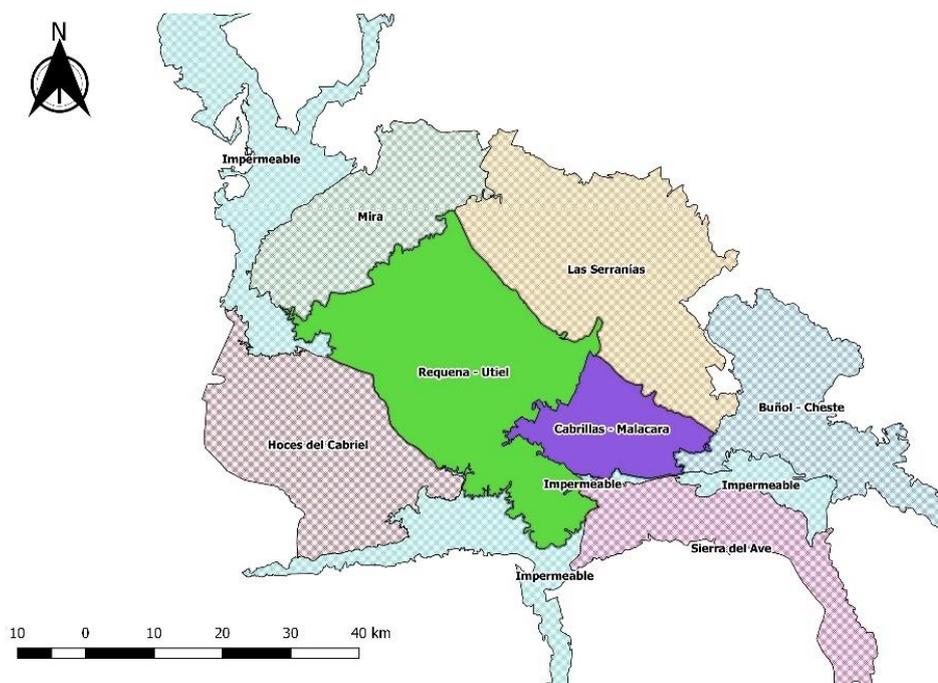


Figura 7. Delimitación del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Límites del sistema

La definición de los límites constituye uno de los primeros pasos para la elaboración de un modelo conceptual. Lo ideal suele ser que estos coincidan con límites hidrogeológicos naturales. No obstante, en la mayoría de las ocasiones no suele ser posible, por lo que es necesario aplicar diferentes criterios con objeto de definir el sistema.

Para la delimitación de la zona de estudio, se han utilizado los límites definidos en el documento “*Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea*” (CHJ, 2009a).

Según la caracterización descrita en el citado documento, el sistema de acuíferos, objeto de este estudio, se encuentra delimitado por las siguientes formaciones:

- Al este se encuentra la masa de agua subterránea 080.132 Las Serranías. Estos se unen por la traza de cabalgamiento entre los municipios de Sinarcas y Buñol.
- Al suroeste el límite es totalmente impermeable, siendo el flujo de transferencia completamente nulo.
- Al sureste existe la masa de agua subterránea 080.140 Buñol-Cheste.
- A lo largo del límite oeste se encuentra la masa de agua subterránea 080.135 Hoces de Cabriel. La relación entre la zona de estudio y esta masa es confusa.
- Al norte se encuentran las formaciones cretácicas de la masa de agua subterránea 080.134 Mira.

Es fundamental destacar que la definición de los límites de este estudio ha sido compleja. A lo largo de los contornos norte y este existe una continuidad hidrogeológica de las formaciones, por lo que ha sido preciso establecer un límite físico, como puede ser un límite de carga constante o isopieza de nivel constante. El límite oeste ha sido más fácil de definir debido al bajo interés hidrogeológico de las formaciones existentes, aunque se aprecien zonas con cierta relación y contradicciones en la información de partida analizada. Por último, está el límite sur de la zona. La mayor parte de este contorno está en contacto con formaciones hidrogeológicas completamente impermeables. En el capítulo “4. *Implementación del modelo*”, se representa la caracterización de los límites establecidos.

2.3.2 Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas están constituidas por uno o varios acuíferos agrupados. Su determinación se ha llevado a cabo en los planes hidrológicos de cuenca, para lo cual ha sido necesaria la recopilación de la información sobre la geología, pozos y datos sobre las propiedades hidrogeológicas del subsuelo. La delimitación se realiza de forma que se pueda plantear el balance hídrico de la misma, siendo el objetivo principal tratar de conseguir una administración eficaz del agua.

Según los datos litológicos disponibles, en la masa de agua subterránea Requena-Utiel se distinguen dos acuíferos. Por un lado, se encuentra el acuífero cuaternario, libre por naturaleza, compuesto por materiales detríticos del aluvial del Magro y glaciares de la Sierra de Utiel. Por otro lado, se halla el acuífero Mioceno, dividido en dos sistemas. El sistema superior es el Mioceno calcáreo, que se trata como acuífero libre y está compuesto por calizas potenses drenadas por materiales de borde. El sistema inferior es más complejo. Se trata de un acuífero Mioceno conglomerático de base que tiene un comportamiento característico de un acuífero confinado o semiconfinado, dependiendo de las zonas, y se compone de niveles alternantes de conglomerados y areniscas con tramos arcillosos y conglomerados de la formación terciaria. Todos estos acuíferos se encuentran sobre una base impermeable de facies de Keuper.

En contacto con Requena-Utiel, se encuentra la masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara. En ella, se distinguen dos niveles de acuíferos. Por un lado, se encuentra el Cretácico superior de la Sierra de Malacara, constituido por calizas, calcarenitas, brechas, areniscas y margas del Cretácico. Por otro lado, la formación inferior que se constituye por margas de Lías, Dogger y Palm.

2.3.3 Dominios hidrogeológicos

Los dominios hidrogeológicos son ámbitos territoriales, de dimensión regional, con características y comportamiento hidrogeológico y/o geológico común. Para la definición de los mismos, se ha partido de la siguiente información de base:

- Topografía del terreno.
- Mapas hidrogeológicos, litológicos y de permeabilidad.
- Fichas de caracterización de las masas de agua subterránea.

A partir de la citada información, se han definido cinco diferentes dominios hidrogeológicos, que se representan a continuación.

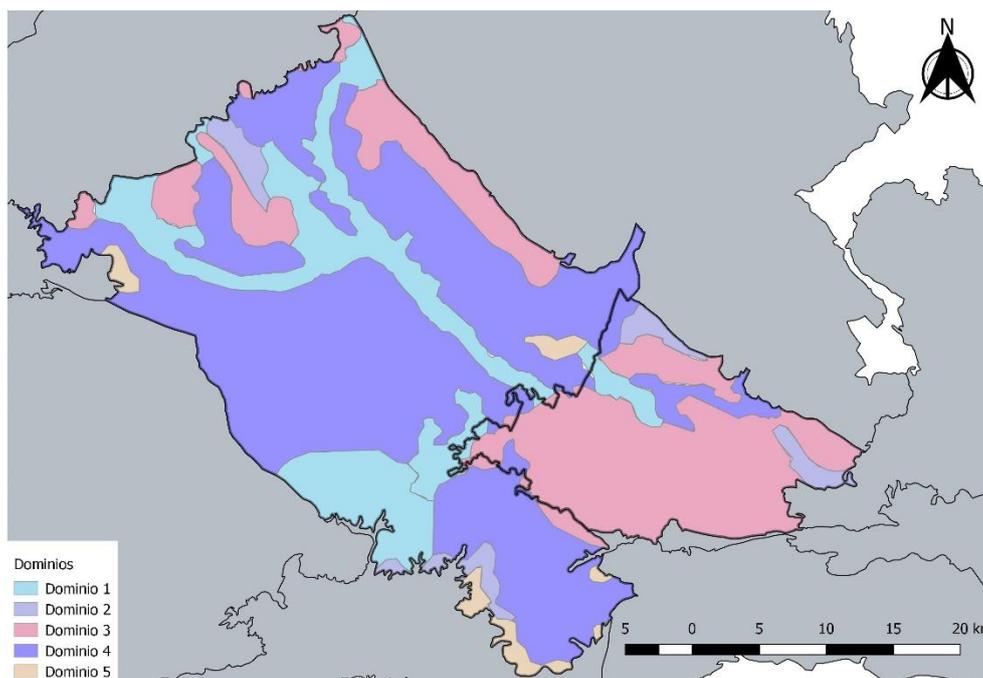


Figura 8. Dominios hidrogeológicos definidos en el estudio. Fuente: Elaboración propia

- **Dominio 1:** Se trata de formaciones aluviales de alta permeabilidad que se encuentran alrededor del río. Están compuestas por materiales detríticos, principalmente gravas, conglomerados, arenas y limos.
- **Dominio 2:** Se trata de formaciones compuestas por rocas carbonatadas de alta permeabilidad en general. Entre ellas destacan las calizas, dolomías y margas. También se pueden encontrar materiales detríticos de menor tamaño de grano que las del dominio 1, como, por ejemplo, las areniscas.
- **Dominio 3:** Se trata de formaciones compuestas por rocas carbonatadas, pero en este caso, de una permeabilidad media-baja. Al igual que en el dominio 2, los materiales principales son calizas, dolomías y margas.
- **Dominio 4:** Se trata de formaciones detríticas o cuaternarias de una permeabilidad media-baja. Está compuesto principalmente por calizas detríticas, calcarenitas, margas y arcillas.
- **Dominio 5:** Se trata de formaciones impermeables o de baja permeabilidad. En este caso, principalmente destacan los yesos y arcillas versicolores, que son los que le confieren la dificultad para permitir el flujo entre los granos.

La conexión entre estas zonas es variable a lo largo de la superficie de estudio. La distribución horizontal de las propiedades hidrogeológicas se ha considerado homogénea para todas las capas. No obstante, teniendo en cuenta la naturaleza de cada

acuífero, los citados parámetros se han adecuados a las condiciones de cada capa. Generalmente, se ha considerado una disminución de los valores de los parámetros hidrogeológicos con la profundidad.

2.4 Bombeos

En el área de estudio gran parte de las demandas son abastecidas con recursos provenientes de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. La mayor parte del volumen extraído se destina a usos agrícolas. No obstante, no se puede despreciar el volumen destinado al abastecimiento de las demandas urbanas.

En el modelo realizado en el año 2001, se cuantificaban aproximadamente 700 pozos de bombeo para ese mismo año. Actualmente, dichos pozos ascienden a un número de 1145.

2.4.1 Demanda agrícola

De acuerdo con el PHJ 2015-2021, la Demarcación Hidrográfica del Júcar cuenta con 98 Unidades de Demanda Agrícola, de las que tres se abastecen total o parcialmente de los recursos provenientes del sistema, objeto de este estudio: Riegos del Alto Magro, Riegos Mixtos de la Plana de Utiel y Hoya de Buñol y Chiva (figura 9).

Las unidades citadas están compuestas por diferentes comunidades de regantes. La demanda de los mismos supone un volumen de extracción muy importante. Cuentan con 1101 pozos registrados en sus derechos, de los cuales casi la totalidad se encuentran ubicados sobre la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Cabe destacar que, actualmente, existen solicitudes de concesión que se encuentran en proceso de tramitación para nuevas comunidades de regantes. Las características de dichos derechos pendientes de tramitación han sido incorporadas en el modelo.

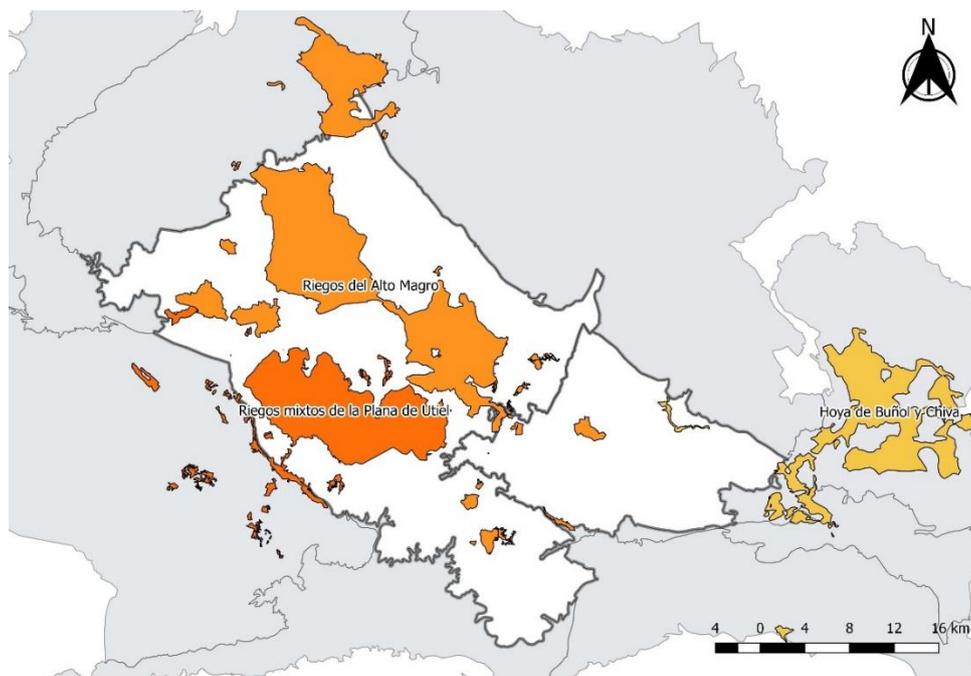


Figura 9. Unidades de Demanda Agraria del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CHJ

El cultivo principal de la zona es la vid para vinificación, así como otros cultivos leñosos (frutales, almendros y olivar) y cultivos herbáceos.

2.4.2 Demanda urbana

La demanda urbana comprende tanto el uso doméstico (habitual y estacional), como el uso de servicios públicos locales e institucionales y el uso industrial que se encuentra conectado a la red de suministro urbano.

De acuerdo con el PHJ 2015-2021, existen 92 Unidades de Demanda Urbana (UDU) definidas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. A continuación, se mencionan las unidades abastecidas total o parcialmente del sistema de estudio.

Tabla 1. Unidades de Demanda Urbana dentro del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos PHJ 2015-2021

UDU	Municipios
Subterráneo de Requena	Requena
Subterráneos de Requena-Utiel	Camporrobles, Caudete de las Fuentes, Fuenterrobles, Utiel, Villagordo del Cabriel
Superficiales del Macizo del Caroche y Hoya de Buñol	Alborache, Ayora, Bicorp, Buñol, Cofrentes, Cortes de Pallás, Dos Aguas, Jalance, Jarafuel, Millares, Teresa de Cofrentes, Yátova, Zarra
Subterráneos de Buñol-Cheste	Macastre, Siete Aguas, Turís

UDU	Municipios
Subterráneos de Hoces de Cabriel	Villatoya, Minglanilla, Villapardo, Venta del Moro

Las UDUs citadas cuentan con 44 pozos de bombeo. A pesar de ser un número de bombeos menor que los agrícolas, suponen un volumen de extracción importante.

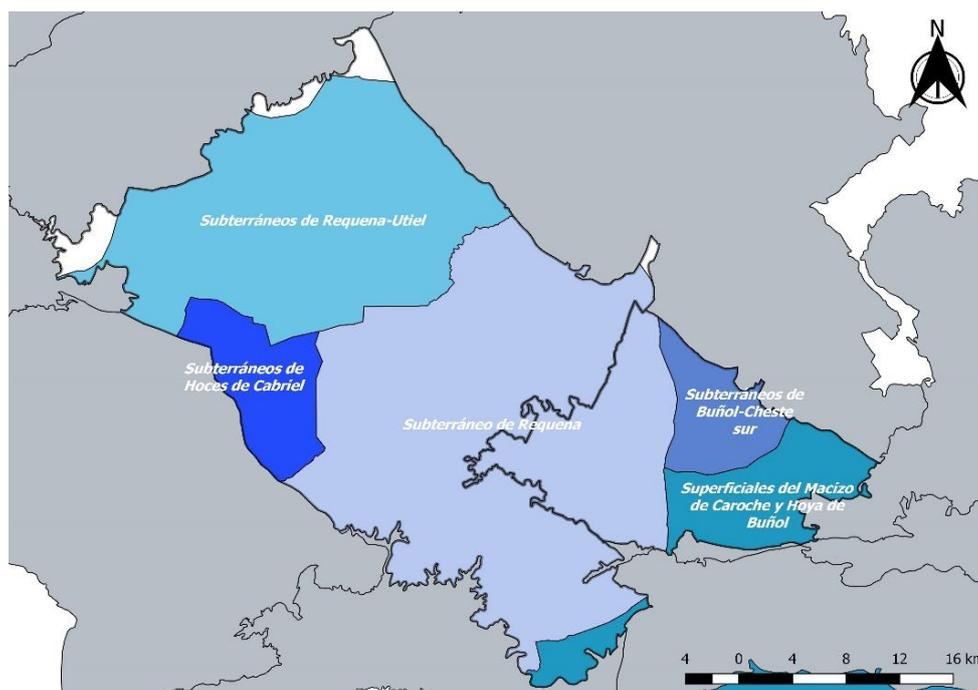


Figura 10. Unidades de Demanda Urbana del sistema de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de la CHJ

2.5 Modelo hidrogeológico conceptual

Después de definir y conocer la zona de estudio, es preciso establecer un modelo hidrogeológico conceptual. Este paso constituye uno de los pasos más importantes antes de la construcción de un modelo matemático, puesto que permite conocer el funcionamiento de las formaciones acuíferas.

El comportamiento del sistema formado por las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara está regido por varios componentes interrelacionados (ver tabla 2).

Tabla 2. Elementos del balance del sistema. Modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Elaboración propia

ENTRADAS AL SISTEMA	SALIDAS DEL SISTEMA
- Recarga por infiltración de la precipitación	- Bombeos
- Pérdidas desde el cauce	- Pérdidas al cauce
- Transferencias laterales entre las masas de agua adyacentes	- Transferencias laterales entre las masas de agua adyacentes

La principal fuente de recarga es la infiltración de la precipitación. Si se analiza la recarga por zonas, se confirma que, en regiones más altas, se registran precipitaciones superiores, por lo que la recarga resultante es mayor.

Asimismo, existe otra zona de recarga que está constituida por los flujos de entrada desde la masa de agua subterránea Mira, al norte del sistema, directamente relacionada con Requena-Utiel. Se trata de un límite, a lo largo del cual existe una continuidad hidrogeológica de las formaciones, por lo que el flujo lo atraviesa y entra al sistema debido a la diferencia de alturas piezométricas existente.

La principal zona de descarga de agua subterránea es el río Magro. A lo largo de todo el cauce las formaciones cuaternarias que constituyen el acuífero de carácter libre ceden sus recursos de forma natural a este río. Del mismo modo, al sureste del sistema, desde Cabrillas-Malacara, se produce una descarga hacia la masa de agua subterránea Buñol-Cheste.

La relación entre el sistema y la masa Hoces de Cabriel es confusa. En la ficha de caracterización de la misma, se describe como una zona completamente impermeable. No obstante, en su balance se establece un flujo de entrada debido a transferencias laterales. Después de analizar detalladamente la zona, se ha decidido definir un punto de descarga desde Requena-Utiel hacia Hoces de Cabriel.

El límite este del sistema presenta un carácter muy dinámico por naturaleza, por lo que la piezometría del mismo sufre fluctuaciones constantes. Se trata de un contorno completamente permeable, a través del cual se producen flujos de entrada y salida, dependientes de la piezometría.

Con el propósito de mejorar el conocimiento del estado del sistema y la relación entre éste y el resto de los componentes del balance, en la figura 12, se presentan los mapas piezométricos del mismo. Tal y como se puede observar, la mayoría de las isopiezas son

discontinuas debido a la gran incertidumbre y desconocimiento que acompaña a los mismos.

El conocimiento de las zonas de recarga y descarga que se representan en la figura 11, así como de la geometría y topografía del sistema, permite la toma de decisiones en el proceso de elaboración del modelo.

El sistema de estudio se podría definir como una zona en la que existe un fuerte condicionamiento topográfico que causa un flujo marcado desde el Norte al Sur. Las cotas piezométricas se encuentran generalmente entre 500 y 800 m.s.n.m.

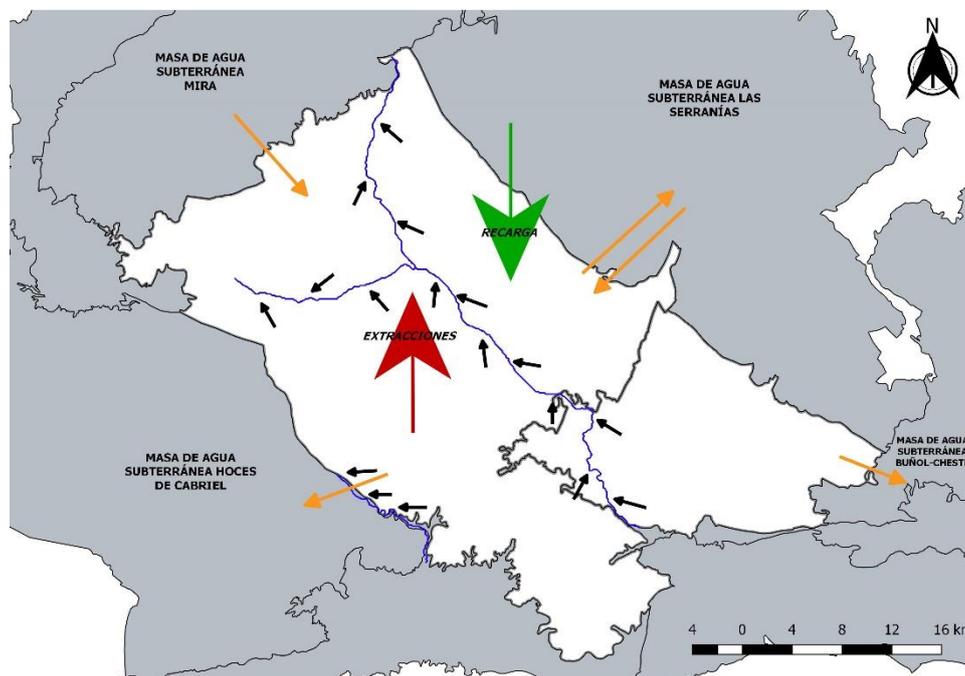


Figura 11. Representación del modelo conceptual. Fuente: Elaboración propia

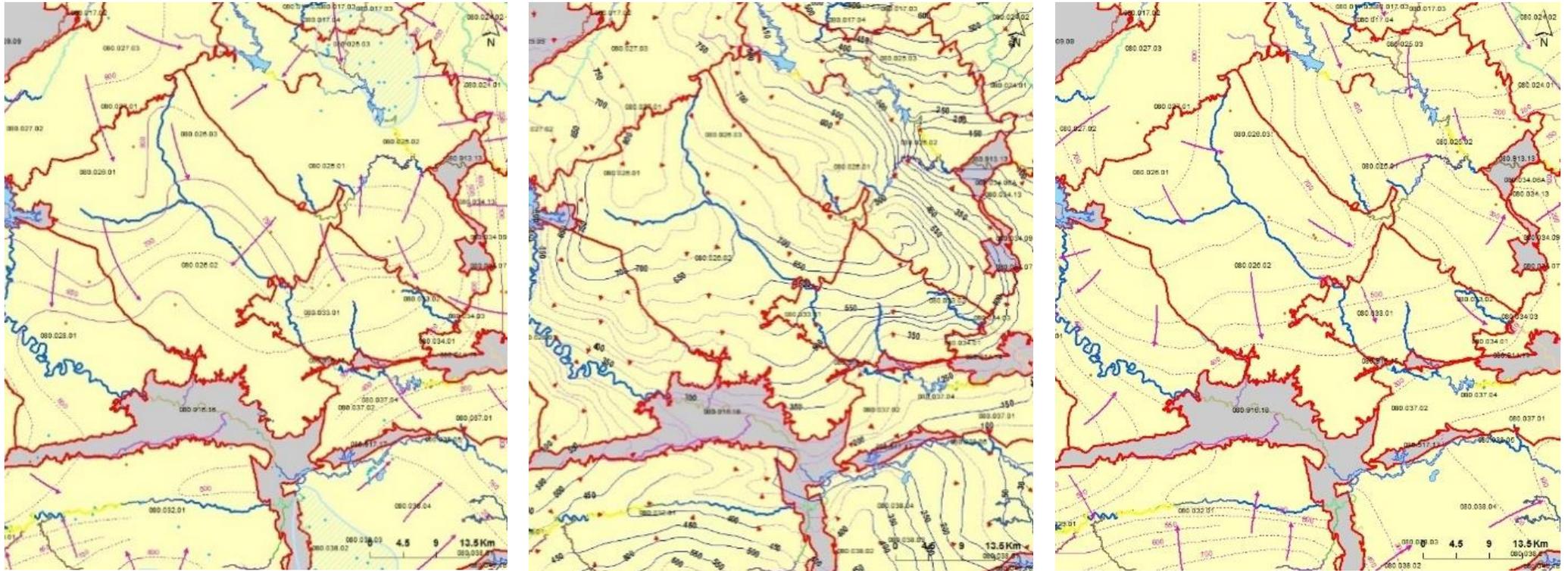


Figura 12. Mapas piezométricos. Años 1970/74,2005 y 2008 respectivamente. Fuente: CHJ (2015)

3. SELECCIÓN DEL CÓDIGO

Este apartado se centra en la descripción del código seleccionado para la elaboración del modelo matemático y el diseño del mismo.

3.1 Código y modelo matemático

El código escogido para la elaboración del modelo ha sido MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984), con la ayuda de la interfaz ModelMuse (Winston, R.B., 2009). MODFLOW es un programa que resuelve la ecuación del flujo de agua subterránea para diferentes condiciones de contorno, características y condiciones iniciales, mediante diferencias finitas, consiguiendo una solución para cada celda utilizando el álgebra matricial y soluciones iterativas. Se trata de un programa tridimensional de código libre, escrito y desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Existen muchos otros programas o modelos que están relacionados con MODFLOW, tales como MT3D, para la simulación del transporte de solutos, MODPATH, utilizado para la simulación del recorrido de las partículas y, SEAWAT, que sirve para simular el transporte en medios con densidad variable, entre otros.

Se trata de un programa que está organizado en diferentes módulos o paquetes que permiten la simulación de diferentes procesos o interacciones que puedan darse en aguas subterráneas, tal y como pueden ser los pozos, recarga, ríos, etc. Con la versión desarrollada en 2005, se consiguió mejorar la definición de la malla mediante un paquete de refinamiento local, la estimación de parámetros y los análisis de sensibilidad e incertidumbre.

Para sistemas complejos, no existen soluciones analíticas para la ecuación del flujo subterráneo, por lo que se necesitan métodos numéricos para resolverlos. MODFLOW se basa en el método de diferencias finitas y describe el flujo de agua subterránea a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

donde, K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} representan las componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones x , y y z (L/T), h es la altura piezométrica representada como longitud (L), S_s representa el almacenamiento en el medio poroso (L^{-1}), t es el tiempo y W es el flujo

volumétrico por unidad de volumen (T^{-1}). Los valores negativos de este último parámetro indican extracciones de agua, mientras que los positivos indican inyección de agua.

El modelador discretiza el área en N celdas, asigna las propiedades de los acuíferos a cada celda y define unas condiciones de contorno, para que MODFLOW establezca la solución de la ecuación diferencial en cada celda y devuelva valores de altura o caudal en todas las celdas utilizando el álgebra matricial y soluciones iterativas.

En conclusión, la solución y aplicación de la citada ecuación permite conocer valores de altura piezométrica en función del espacio y del tiempo, esto es, $h = h(x, y, z, t)$, junto con los flujos de balance en cada celda.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

A lo largo de este capítulo se describe la metodología utilizada, así como los diferentes módulos o paquetes de MODFLOW utilizados y su aplicación al implementar el modelo.

4.1 Discretización espacio-temporal y diseño de la malla

4.1.1 Diseño de la malla

De acuerdo con los datos disponibles, se ha decidido realizar una discretización horizontal en celdas cuadradas de 500 x 500 m², resultando en un sistema de 37.719 celdas, compuesto por 127 columnas y 99 filas.

Verticalmente, la masa de agua subterránea se compone de 3 capas apoyadas sobre un lecho impermeable de facies de Keuper. Esta discretización fue derivada de los datos del modelo matemático del año 2001 (CHJ, 2001) y la información litológica disponible de la zona.

4.1.2 Discretización temporal

Respecto al tiempo de simulación, se ha estudiado el periodo 1940-2016, que ha sido dividido en dos partes. Por un lado, se ha simulado la serie desde el año hidrológico 1940/41 hasta 1979/80. Esta simulación trata de representar un régimen estacionario o no influenciado, en el cual el volumen entrante es igual al volumen saliente, siendo el cambio del almacenamiento del sistema nulo. Para la simulación de este periodo, se han considerado los valores medios de los parámetros de entrada.

Por otro lado, se han simulado los años restantes hasta el año hidrológico 2015/16. Dicho periodo representa la situación del sistema en un régimen transitorio o influenciado. En este caso, la discretización del tiempo ha sido mensual, es decir, se han considerado unos datos de entrada constantes a lo largo de cada mes, con objeto de conocer la afección de la evolución de los bombeos sobre el sistema, a través de la pérdida/ganancia del almacenamiento.

4.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del modelo determinan la interacción existente entre las masas de agua subterránea modeladas y el exterior. En un modelo de flujo se diferencian tres tipos de condiciones:

- Condición de Dirichlet o de primer tipo. Es una condición de contorno en la que se prescribe la altura piezométrica.
- Condición de Neumann o de segundo tipo. Se trata de una condición de contorno en la que se prescribe un flujo, ya sea de entrada o de salida.
- Condición de Cauchy o de tercer tipo. Es una combinación de las dos condiciones anteriores, en la que el flujo depende de la altura piezométrica.

4.2.1 Límites laterales

Los estudios hidrogeológicos realizados hasta la actualidad no definen con certeza todas las interacciones existentes entre la zona de estudio y las masas de agua subterráneas adyacentes. Por lo tanto, el proceso de determinación de los flujos entre las mismas ha sido complejo. No obstante, a partir de la caracterización descrita en las fichas de masas de agua subterránea (IGME, 2011), se ha conseguido información de partida esencial para la determinación de los posibles flujos.

Resumiendo,

- Desde la masa de agua subterránea Mira, al norte del sistema de estudio, existe un flujo directo hacia la masa Requena-Utiel, cuantificado en $10 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- A lo largo del contorno este, se localiza la masa de agua subterránea Las Serranías. Tal y como se ha comentado anteriormente, la conexión con la citada masa es variable, dependiendo siempre de la piezometría de la zona, que puede ser inestable por el carácter dinámico del límite y las fluctuaciones existentes.
- Al sureste del sistema existe una descarga de flujo desde Cabrillas-Malacara hacia la masa de agua subterránea Buñol-Cheste de $3 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- La relación con la masa de agua subterránea Hoces de Cabriel no es nada clara, ya que existe una contradicción en las fichas de caracterización de las masas (IGME, 2011). Por un lado, Hoces de Cabriel se describe como una masa completamente impermeable, en la cual los flujos a través de los contornos son nulos. Por otro lado, en el balance de flujos de la misma, se cuantifica una transferencia lateral positiva. Después de estudiar las posibles suposiciones se ha establecido un flujo de salida de $1,26 \text{ hm}^3/\text{año}$ hacia Hoces de Cabriel.
- El resto de los límites se han considerado impermeables.

Las condiciones mencionadas han sido definidas mediante el paquete “*General-Head Boundary (GHB)*”. Este módulo se utiliza para simular condiciones de contorno en los

cuales el flujo es dependiente de la altura piezométrica. El volumen de flujo que atraviesa el contorno será siempre proporcional a la variación de la cota piezométrica.

GHB requiere información sobre la cota de la lámina de agua a lo largo del contorno y la conductancia de los materiales presentes para cada paso de tiempo establecido. El volumen entrante o saliente será proporcional a la diferencia de la cota piezométrica en cada celda. En este caso, la conductancia será el factor que relacionará ambos parámetros, permitiendo una tasa de flujo mayor o menor.

En MODFLOW, la conductancia se describe en unidades de longitud al cuadrado por unidad de tiempo (L^2/T), que es igual a:

$$\frac{KLW}{M} \quad [2]$$

donde, K es la conductividad hidráulica de los materiales del contorno, L la longitud del contorno, W el ancho y M el espesor de los materiales del contorno, medido perpendicularmente al flujo, que generalmente se corresponde con el espesor vertical de los materiales. La interfaz de ModelMuse permite escoger diferentes caminos para determinar la conductancia de las formaciones:

- 1) La opción que aparece por defecto permite definir la conductancia de forma “calculada”. En este caso, el valor introducido deberá corresponderse con KW/L , puesto que la longitud es incorporada automáticamente.
- 2) Si la interpretación de la conductancia se establece como “directo”, el valor introducido deberá corresponderse con la fórmula 2.
- 3) En cambio, si se escoge la opción “total”, la fórmula 2 se modificará multiplicando la conductividad hidráulica de los materiales por el cociente entre la longitud del contorno correspondiente a cada celda y la longitud total del objeto, es decir, el valor se repartirá a cada celda proporcionalmente a la longitud del objeto dentro de ellas.

Entre todas las opciones se ha empleado la fórmula 2, debido a que permite un mayor control sobre el parámetro.

De todos los módulos que MODFLOW ofrece, este es el único en el que existe una relación lineal entre el flujo y la cota piezométrica, lo que proporciona una ventaja para el proceso de calibración.

4.2.2 Cauces superficiales

La masa de agua superficial que principalmente incide sobre el comportamiento del sistema es el río Magro. Igualmente, se ha incluido el cauce Romeroso, ubicado en el contorno oeste, debido a la posible influencia que pueda tener en el mismo. No se han tenido en cuenta los afluentes al río Magro ubicados en Cabrillas-Malacara.

Para ilustrar la relación entre las formaciones existentes y los ríos, se han estudiado diferentes fuentes de información. Por un lado, se ha examinado el balance resultante del modelo del año 2001 (CHJ, 2001). No obstante, cabe destacar que la geometría actual de la zona de estudio no es idéntica, por lo que dichos valores han servido únicamente como referencia. Por otro lado, se ha analizado la información sobre las relaciones entre ríos y acuíferos que Vázquez, S.P. (2017) define. Tal y como se aprecia en la figura 13, en la zona de estudio todas las masas de agua superficiales presentes son ganadoras, lo que conlleva a la existencia de un flujo de salida desde el sistema de acuíferos hacia los ríos.

Por último, con el propósito de calcular la magnitud de dichos flujos, se ha realizado un análisis de la información foronómica de la zona, concretamente de los datos registrados en la estación de aforos de Requena y los flujos de entrada al embalse de Forata. Suponiendo que a lo largo de ese trayecto el caudal que el río gana se corresponde con el volumen que el sistema le aporta, se han estimado los caudales específicos que el río Magro percibe a lo largo de ese tramo. Dichos caudales se han aplicado al resto de los tramos, empleando la equivalencia entre las superficies de cuenca abarcadas por los mismos.



Figura 13. Relaciones río-acuífero, ámbito CHJ. Fuente: Vázquez, S. P. (2017)

Para simular la relación río-acuífero se ha utilizado el paquete “River (RIV)” de MODFLOW. Este paquete se utiliza para simular flujos que entran o salen del sistema a través de los ríos. En este caso, los ríos han sido importados de un SIG.

RIV requiere información sobre la cota del lecho del río, la cota de la lámina de agua y la conductancia de los materiales del lecho para cada paso de tiempo establecido. En este caso, la velocidad del caudal del río será proporcional a la superficie que atraviesa.

Las cotas precisas se han estimado a partir de la información del terreno, definiendo puntos a lo largo del cauce e interpolando los valores.

La formulación que MODFLOW emplea para la conductancia es la misma que en el paquete GHB (ver ecuación 2) y la interfaz ModelMuse permite su aplicación mediante las tres metodologías descritas. Para la definición de la conductancia de los ríos, se ha utilizado la opción directa.

En la simulación de este contorno, la interacción entre el sistema y el río se determinará de acuerdo con los siguientes criterios:

- 1) El volumen de agua contenido en una celda podrá dejar de ser agua subterránea a través del río cuando la cota piezométrica en dicha celda es superior a la cota de la lámina de agua superficial. En este caso, la velocidad del flujo será

proporcional a la diferencia entre el nivel del agua en el río y la cota piezométrica en la celda.

- 2) El volumen de agua contenido en una celda podrá pasar a ser agua subterránea a una velocidad variable a través del río, cuando la cota piezométrica de la celda está por debajo del nivel del agua del río, pero es más alta que la cota del lecho del río. En este caso, la velocidad del flujo será proporcional a la diferencia entre la cota de la lámina de agua superficial y la cota piezométrica en la celda.
- 3) El volumen de agua contenido en una celda podrá pasar a ser agua subterránea a una velocidad constante a través del río, cuando la cota piezométrica de dicha celda está por debajo del lecho del río. En este caso, la velocidad del flujo será proporcional a la diferencia entre el nivel del agua y el fondo del río.

Al igual que en el paquete GHB, la conductancia será el factor que relacione la diferencia entre las cotas y la tasa de flujo.

4.2.3 Recarga por infiltración de la precipitación

La base para la definición de este componente del balance ha sido el modelo Patricial (Pérez-Martín, 2005). Este modelo permite obtener resultados de la recarga de forma distribuida en diferentes puntos del sistema. En este caso, la zona de estudio se ha dividido en diferentes sectores, dentro de los cuales se asume que la recarga es homogénea, por lo que, para cada uno de los mismos, se ha obtenido una recarga media, que una vez introducida al modelo es multiplicada por la superficie de los mismos. La figura 14 muestra la zonificación definida para la recarga.

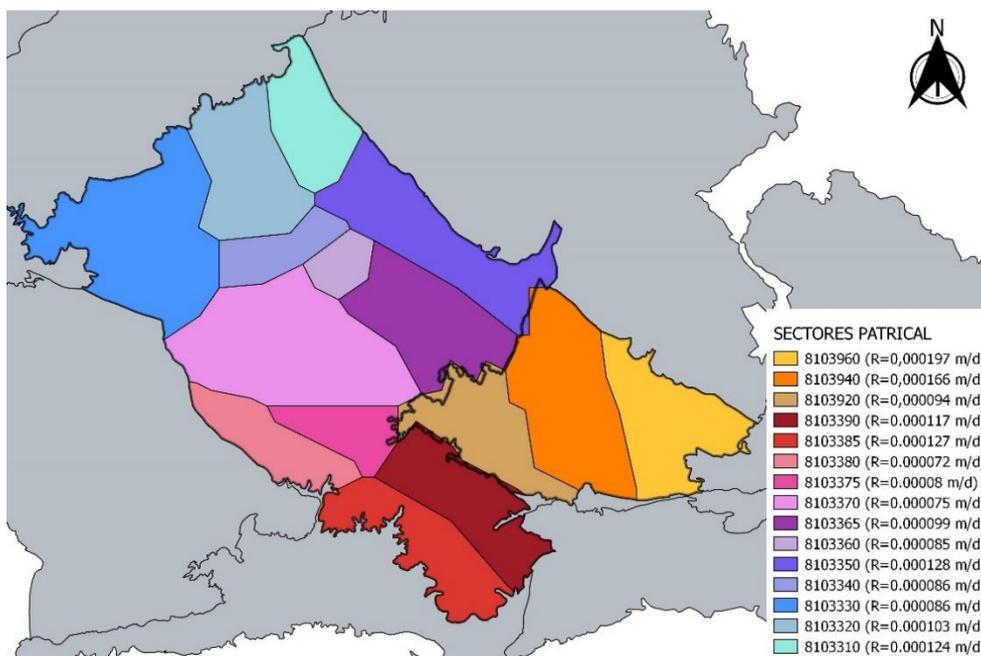


Figura 14. Zonificación de la recarga definida en el modelo. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el sistema completo la evolución de la recarga total en el periodo de estudio es el que se representa en la figura 15. Se aprecia que, en general, este parámetro es variable a lo largo del tiempo estudiado, dependiendo de las condiciones climatológicas de cada año. No obstante, comparando la media de la recarga del periodo no influenciado (1940/41-1979/80) con la media del periodo influenciado (1980/81-2015/16) se aprecia una ligera disminución de la misma. Si la tendencia continuase en la misma línea, éste podría llegar a ser un factor que dificultase la recuperación del sistema de acuíferos.

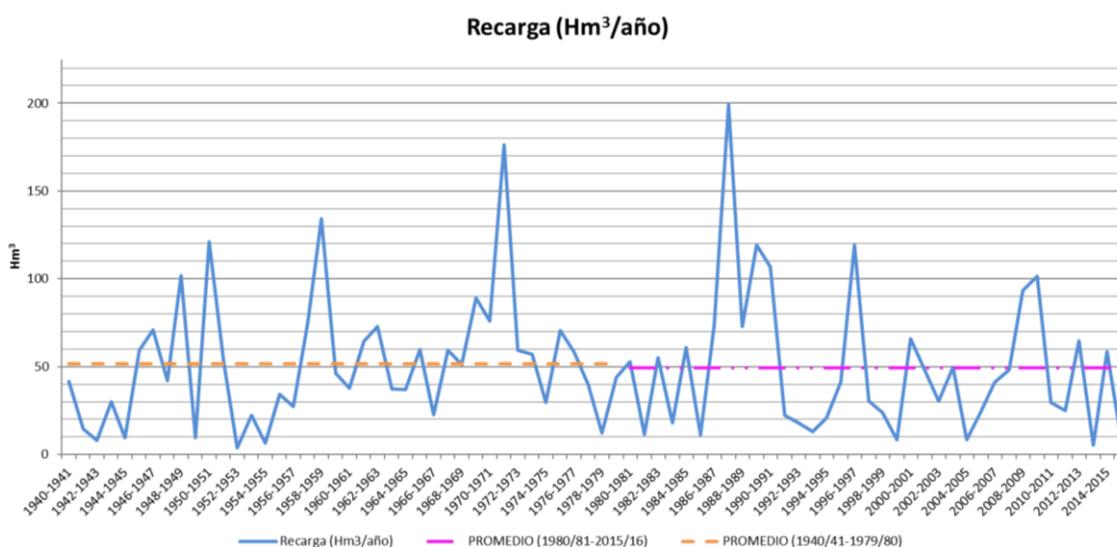


Figura 15. Evolución de la recarga total de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de Patricial (Pérez-Martín, 2005)

Para su implantación se ha utilizado el paquete “*Recharge (RCH)*” de MODFLOW. Este paquete permite al usuario especificar una tasa de recarga en un área. MODFLOW solicita el valor de la tasa de recarga, que lo multiplica por la superficie de cada celda, consiguiendo así la recarga total en cada una de ellas.

RCH precisa los valores de la tasa de recarga para cada paso de tiempo establecido. Es necesario indicar la capa a la que se le aplica la recarga. Las opciones posibles incluyen:

- 1) La capa superior.
- 2) Una capa especificada. Se podrán especificar diferentes capas para los diferentes pasos de tiempo.
- 3) La celda activa superior. En este caso, la recarga podrá moverse a medida que las celdas en la superficie se conviertan entre secas y húmedas.

En este caso, se ha utilizado la tercera opción, es decir, la recarga ha sido aplicada a la celda superior que esté activa.

4.3 Condición inicial

La condición inicial establece el estado del sistema antes de la simulación, es decir, describe las alturas piezométricas de la zona en el tiempo de simulación $t=0$. Se trata de una información esencial e importante que el modelo precisa para su simulación.

En una simulación estacionaria, la definición de dicho estado no condiciona apenas los resultados del modelo. No obstante, en régimen transitorio, el modelo es altamente sensible a la misma. Una condición inicial errónea puede llegar a producir problemas de convergencia, incluso la obtención de resultados no coherentes con la realidad. En general, cuanto más cerca esté de la solución, más rápida será la simulación.

En este modelo, la condición inicial definida en estado estacionario, debido al desconocimiento y falta de datos piezométricos anteriores a 1980, ha sido la topografía del terreno. Después de la calibración del modelo en régimen estacionario, se ha obtenido una piezometría resultante, que ha sido el punto de partida o la condición inicial para la simulación transitoria (ver figura 16).

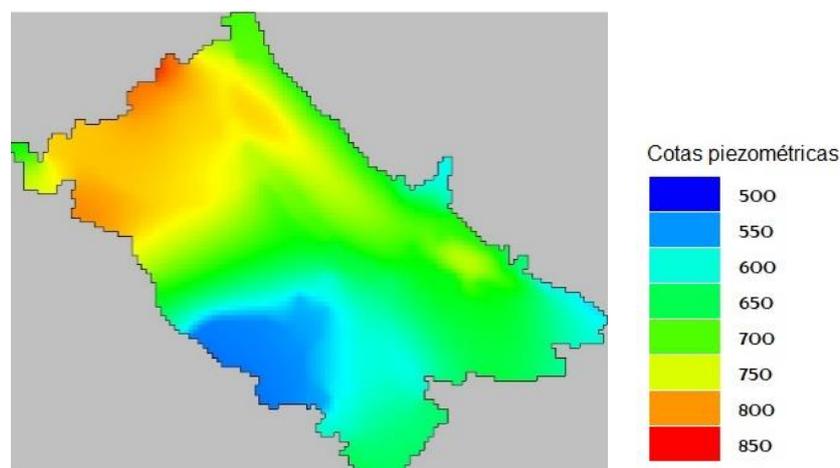


Figura 16. Condición inicial en la simulación transitoria. Fuente: Elaboración propia

4.4 Parámetros hidrogeológicos

El conocimiento de los parámetros hidrogeológicos de la zona y su distribución a lo largo de la misma es necesario para que MODFLOW pueda resolver la ecuación del flujo subterráneo en todas las celdas del modelo y conocer la dirección y magnitud de los flujos.

Para la obtención de unos resultados óptimos, la determinación de dichos parámetros requiere, tanto de un trabajo exhaustivo de campo, como de un análisis bibliográfico. En este caso, no ha sido posible realizar ensayos de campo, ni obtener resultados actualizados de la caracterización de la zona, por lo que se ha optado por un estudio bibliográfico (ver tabla 3).

Tabla 3. Bibliografía de los parámetros hidrogeológicos. Fuente: Elaboración propia con datos de Custodio, E. et al. (1983), Freeze, R.A., et al. (1979).

DOMINIOS	K (m/d)	Ss	Sy
Dominio 1	1-1000	1×10^{-4} - 15×10^{-2}	0,05 - 0,35
Dominio 2	0,1-1000	1×10^{-5} - 6×10^{-2}	0 - 0,2
Dominio 3	0,0001-1	1×10^{-5} - 2×10^{-2}	0 - 0,2
Dominio 4	0,01-100	1×10^{-4} - 5×10^{-2}	0,02 - 0,35
Dominio 5	0,00001-0,1	1×10^{-5} - 1×10^{-2}	0 - 0,1

Con el propósito de simplificar la complejidad del sistema en cuanto a su caracterización hidrogeológica, se ha comenzado por definir regiones con un comportamiento hidrogeológico similar. Para ello, se ha partido de mapas

hidrogeológicos, de permeabilidades y litológicos del sistema. El resultado de dicha zonificación se puede apreciar en la figura 8, que es homogénea para todas las capas.

Teniendo en cuenta la naturaleza de cada acuífero, los parámetros se han adecuado a las condiciones de cada capa. Generalmente, se ha considerado una disminución de los valores de las propiedades hidrogeológicas con la profundidad.

Debido a la incertidumbre general que acompaña a los citados parámetros, generalmente su definición se presenta por intervalos. La determinación de las mismas constituye uno de los principales objetivos del proceso de calibración en la mayoría de los modelos. Es importante e indispensable que, durante su desarrollo, no se pierda el control de los valores asignados, asegurando siempre una coherencia con los rangos bibliográficos.

A medida que se ha avanzado en el proceso de modelación del sistema, los parámetros han sido calibrados con objeto de reproducir las alturas piezométricas observadas.

4.5 Bombeos

Tal y como se ha explicado en el capítulo 2.4, en este modelo se han considerado dos tipos de demandas. Por un lado, las correspondientes a los usos agrícolas, que suponen gran parte de las extracciones del modelo y, por otro lado, las demandas urbanas.

4.5.1 Demanda agrícola

Para la estimación de la demanda agrícola, se ha partido de las UDAs definidas en el PHJ, de las superficies de regadío, la distribución de los cultivos, de las dotaciones netas para cada cultivo, así como de los datos de suministro y extracciones y de las eficiencias de distribución.

En este caso, las dotaciones netas utilizadas, han sido las establecidas en el Plan Hidrológico del ciclo 2009-2015.

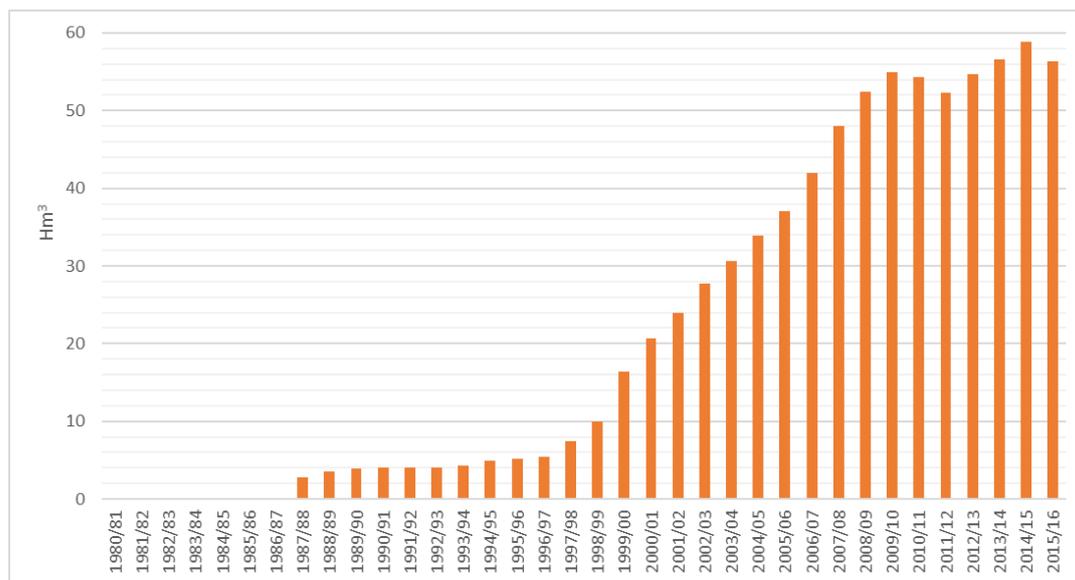


Figura 17. Evolución de las extracciones anuales para riego. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la CHJ

Basándose en la información antes citada, se ha calculado para cada derecho concesional, es más, para cada pozo de bombeo definido en los derechos concesionales, el correspondiente volumen de extracción mensual. La información resultante ha sido facilitada por la CHJ, sin tener en cuenta la fecha de inscripción de las concesiones.

No obstante, debido a la importancia del crecimiento progresivo de las extracciones en las últimas décadas, se ha decidido contemplar en los datos la fecha de inscripción de todos y cada uno de los pozos. Por ello se ha realizado un análisis de todos los derechos concesionales para definir la evolución real de las extracciones para riego (ver figura 17).

Asimismo, ha sido necesario agrupar los bombeos, con objeto de simplificar la introducción a ModelMuse. Para ello, se ha realizado una agrupación por localización, sumando los bombeos ubicados en las mismas celdas de acuerdo con la discretización horizontal definida, consiguiendo así reducir el número de pozos desde 1101 a 753 (ver figura 18).

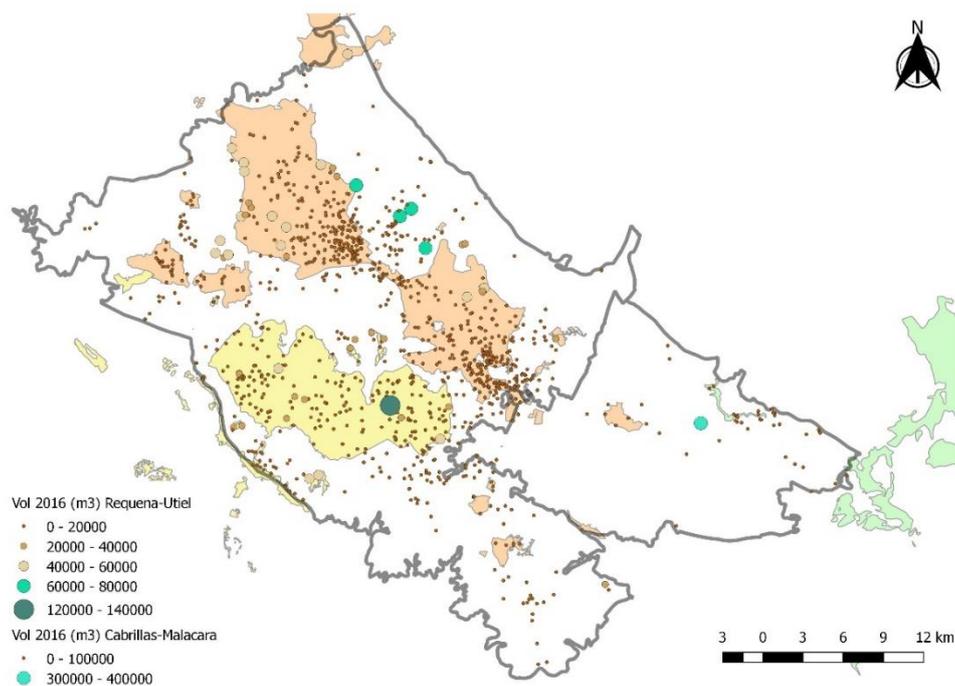


Figura 18. Pozos de bombeo destinados a uso agrícola. Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Demanda urbana

Para la caracterización de la demanda urbana se han tenido en cuenta diversos conceptos. Por un lado, ha sido necesario conocer el volumen anual y la distribución temporal de agua suministrada y agua registrada, así como el volumen de consumo doméstico y su correspondiente distribución temporal.

En este caso, la demanda urbana ha sido estimada a partir de datos obtenidos mediante controles reales y encuestas. Asimismo, ha sido necesario estimar la población total equivalente de cada año.

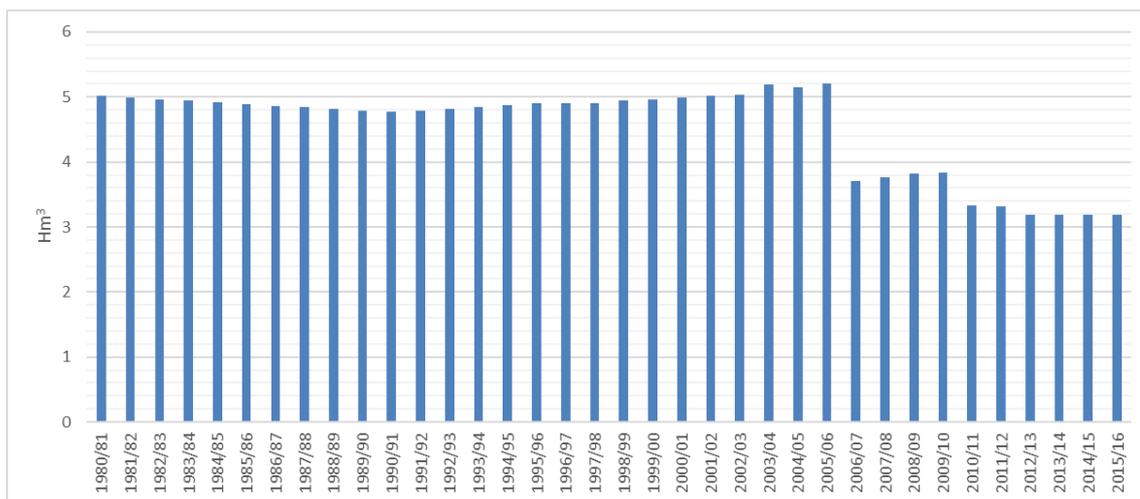


Figura 19. Evolución de las extracciones anuales para uso urbano. Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la CHJ

La CHJ ha facilitado la información sobre la extracción correspondiente a cada pozo. En este caso, no se ha realizado ninguna simplificación por tratarse de 40 pozos de bombeos, correspondientes a diferentes municipios. En la figura 20 se aprecia que los volúmenes de extracción principales se destinan al abastecimiento de los municipios de Utiel y Requena.

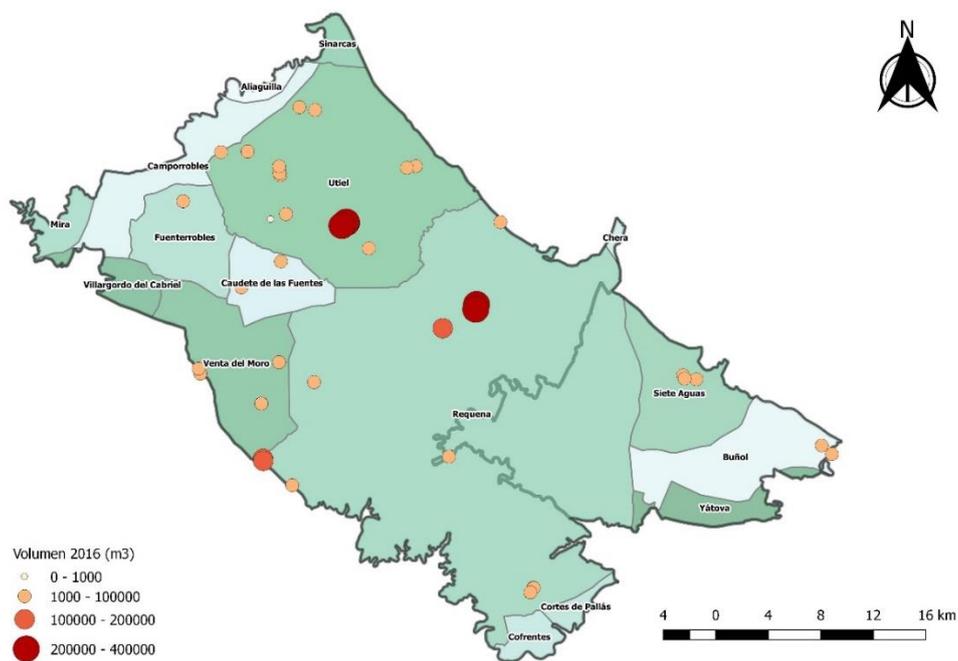


Figura 20. Pozos de bombeo destinados al abastecimiento urbano. Fuente: Elaboración propia

La implementación de los bombeos se ha realizado mediante el paquete “WELL (WEL)” de MODFLOW. Este paquete permite al usuario especificar una tasa volumétrica de extracción (signo negativo) o inyección (signo positivo).

Asimismo, ModelMuse permite que el usuario especifique la forma de interpretar la tasa de bombeo o inyección de acuerdo con las siguientes opciones:

- 1) Calculado: Se trata de una tasa de bombeo o inyección por unidad de longitud o área, por lo que el valor establecido se multiplica por la longitud o área del objeto definido.
- 2) Directo: Se trata de una tasa de bombeo o inyección que se aplica directamente a cada celda que ocupa el objeto.
- 3) Total: Se trata de una tasa de bombeo o inyección total por capa, por lo que se reparte a cada celda proporcionalmente a la longitud del objeto dentro de ellas.

En este caso, se ha utilizado la segunda opción, debido al conocimiento de la serie del volumen bombeado.

5. PROCESO DE CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO

La calibración es un proceso mediante el cual se persigue que el modelo reproduzca los datos de campo disponibles. No obstante, a pesar de los avances obtenidos en el conocimiento de la hidrología, no se ha conseguido un modelo que simule todos los procesos complejos que forman parte del ciclo hidrológico, debido a errores de diferente origen.

Por ello, uno de los principales objetivos de la calibración de los modelos es minimizar dichos errores, que pueden derivar de los datos de origen, de los datos observados, de valores no óptimos de los parámetros, incluso de la estructura del modelo. Todas las fuentes de incertidumbre citadas serán la principal causa de las diferencias resultantes entre el modelo y la realidad. El proceso de calibración únicamente puede disminuir la influencia de las tres primeras. No es posible minimizar los errores derivados de la estructura del modelo.

Actualmente, existen dos formas de conseguir una buena calibración: manual y automática. La calibración manual es un proceso de prueba y error, en el cual los parámetros son modificados, uno a uno, comprobando el efecto resultante. Esta metodología se basa en el criterio del usuario, pero se trata de un método lento y subjetivo. Asimismo, existe la posibilidad de realizar una calibración automática mediante el uso de un sistema de optimización de parámetros. A diferencia del método anterior, consiste en un procedimiento más rápido y objetivo, a pesar de presentar problemas en la compensación de errores y tratarse de un proceso numéricamente complejo. MODFLOW cuenta con el programa ModelMate para su sistema de optimización.

Antes de comenzar el proceso de calibración, es necesario disponer de un modelo conceptual bien definido y consolidado. Además, es imprescindible la elección de parámetros a calibrar en cada paso, con la finalidad de seguir un procedimiento ordenado y funcional.

De la misma forma, es necesario escoger bien el algoritmo que utilizará MODFLOW para encontrar la solución de la ecuación del flujo subterráneo. Entre los distintos métodos, se ha optado por utilizar *PCGN (Preconditioned Conjugate Gradient Solver*

with Improved Nonlinear Control). Algunos de los parámetros importantes definidos en dicho algoritmo se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros utilizados para la solución. Fuente: Elaboración propia

PARÁMETRO	VALOR
Número máximo de iteraciones externas	100
Número máximo de iteraciones internas	100
Criterio de convergencia según la diferencia de alturas	0,05
Criterio de convergencia según el error residual	0,005

Para comenzar se ha calibrado el régimen estacionario o no influenciado (1940/41-1979/80). Para ello, no se han considerado las presiones o bombeos existentes en la zona. Acto seguido, a partir de los resultados obtenidos, e incluyendo en este paso los bombeos existentes en la zona, se ha realizado la calibración del modelo en régimen transitorio (1980/81-2015/16).

Se trata de un proceso completamente iterativo. Siempre y cuando se haya modificado algún parámetro en régimen transitorio o influenciado, se ha comprobado la funcionalidad correcta del modelo en régimen no influenciado. En caso de que los parámetros no reprodujeran bien las salidas, se ha recalibrado el régimen estacionario y así sucesivamente, consiguiendo así un modelo con un correcto funcionamiento a lo largo de todo el periodo de estudio.

5.1 Calibración del modelo en régimen no influenciado

El proceso de calibración del modelo en régimen no influenciado ha consistido en la reproducción correcta de los flujos conocidos de entrada y salida del sistema. La magnitud de dichos flujos se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Flujos conocidos del sistema. Fuente: Elaboración propia

ENTRADAS AL SISTEMA	Volumen de entrada (hm ³ /año)	SALIDAS DEL SISTEMA	Volumen de salida (hm ³ /año)
- Recarga por infiltración de la precipitación	55	- Perdidas al cauce	26,42
- Entradas desde Mira	10,16	- Salidas a Buñol-Cheste	3
		- Salidas a Hoces de Cabriel	1,26

Para el desarrollo de esta fase se ha aplicado la metodología de prueba y error, analizando siempre la influencia que la variación de cada parámetro tiene en el funcionamiento del sistema.

5.1.1 Calibración de las condiciones de contorno. Límites laterales

La casuística de tipo de flujos existentes entre el sistema y las masas de agua subterránea adyacentes es variable. Las conclusiones obtenidas y decisiones tomadas después del estudio de la información de base se presentan a continuación:

- Flujo de entrada de 10 hm³/año desde la masa de agua subterránea Mira.
- Flujo de salida de 3 hm³/año hacia la masa de agua subterránea Buñol-Cheste.
- Flujo de salida de 1,26 hm³/año hacia la masa de agua subterránea Hoces de Cabriel.
- El límite entre el sistema y la masa de agua subterránea Las Serranías es permeable. No obstante, se trata de un límite con carácter dinámico y que sufre constantes fluctuaciones. Por lo tanto, los flujos de entrada o salida dependerán de la piezometría.
- El resto de los límites son impermeables.

La calibración de las citadas condiciones se ha basado en una correcta reproducción de los flujos indicados. Para ello, cada límite se ha definido con una altura piezométrica razonable, teniendo en cuenta los datos piezométricos de la zona, y se ha calibrado la conductancia de los materiales hasta obtener la reproducción de los mismos.

En el caso del contorno Las Serranías, se ha definido una altura piezométrica coherente, y se ha calibrado la conductancia con intención de conseguir una piezometría lógica y un flujo razonable en esa zona.

Para conocer los resultados individualizados de los balances, se ha utilizado el programa “*Zone Budget*”. Se trata de un programa complementario a MODFLOW que está desarrollado también por el USGS y permite conocer los balances de agua en diferentes zonas del modelo definidas por el usuario.

5.1.2 Calibración de las propiedades físicas de los cauces

Con el propósito de calibrar la conductancia de los materiales del fondo del río para simular los flujos estimados, el río Magro se ha dividido en dos tramos.

Tabla 6. Flujos estimados para diferentes tramos del río. Fuente: Elaboración propia

Tramo	Flujo desde el acuífero (hm ³ /año)
Cabecera – Estación de aforos Requena	21,46
Estación de aforos Requena – Final	4,96
Cauce Romeroso	12,12
TOTAL	26,42

En la tabla 6, se presentan los tramos considerados con sus correspondientes flujos. Para su determinación se han calculado los aforos diferenciales entre las estaciones de Requena y el embalse de Forata para el año hidrológico 1974/75. Los caudales específicos resultantes han sido aplicados al resto de los tramos.

En el caso del cauce Romeroso, se ha optado por una conductancia que permitiese solventar problemas de inundación de celdas que se producían en la zona, junto con la reproducción aproximada de las alturas piezométricas.

Para la calibración de los diferentes tramos, se ha activado el paquete “*Zone Budget*”. Cada tramo ha sido considerado como una zona independiente con su correspondiente balance.

5.2 Análisis de los resultados del modelo en régimen no influenciado

El periodo de tiempo considerado para el régimen no influenciado ha sido la serie de los años hidrológicos 1940/41-1979/80. Los valores de los datos de entrada de los elementos del balance se corresponden con los valores medios del periodo estacionario.

5.2.1 Balance del sistema

En la tabla 7 se presenta el balance que se ha obtenido para la simulación estacionaria. Comparando los resultados con los valores indicados en la tabla 5, se concluye que se ha conseguido una aproximación buena de los flujos definidos en la conceptualización del modelo.

Tabla 7. Balance de la masa de agua para el periodo 1940/41-1979/80, régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia

Balance resultante. Periodo 1940/41-1979/80 (hm ³ /año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Infiltración de la lluvia	55,68			$\Delta S_{\text{recarga}} = 55,68$
Entradas desde Mira	10,43	Salidas hacia Mira	5,58	$\Delta S_{\text{Mira}} = 4,85$

Balance resultante. Periodo 1940/41-1979/80 (hm³/año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Entradas desde Las Serranías	0	Salidas hacia Las Serranías	14,43	$\Delta S_{Serranías} = -14,43$
Entradas desde Buñol-Cheste	0	Salidas hacia Buñol-Cheste	3,00	$\Delta S_{Buñol-Cheste} = -3,00$
Entradas desde Hoces de Cabriel	0,003	Salidas hacia Hoces de Cabriel	1,32	$\Delta S_{HocesDeCabriel} = -1,32$
Entradas desde el río Magro	1,82	Drenaje hacia el río Magro	25,87	$\Delta S_{Magro} = -24,05$
Entradas desde el cauce Romeroso	0	Drenaje hacia el cauce Romeroso	18,08	$\Delta S_{Romeroso} = -18,08$
Total	67,93	Total	68,28	$\Delta S_{total} = -0,35$

De acuerdo con los resultados obtenidos, el sistema presenta un cambio del almacenamiento casi nulo. Se trata de una situación en el que la magnitud de los flujos de entrada es, prácticamente, igual a la de los flujos de salida, sin que se aprecien modificaciones en la situación del sistema.

En cuanto al balance individualizado de las capas establecidas en el modelo y la interacción entre las mismas, en la figura 21 se puede apreciar un esquema que resume los resultados obtenidos.

El intercambio del flujo entre las capas se produce primordialmente desde la capa intermedia hacia la capa superior. Asimismo, existe un flujo, muy inferior cuantitativamente, desde la capa intermedia hacia la capa inferior.

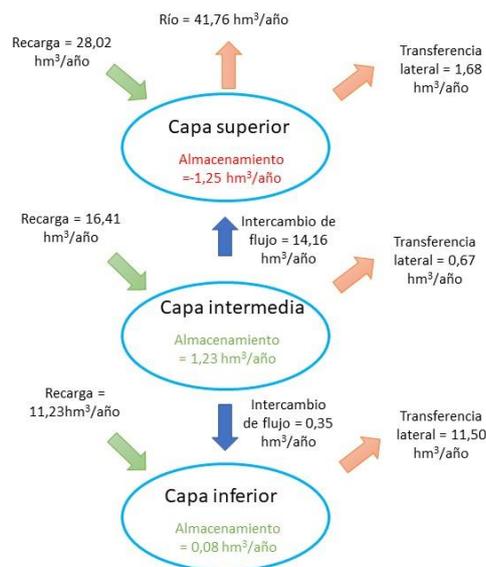


Figura 21. Esquema del balance de flujos resultante en el sistema en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las interacciones entre el sistema y el exterior, se podría señalar que el mayor volumen de salida hacia las masas de agua subterráneas adyacentes se produce desde el acuífero confinado. Igualmente, cabe mencionar que la recarga por infiltración de la precipitación se produce a través de las tres capas, debido a la condición impuesta en la implementación de la misma.

De acuerdo con los balances de la figura 21, en el acuífero superior el cambio del almacenamiento es negativo. La magnitud de los flujos que la capa deriva al exterior, sobre todo al río Magro, es superior al del flujo recibe por la infiltración de la precipitación. A pesar de ello, todo el sistema se encuentra en equilibrio.

5.2.2 Interacción entre el río y el acuífero

Un análisis detallado de la relación entre el río y el sistema de acuíferos proporciona una idea de la magnitud de los flujos de transferencia existentes a lo largo de los diferentes tramos del río. El conocimiento de dichos flujos facilitará comprender la causa de la disminución de los niveles del embalse de Forata.

El análisis se ha basado en estudiar con detalle la relación entre ambos componentes para cada tramo establecido en la tabla 6. Comparando los resultados obtenidos y los estimados inicialmente, se aprecia una discrepancia notable. No obstante, considerando que el análisis foronómico realizado se trata de un cálculo elaborado únicamente con

objeto de conocer la magnitud de los posibles flujos ante la ausencia de datos, se ha considerado que los resultados obtenidos son aceptables.

Tabla 8. Relación río-acuífero para el periodo 1940/41-1979/80, régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia

Relación río-acuífero. Periodo 1940/41-1979/80 (hm ³ /año)				
Tramo	Acuífero-río	Río-Acuífero	Almacenamiento	Caracterización río
Cabecera – Estación de aforos Requena	15,97	1,59	-14,38	Ganador
Estación de aforos Requena – Final	9,53	0,22	-9,30	Ganador
Romeroso	18,08	0	-18,08	Ganador
Total	-43,58	1,82	-41,76	Ganador

Con los resultados obtenidos del balance en cada tramo, se confirma que el río Magro, así como el cauce Romeroso son ganadores a lo largo de toda su longitud. El flujo que el río Magro aporta al sistema de acuíferos en diferentes puntos se puede considerar despreciable frente al volumen que el sistema drena hacia el río.

5.2.3 Análisis piezométrico

Una de las finalidades de la simulación estacionaria ha sido obtener la condición inicial para la simulación transitoria, así como conocer la dirección del flujo y el funcionamiento del sistema en régimen natural.

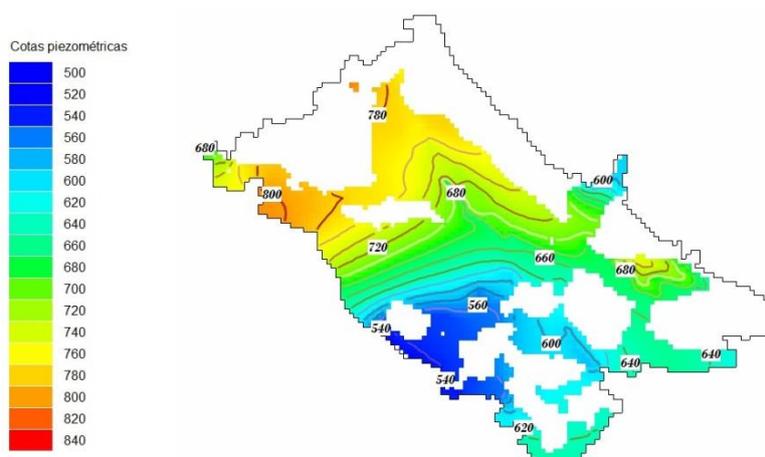


Figura 22. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa superior. Fuente: Elaboración propia

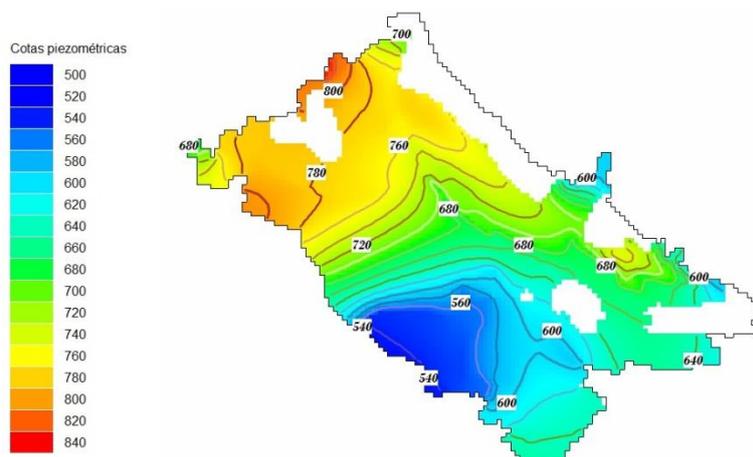


Figura 23. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa intermedia. Fuente: Elaboración propia

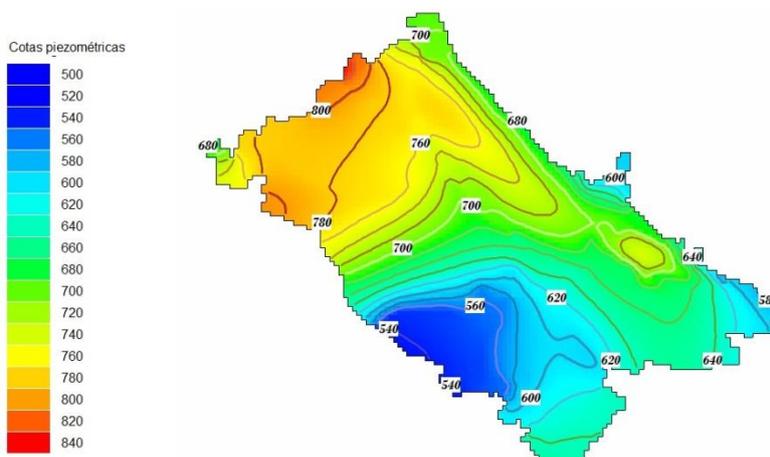


Figura 24. Alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria para la capa inferior. Fuente: Elaboración propia

En la figura 22, figura 23 y figura 24 se muestran las alturas piezométricas resultantes para las diferentes capas definidas en el modelo. Las zonas blancas caracterizan las celdas secas. En los mapas representados se observa que gran parte de la capa superior, e incluso una parte de la capa intermedia se seca debido a las interacciones entre los diferentes elementos del balance.

Se puede apreciar que existe un flujo marcado de norte a sur, principalmente condicionado por la topografía de la zona. Las alturas piezométricas oscilan entre los 538,24 y 833,22 m.s.n.m. Si se observan las figuras detalladamente, sobre todo el mapa piezométrico del acuífero superior, se percibe la influencia que el río tiene en la piezometría del sistema, haciendo que las isopiezas representen la caracterización del mismo.

5.2.4 Análisis de la bondad de ajuste del modelo

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo elaborado se ha realizado un análisis de diferentes funciones objetivo, teniendo en cuenta seis piezómetros de la zona de estudio (ver figura 25).

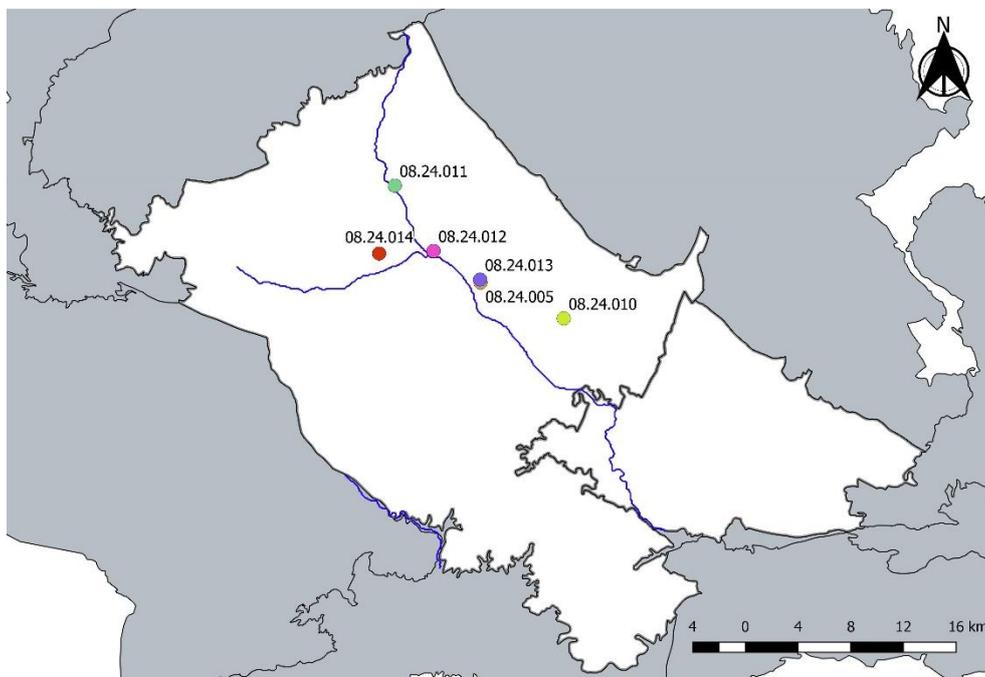


Figura 25. Piezómetros de observación utilizados en la simulación estacionaria. Fuente: Elaboración propia

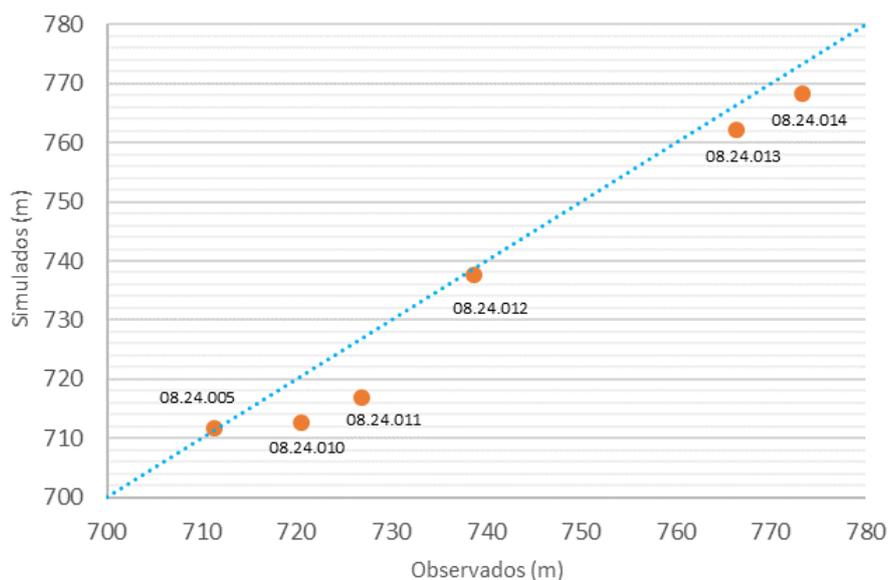


Figura 26. Análisis estadístico de los valores simulados frente a los observados. Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la figura 26, expresa la dependencia lineal entre los valores de alturas piezométricas simuladas y las observadas, ilustrando el grado con el que las alturas

simuladas se distribuyen sobre la recta de ajuste perfecto. Generalmente, se aprecia que los valores simulados no se alejan excesivamente de los datos observados. El máximo residuo es, aproximadamente, de 9 metros y se da en el piezómetro 08.24.011.

Además, se han analizado indicadores estadísticos adicionales que ayudan a evaluar la capacidad predictiva de las simulaciones realizadas:

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE). Este índice permite estimar la desviación de los valores calculados frente a los observados. Toma valores desde 0 (perfecto ajuste) hasta el infinito. Las mayores diferencias entre los valores simulados y observados toman más importancia en el estadístico.
- Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE). Este indicador refleja la proporción de la varianza de los datos observados que es representada por los resultados del modelo. Es representado como porcentaje y permite valorar la capacidad predictiva del modelo.
- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E). Este es uno de los criterios que se emplea en la calibración de los modelos hidrológicos. Representa el porcentaje o cantidad de la variabilidad de las observaciones que se reproduce a través de los valores simulados. Un índice Nash igual a la unidad se corresponde con una simulación perfecta.
- Coeficiente de determinación (r^2). Se trata del cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Presenta la variación de los datos observados respecto a su media que es reproducida por el modelo. Puede tomar valores de 0 a 1, indicando este último un ajuste perfecto, esto es, la variación total de los valores observados es explicada por el modelo.

En la siguiente tabla se resumen las funciones objetivo utilizadas y los resultados obtenidos para cada una de ellas. Del análisis de los mismos se concluye que se ha obtenido una buena calibración de los parámetros y, por consiguiente, un modelo que reproduce una situación muy próxima a la realidad en gran parte de la superficie.

Tabla 9. Análisis de bondad de ajuste del modelo en régimen no influenciado. Fuente: Elaboración propia

Función objetivo	Fórmula	Valores de referencia	Resultado
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$	0 Perfecto	5,819

Función objetivo	Fórmula	Valores de referencia	Resultado
NRMSE	$\text{NRMSE} = 100 \times \frac{1}{h_{\text{obs}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{\text{sim},i} - h_{\text{obs},i})^2}{n}}$	< 10% Excelente 10-20% Bueno 20-30% Aceptable >30% Pobre	0,79
Criterio de Nash-Sutcliffe	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_{\text{sim},i} - h_{\text{obs},i})^2}{\sum_{i=1}^n (h_{\text{obs},i} - \bar{h}_{\text{obs}})^2}$	<0,2 Insuficiente 0,2-0,4 Satisfactorio 0,4-0,6 Bueno 0,6-0,8 Muy bueno >0,8 Excelente	0,936
Coefficiente de determinación	$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (h_{\text{obs},i} - \bar{h}_{\text{obs}}) \times (h_{\text{sim},i} - \bar{h}_{\text{sim}})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (h_{\text{obs},i} - \bar{h}_{\text{obs}})^2) \times (\sum_{i=1}^n (h_{\text{sim},i} - \bar{h}_{\text{sim}})^2)}} \right)^2$	1 Perfecto	0,979

Durante el desarrollo de la fase de calibración se han cuestionado varias de las decisiones tomadas en la conceptualización del modelo, que han derivado en reflexiones más profundas sobre algunas de las mismas. No obstante, al culminar el proceso se puede concluir que dichas decisiones, físicamente justificadas, han posibilitado la obtención de una buena calibración del modelo.

5.3 Calibración del modelo en régimen influenciado

El proceso de calibración del modelo en régimen influenciado o transitorio ha consistido en la reproducción correcta de las alturas piezométricas. Se trata de aquel estado del sistema en el que los bombeos de agua subterránea cobran importancia. Para ello, como punto de partida, se han utilizado las alturas piezométricas resultantes de la simulación estacionaria. En la tabla 10 se presentan los componentes que forman parte del balance en el estado transitorio. Los bombeos, en este caso, constituyen una de las principales fuentes de descarga del sistema.

Tabla 10. Componentes principales del balance del sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

ENTRADAS AL SISTEMA	SALIDAS DEL SISTEMA
- Recarga por infiltración de la precipitación	- Presiones: Bombeos
- Transferencias laterales entre las masas de agua adyacentes	- Transferencias laterales entre las masas de agua adyacentes
	- Pérdidas a los ríos

En el desarrollo del proceso de calibración de los parámetros que se describen a continuación, se ha aplicado la metodología de prueba y error, analizando siempre la influencia que la variación de cada parámetro produce en el funcionamiento del sistema.

5.3.1 Calibración de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas

Los parámetros hidrogeológicos utilizados en la simulación del régimen estacionario han sido valores bibliográficos. No obstante, en régimen transitorio, se ha procedido a su calibración con la finalidad de obtener la reproducción de los datos piezométricos observados dentro del sistema. Desde el comienzo, se ha establecido una isotropía horizontal y una anisotropía vertical de 100 para la conductividad hidráulica.

Dentro de cada dominio, se han determinado diferentes subdominios, que se indican con numeración de 1 a 25 en la figura 27. En la tabla 11 se muestran los valores de los resultados obtenidos después del proceso de calibración tanto para la conductividad hidráulica, como para el coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico.

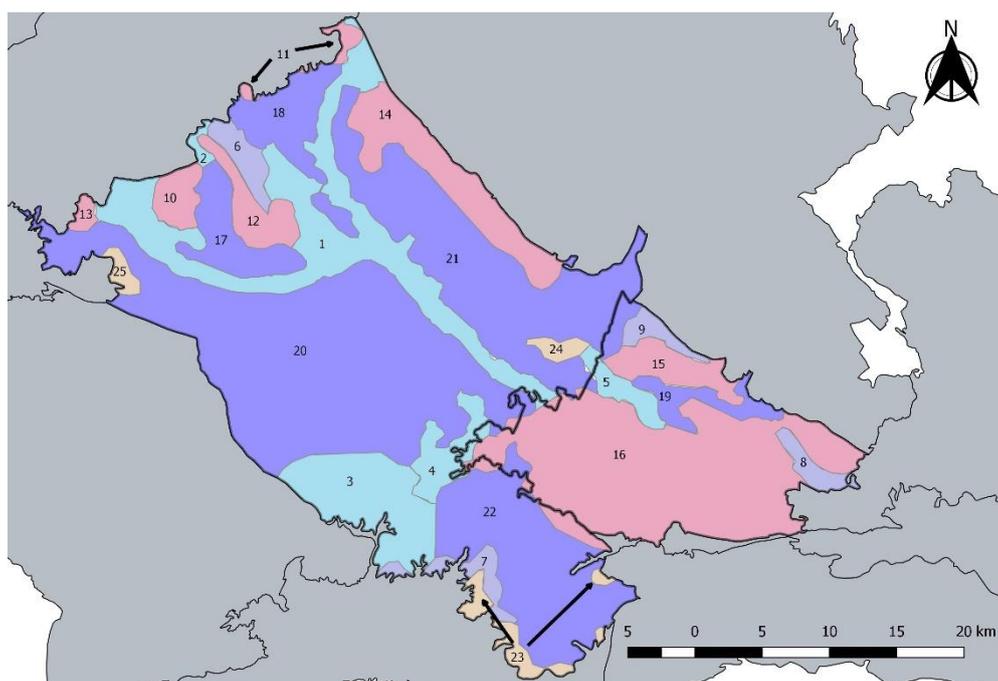


Figura 27. Subdominios definidos en el proceso de calibración de los parámetros hidrogeológicos. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Parámetros hidrogeológicos finales. Fuente: Elaboración propia

Dominios	Subdominios	Kx (m/d)			Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss			Sy
		Capa sup	Capa med	Capa inf	Todas las capas	Todas las capas	Capa sup	Capa med	Capa inf	Todas las capas
1	1	7.3	7.3	7	Kx	Kx/10	0,01	0,01	0,0001	0,3
	2	10	10	8	Kx	Kx/10	0,01	0,01	0,0001	0,3

Dominios	Subdominios	Kx (m/d)			Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss			Sy
		Capa sup	Capa med	Capa inf	Todas las capas	Todas las capas	Capa sup	Capa med	Capa inf	Todas las capas
	3	10	10	8	Kx	Kx/10	0,01	0,01	0,0001	0,3
	4	9	9	8	Kx	Kx/10	0,01	0,01	0,0001	0,3
	5	6	6	4	Kx	Kx/10	0,01	0,01	0,0001	0,3
2	6	6	6	4	Kx	Kx/10	0,02	0,02	0,0005	0,2
	7	4	4	3	Kx	Kx/10	0,02	0,02	0,0005	0,2
	8	2	1	0,8	Kx	Kx/10	0,02	0,02	0,0005	0,2
	9	2	1	0,8	Kx	Kx/10	0,02	0,02	0,0005	0,2
3	10	5	5	3	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	11	3	3	2	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	12	5	5	4	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	13	4	4	3	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	14	0,1	0,1	0,09	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	15	0,05	0,05	0,03	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
	16	0,7	0,7	0,6	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,15
4	17	5	5	4	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
	18	0,3	0,3	0,2	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
	19	0,02	0,02	0,009	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
	20	0,14	0,14	0,13	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
	21	0,06	0,06	0,05	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
	22	0,5	0,5	0,4	Kx	Kx/10	0,05	0,05	0,0001	0,2
5	23	0,1	0,1	0,08	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,1
	24	0,1	0,08	0,06	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,1
	25	0,1	0,1	0,08	Kx	Kx/10	0,01	0,01	1x10 ⁻⁵	0,1

5.3.2 Calibración de las condiciones de contorno

En régimen no influenciado, se han calibrado las conductancias de los materiales de los contornos con el propósito de reproducir los flujos establecidos en el modelo conceptual. En este caso, el objetivo inicial era imponer series de alturas piezométricas registradas en piezómetros exteriores cercanos a los contornos. Sin embargo, debido a la ausencia de los mismos, incluso a la poca cantidad de datos disponibles en los posibles piezómetros, no ha sido factible calibrar los contornos con una serie de alturas variable.

Por lo tanto, en general, se han mantenido las alturas piezométricas establecidas en el modelo no influenciado. En algunos casos, se han realizado pequeños ajustes con el propósito de conseguir una reproducción más precisa de los valores observados. Los flujos resultantes de entrada y salida a través de estos límites han sido de orden de magnitud similar a los establecidos en la conceptualización del modelo.

5.4 Análisis de los resultados del modelo en régimen influenciado

El periodo de tiempo considerado para el régimen influenciado ha sido la serie desde el año hidrológico 1980/81 hasta 2015/16. El paso de tiempo establecido en la simulación ha sido el mes, por lo que, para los datos de entrada, se ha elaborado una serie de valores mensuales para todo el periodo de estudio.

5.4.1 Balance del sistema

En la tabla 12 se presenta el balance medio resultante del periodo 1980/81-2015/16.

Tabla 12. Balance medio de la masa de agua para el periodo 1980/81-2015/16, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

Balance medio. Periodo 1980/81-2015/16 (hm³/año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Infiltración de la lluvia	53,39			$\Delta S_{\text{recarga}} = 53,39$
Entradas desde Mira	10,47	Salidas hacia Mira	6,48	$\Delta S_{\text{Mira}} = 3,99$
Entradas desde Las Serranías	0	Salidas hacia Las Serranías	14,99	$\Delta S_{\text{Serranías}} = -14,99$
Entradas desde Buñol-Cheste	0	Salidas hacia Buñol-Cheste	3,01	$\Delta S_{\text{Buñol-Cheste}} = -3,01$
Entradas desde Hoces de Cabriel	0,005	Salidas hacia Hoces de Cabriel	1,32	$\Delta S_{\text{HocesDeCabriel}} = -1,31$
Entradas desde el río Magro	1,89	Drenaje hacia el río Magro	24,97	$\Delta S_{\text{Magro}} = -23,08$
Entradas desde el cauce Romeroso	0	Drenaje hacia el cauce Romeroso	18,06	$\Delta S_{\text{Romeroso}} = -18,06$
		Bombeos	15,61	$\Delta S_{\text{Bombeos}} = -15,61$
Total	65,76	Total	84,44	$\Delta S_{\text{total}} = -18,68$

Comparando los resultados obtenidos con el balance de la simulación estacionaria, se observa que el volumen medio de la recarga por infiltración de la lluvia ha disminuido ligeramente en este periodo y se han considerado unos bombeos que provocan el aumento notable de los flujos de descarga. Por ello, el balance medio del modelo transitorio presenta un cambio del almacenamiento negativo, constituyendo un desequilibrio desfavorable para el sistema. Los acuíferos pierden un volumen medio anual de aproximadamente 18-19 hm³.

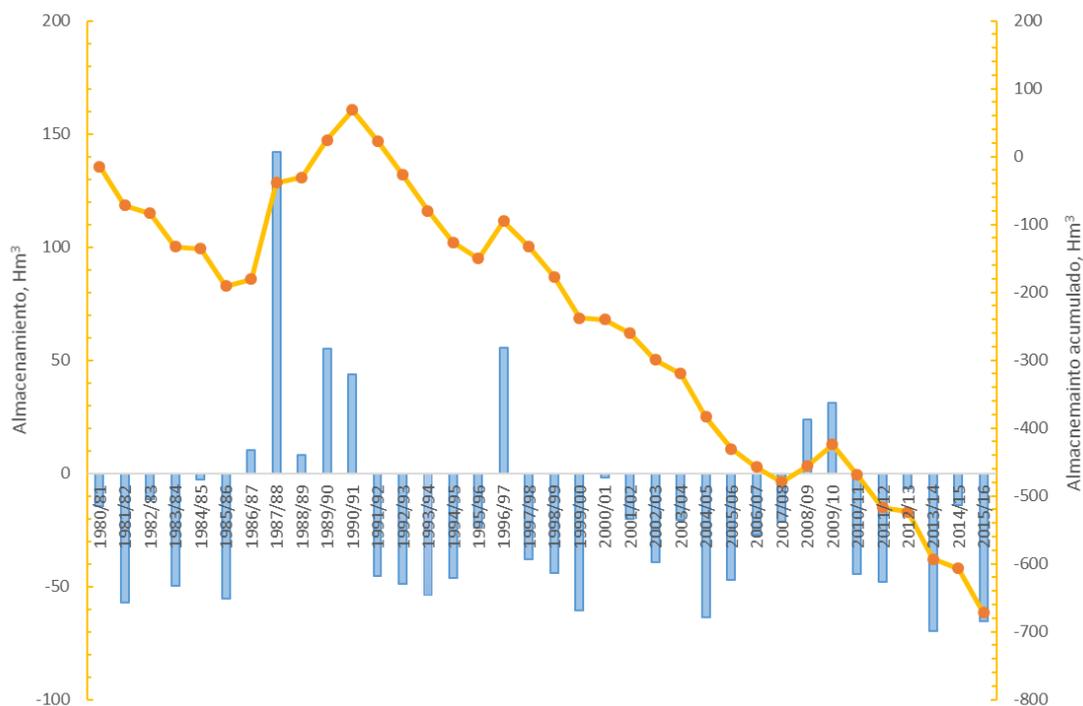


Figura 28. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en periodo transitorio. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la figura 28 muestra la evolución temporal del almacenamiento a lo largo del periodo analizado y el almacenamiento acumulado resultante. Se observa la tendencia al vaciado del acuífero. No obstante, se aprecia la presencia de años hidrológicos en los cuales la recarga toma valores muy superiores a la media, provocando un cambio del almacenamiento positivo y, por consiguiente, el llenado del acuífero. De la gráfica de la figura 29, se confirma que la evolución del volumen almacenado depende, en gran medida, de la evolución de la recarga.

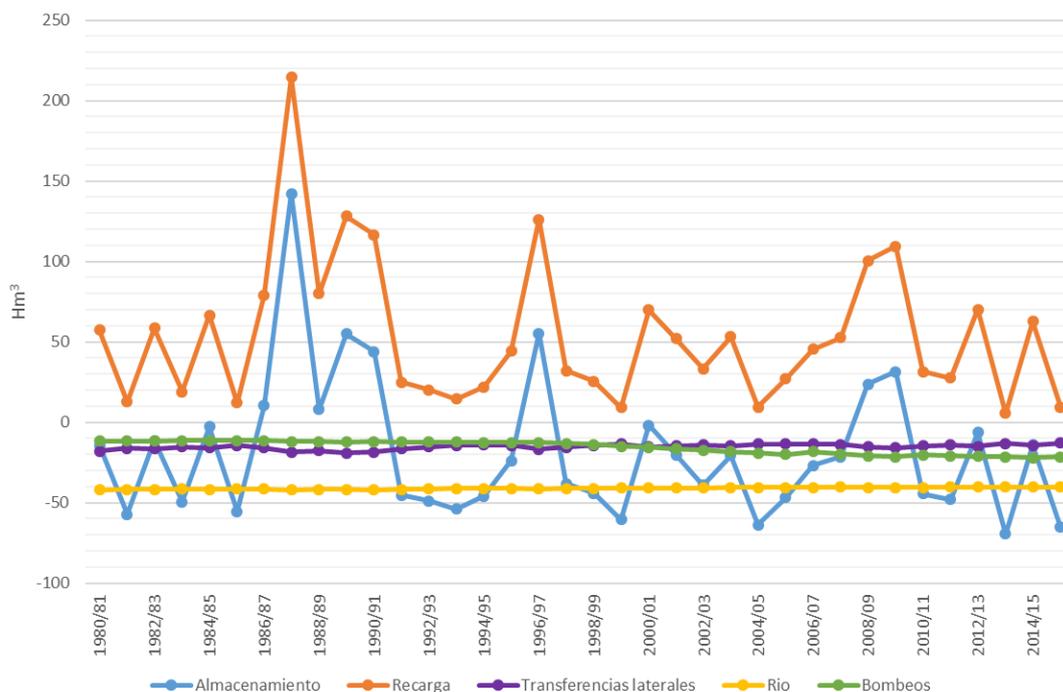


Figura 29. Evolución temporal de los componentes del balance en régimen influenciado, periodo 1980/81-2015/16. Fuente: Elaboración propia

Los bombeos presentan un crecimiento casi continuo a partir del año 2000 y las transferencias laterales, así como los flujos que el sistema aporta al río se mantienen casi constantes para todo el periodo analizado.

Multiplicando el almacenamiento resultante del balance medio de la tabla 12 por los 36 años analizados, el volumen total perdido por el acuífero a lo largo de dicho periodo sería de 672,48 hm³, que coincide con el valor final de almacenamiento acumulado representado en la gráfica de la figura 28.

En cuanto al balance individualizado de las capas establecidas en el modelo y la interacción entre las mismas, en la figura 30 se puede apreciar un esquema que resume los resultados obtenidos.

Al igual que en régimen no influenciado, el intercambio del flujo entre las capas se produce primordialmente desde la capa intermedia hacia la capa superior. En este caso, destaca un incremento de dicho flujo, que se puede atribuir a una mayor explotación de los recursos de la capa superior. Asimismo, el flujo interior que alimenta la capa inferior cobra importancia, lo que puede suponer que en el acuífero confinado (inferior) las alturas piezométricas están descendiendo debido al incremento progresivo de las extracciones.

En consecuencia, todas las capas se encuentran afectadas por la evolución de las presiones sobre el sistema. El acuífero intermedio y el inferior pasan de estar en equilibrio a perder un volumen de agua considerable, lo que significa que, en régimen transitorio, no reciben suficiente recurso como para compensar las extracciones que se producen. Esta situación se produce, generalmente, como resultado de una presión continua sobre el sistema.

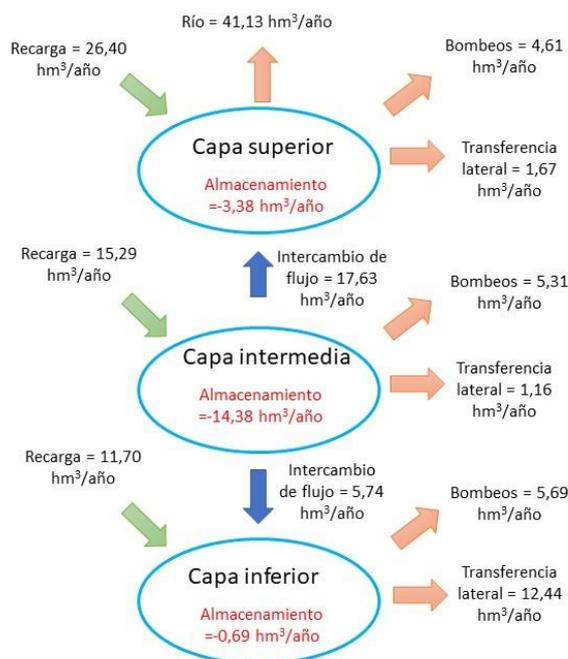


Figura 30. Esquema del balance de flujos resultante en el sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

Analizando la evolución de los componentes del balance en cada capa, se obtienen los resultados representados en la figura 31, figura 32 y figura 33.

De acuerdo con la figura 31, se puede apreciar que, tal y como se mencionaba en el balance del sistema completo, la evolución del almacenamiento en la capa superior está completamente influenciado por la recarga. Asimismo, se reafirma que los bombeos aumentan a partir del año 2000, observando claras diferencias entre los valores en los meses de mayo a septiembre, que coinciden con los meses de regadío, y el resto del año.

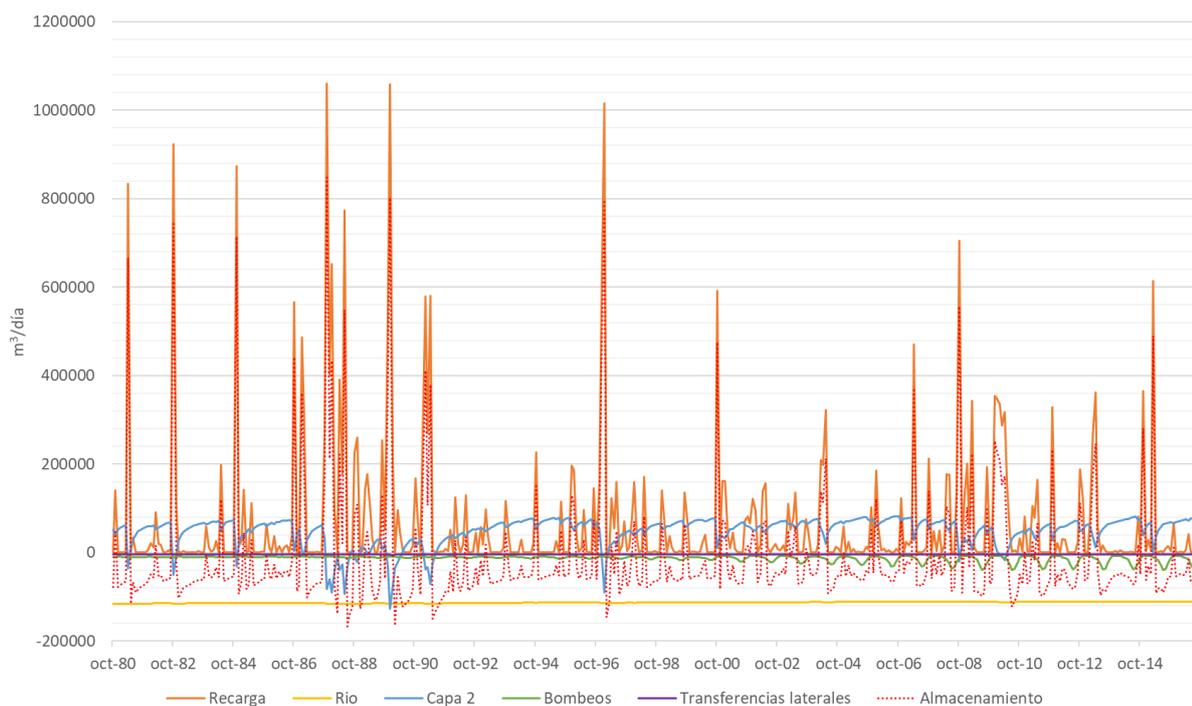


Figura 31. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa superior, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la interacción con la capa intermedia, en los meses en los que la recarga es muy superior a la media y coincidiendo con los meses de poca presión, se aprecia que el acuífero superior cede sus recursos al acuífero intermedio. No obstante, en la mayor parte del periodo estudiado, el acuífero superior es alimentado de los recursos provenientes de la capa intermedia.

En el caso del acuífero intermedio (ver figura 32), se obtienen las mismas conclusiones en cuanto al almacenamiento, bombeos y transferencias laterales. Respecto a la interacción entre la capa intermedia y la inferior, se observa que, cuando la recarga toma valores muy superiores a la media y coincidiendo con los meses de poca presión, existe un flujo desde el acuífero confinado que alimenta al intermedio. No obstante, en la práctica totalidad del periodo analizado, la situación es a la inversa.

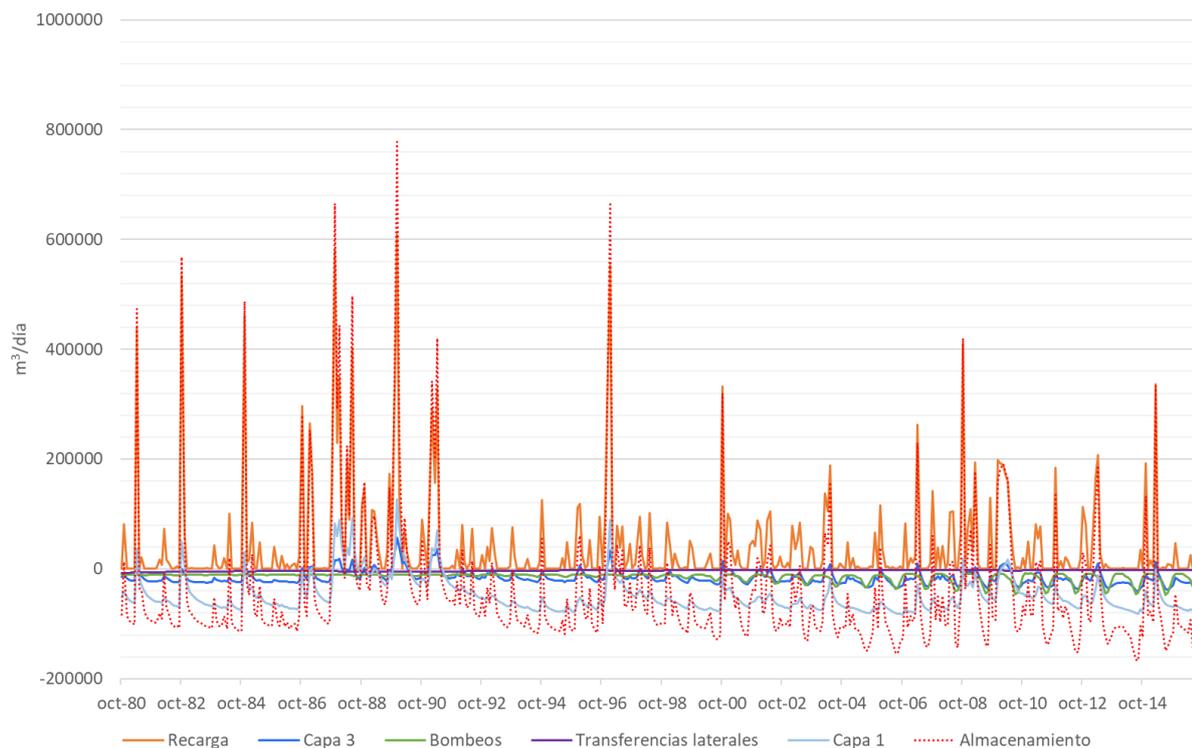


Figura 32. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa intermedia, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

Lo mismo ocurre con el acuífero confinado (ver figura 33).

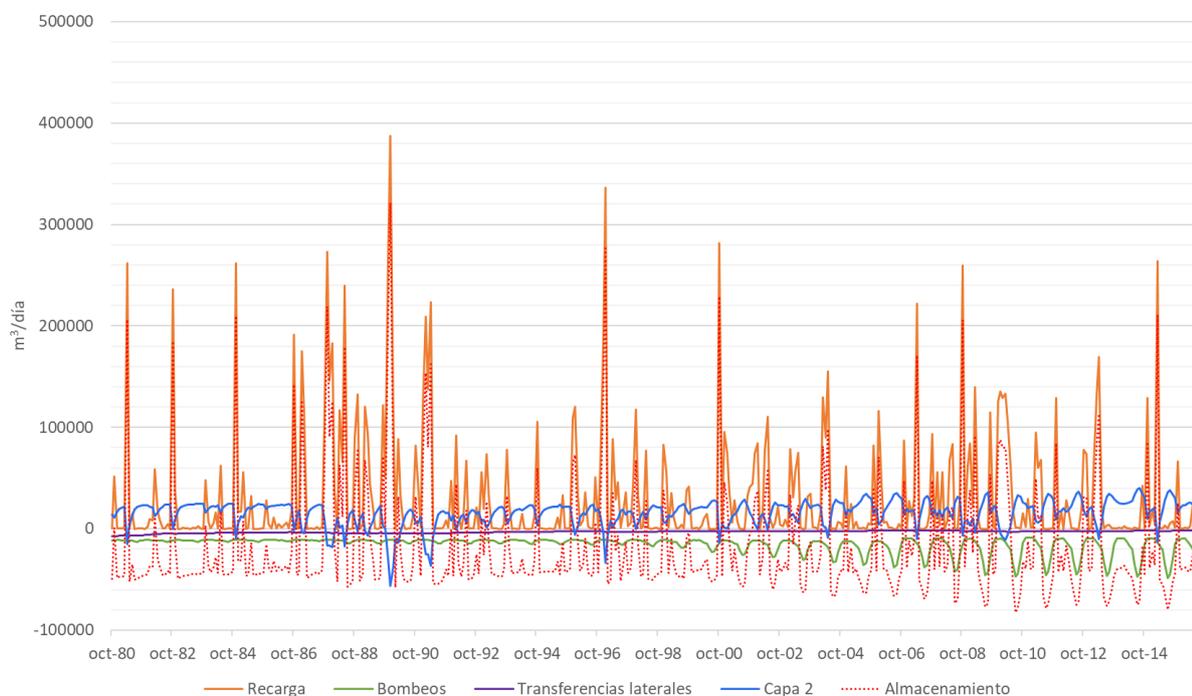


Figura 33. Evolución temporal de los componentes del balance en la capa inferior, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

En resumen, la evolución de la variación del almacenamiento en las tres capas presenta una tendencia al vaciado del sistema, que se debe principalmente al crecimiento progresivo del volumen de extracción, sobre todo a partir del año 2000. Asimismo, la recarga media sufre una ligera disminución, lo que provoca un leve efecto sobre el almacenamiento.

En los acuíferos libres o convertibles, la interacción con la recarga es una fuente segura de recuperación del sistema. Por lo tanto, si el desarrollo de la misma evoluciona positivamente, los acuíferos superiores podrían recuperarse. No obstante, la interacción entre la capa confinada y la recarga es más limitada. En consecuencia, si los bombeos continúan aumentando, se podría dificultar la recuperación del sistema y, por consiguiente, la masa de agua subterránea continuaría estando en mal estado cuantitativo.

5.4.2 Interacción entre el río y el acuífero

Al igual que en el caso de la simulación estacionaria, se ha realizado un análisis detallado de la relación río-acuífero para cada tramo definido en la tabla 6. Los balances resultantes se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Relación río-acuífero para el periodo 1980/81-2015/16, régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

Relación río-acuífero. Periodo 1980/81-2015/16 (hm³/año)				
Tramo	Acuífero-río	Río-Acuífero	Almacenamiento	Caracterización
Cabecera – Estación de aforos Requena	15,44	1,67	-13,76	<i>Ganador</i>
Estación de aforos Requena – Final	9,53	0,22	-9,31	<i>Ganador</i>
Romeroso	18,06	0	-18,06	<i>Ganador</i>
Total	43,02	1,89	-41,13	<i>Ganador</i>

En el periodo influenciado, el río continúa siendo ganador a lo largo de los diferentes tramos definidos en el modelo. Además, si se comparan los resultados del régimen influenciado con los del régimen no influenciado, se observa una ligera disminución del flujo cedido desde el sistema a los ríos.

Una de las posibles causas de dicha disminución puede ser la pérdida del almacenamiento que ha sufrido el acuífero superior del sistema. En las regiones en las cuales el río y el acuífero se encontraban conectados, puede darse el caso de

desconexión total o parcial de los mismos, provocando que, por diferencia de cotas piezométricas, el río ceda sus aguas al sistema. Por ello, en este caso, el flujo que el río cede al acuífero superior incrementa ligeramente.

Otra de las causas de dicha disminución y, probablemente, la más influyente, es la evolución de la precipitación. En las últimas décadas, las precipitaciones han disminuido considerablemente, por lo que las aportaciones se han visto notablemente afectadas, hecho que se ha reflejado en los caudales circulantes de los ríos.

Estas podrían ser las causas de la disminución de los caudales circulantes en la estación de Requena (ver figura 6). Por ello, los volúmenes de entrada al embalse de Forata se han visto completamente afectados, causando un desequilibrio en el balance hídrico del mismo y provocando la bajada de los niveles de agua.

5.4.3 Análisis piezométrico

La calibración del periodo influenciado se ha basado en la reproducción de los niveles piezométricos observados en la zona de estudio.

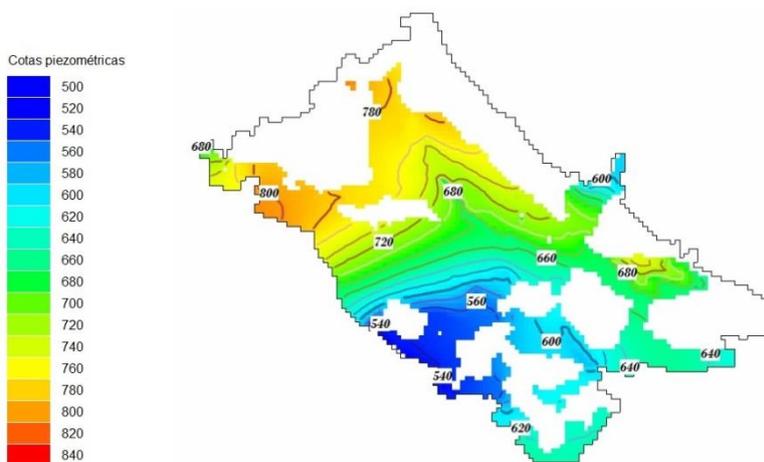


Figura 34. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa superior. Fuente: Elaboración propia

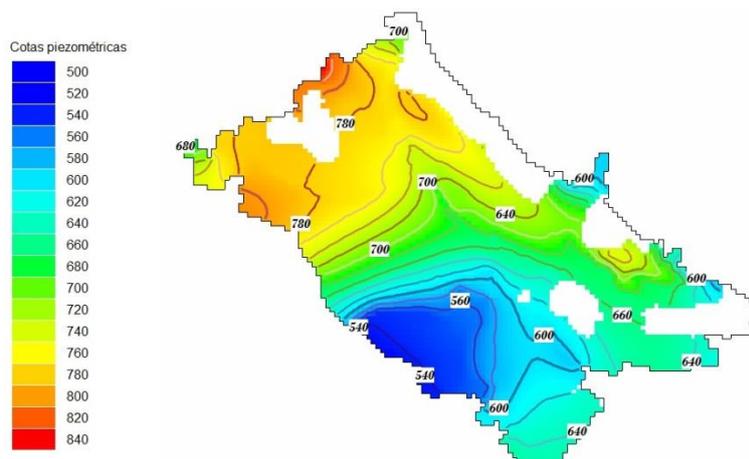


Figura 35. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa intermedia. Fuente: Elaboración propia

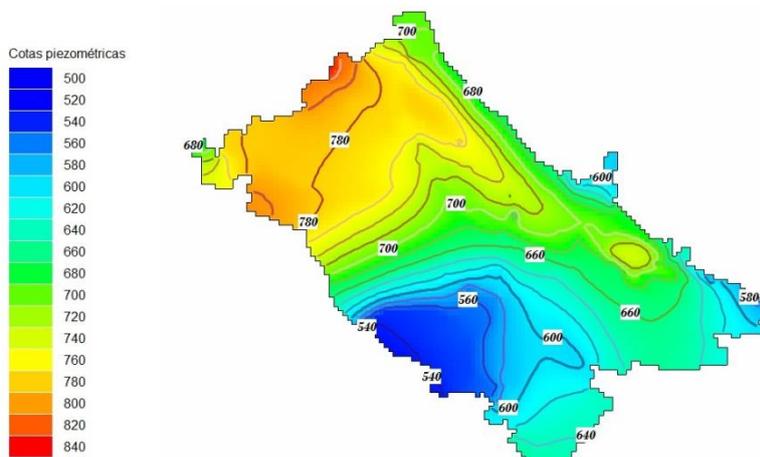


Figura 36. Alturas piezométricas resultantes de la simulación transitoria para la capa inferior. Fuente: Elaboración propia

En la figura 34, figura 35 y figura 36 se muestran las alturas piezométricas resultantes para las diferentes capas definidas en el modelo. Comparando con los resultados obtenidos en la simulación estacionaria se aprecia que la cantidad de zonas secas ha aumentado ligeramente, lo que significa que las alturas piezométricas han sufrido un leve decrecimiento.

En este caso, la superficie piezométrica oscila entre los 537,94 y 832,96 m.s.n.m, esto es, se encuentra aproximadamente 30 centímetros por debajo que en septiembre del año 1980. Si se observan detalladamente los mapas representados, sobre todo el mapa piezométrico del acuífero superior se percibe que se mantiene la influencia que el río tiene en la piezometría del sistema, haciendo que las isopiezas representen la caracterización del mismo.

La figura 37 representa el detalle de la influencia que los bombeos tienen a lo largo del periodo 1980/81-2015/16. Las zonas donde se producen los conos de depresión más pronunciados coinciden con los municipios más poblados, es decir, con las regiones de Requena y Utiel. Tal y como se aprecia en la figura 18 y en la figura 20, en dichas zonas se encuentran las extracciones más voluminosas, tanto para el abastecimiento urbano, como para el agrario.

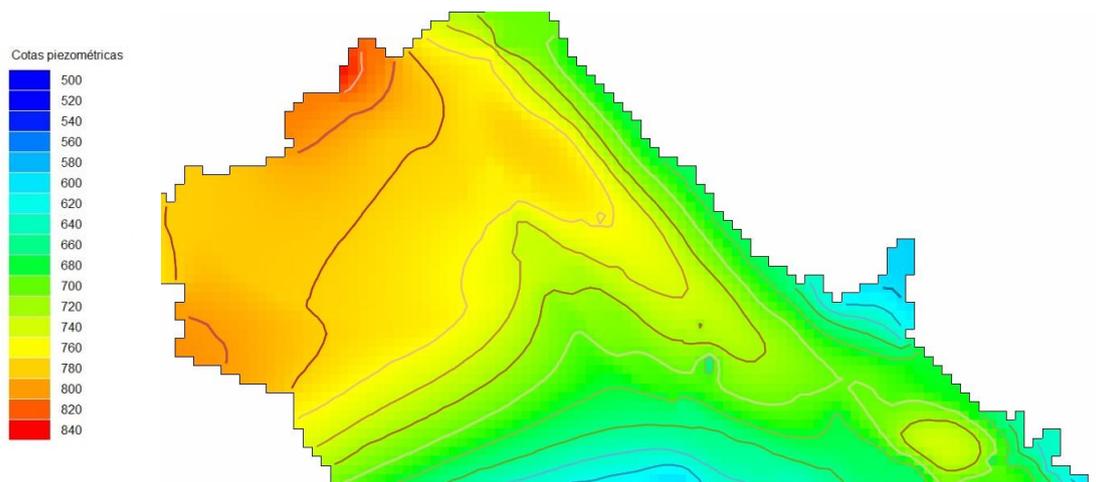


Figura 37. Detalle de la influencia de los bombeos en la piezometría del sistema en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

5.4.4 Análisis de la bondad de ajuste del modelo

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo en régimen influenciado, se ha realizado un análisis de las diferentes funciones objetivo descritas anteriormente, teniendo en cuenta diez piezómetros de la zona de estudio (ver figura 38).

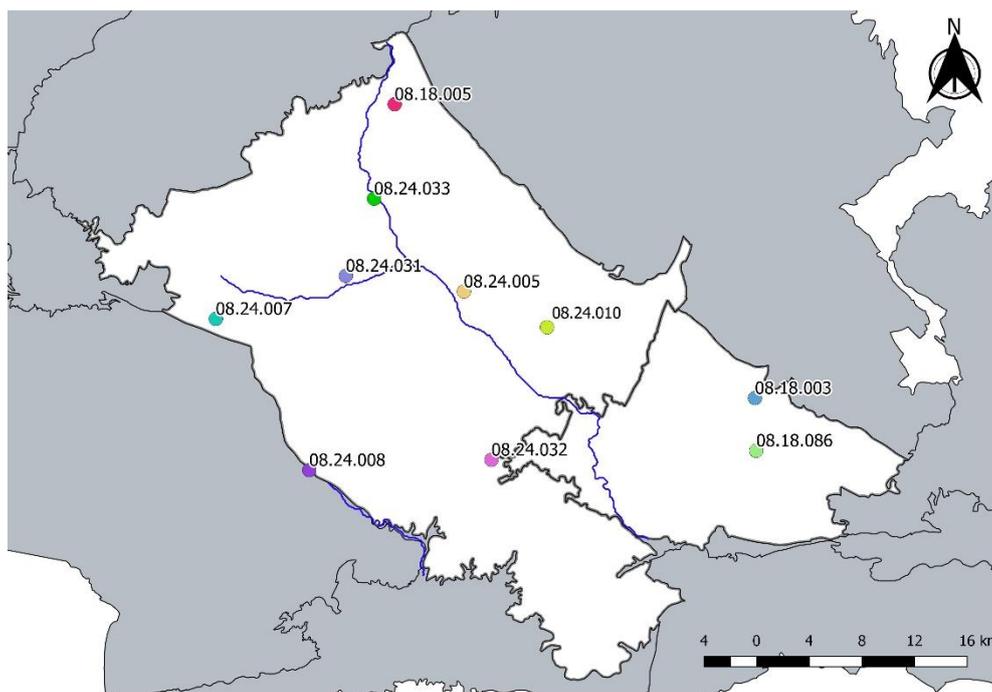


Figura 38. Piezómetros de observación empleados en el proceso de calibración. Fuente: Elaboración propia

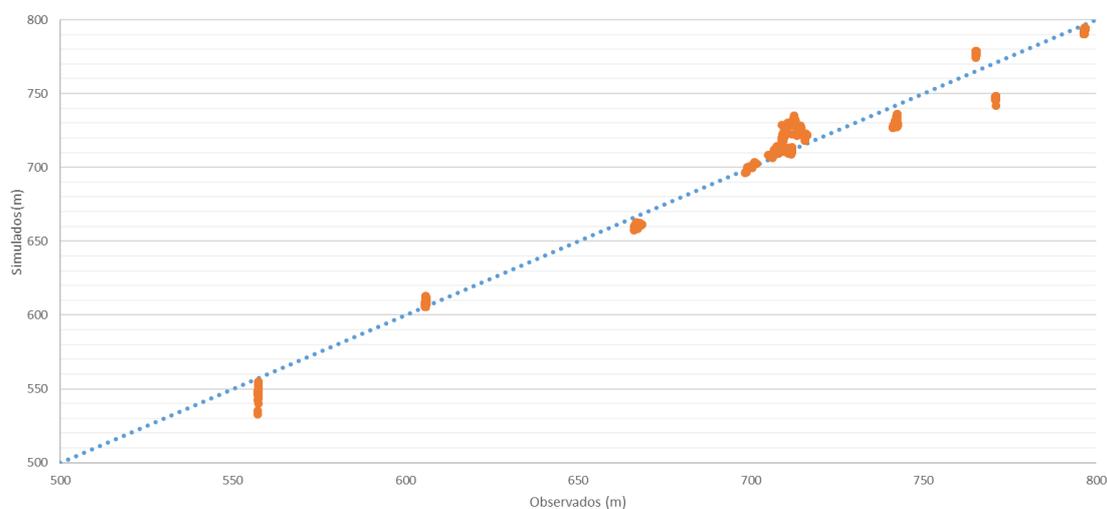


Figura 39. Análisis estadístico de los valores simulados frente a los observados. Fuente: Elaboración propia

En este caso, de la figura 39 se deduce que la máxima diferencia de alturas piezométricas simuladas frente a las observadas se da en el piezómetro 08.24.033 y es, aproximadamente, de 24 metros. Dicha diferencia destaca sobre el resto de los resultados, y puede ser producto de la falta de información para la correcta conceptualización del modelo de la zona. Tal y como se ha mencionado anteriormente,

la piezometría del sistema es desconocida en gran parte de la superficie, tanto en régimen estacionario, como en régimen transitorio, por lo que, a pesar de conseguir reproducir aproximadamente el resto del área de estudio, en esta zona es necesario un mayor análisis de los datos de entrada, como ensayos de campo para la obtención de datos actualizados y reales.

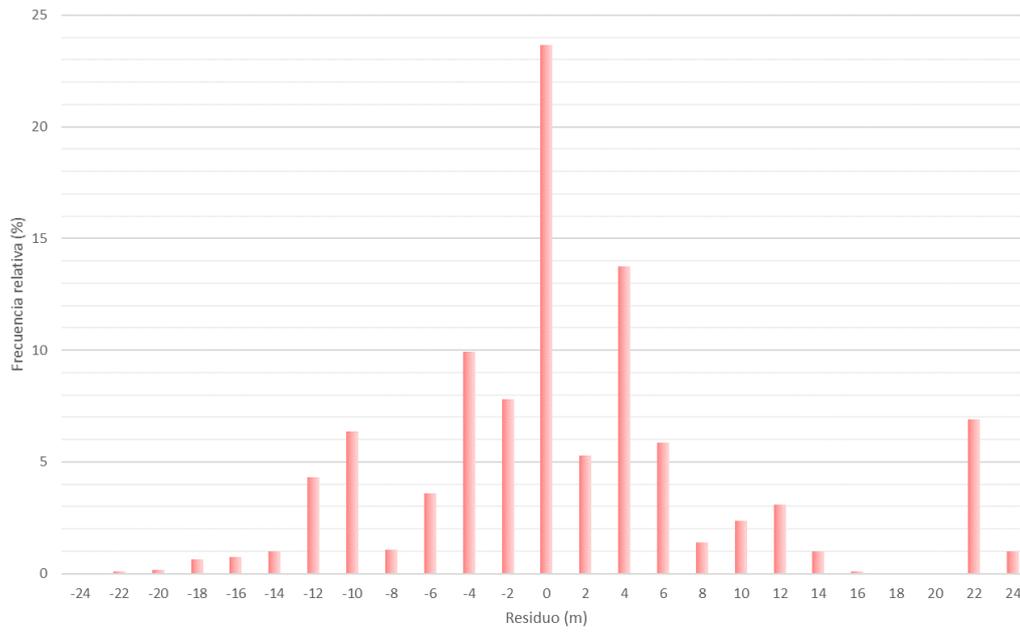


Figura 40. Análisis cuantitativo de la calibración. Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, si se analiza la distribución de los residuos en cuanto a la frecuencia relativa correspondiente, se aprecia que existe una ligera dispersión de los mismos. Es interesante que el histograma resultante presente datos simétricos y que este centrado en torno al cero.

A pesar de ello, se considera que la calibración obtenida para el modelo en régimen influenciado es buena y como muestra de ello se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los indicadores estadísticos.

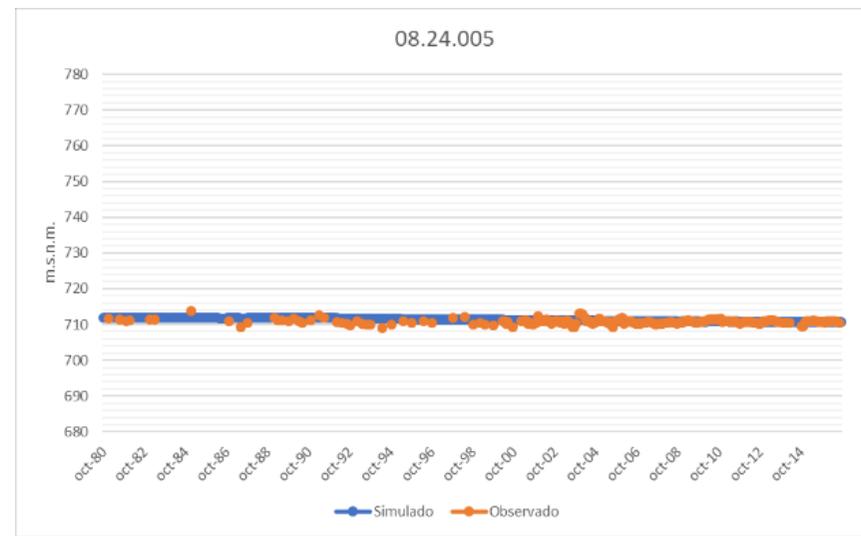
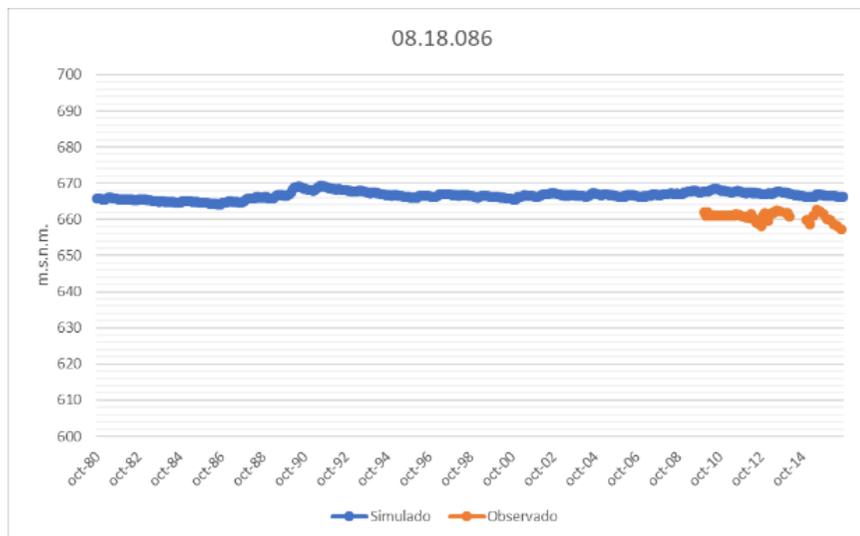
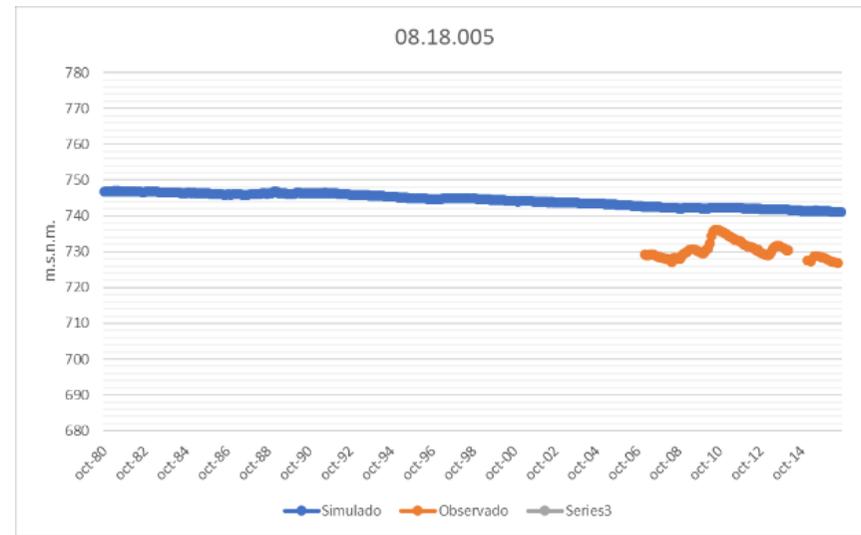
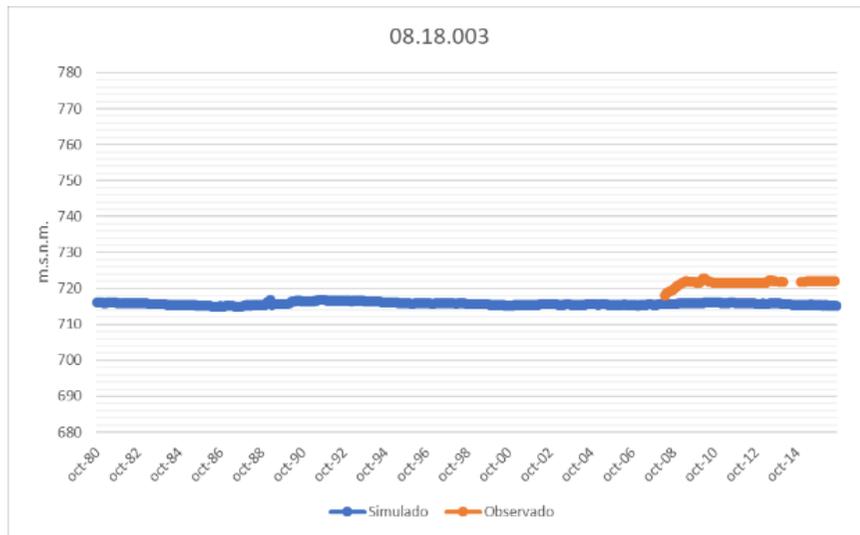
Tabla 14. Análisis de bondad de ajuste del modelo en régimen influenciado. Fuente: Elaboración propia

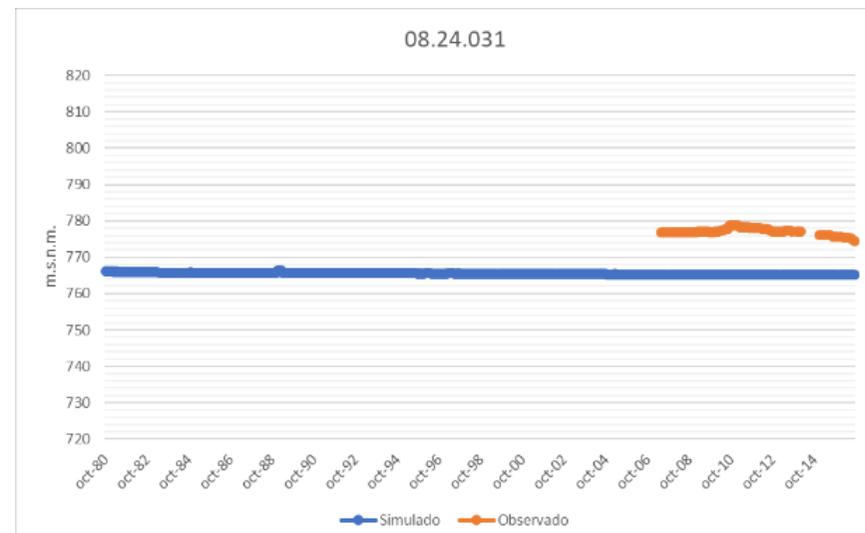
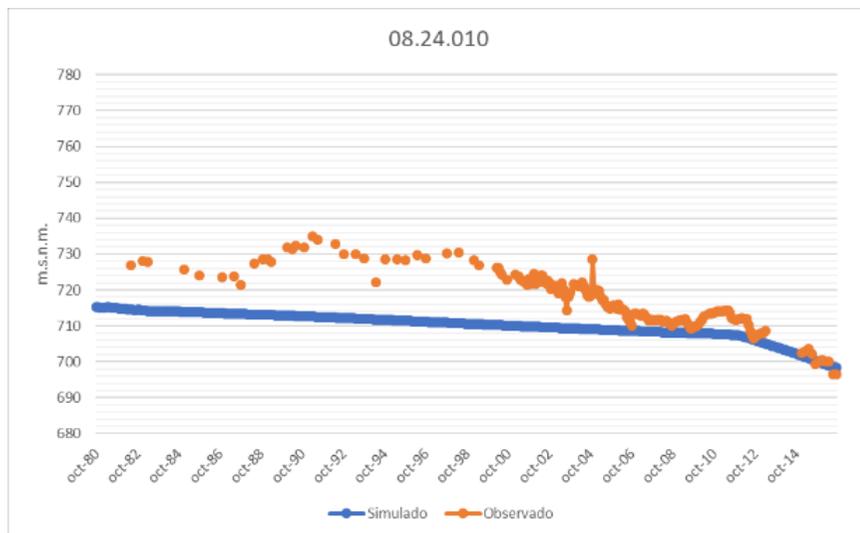
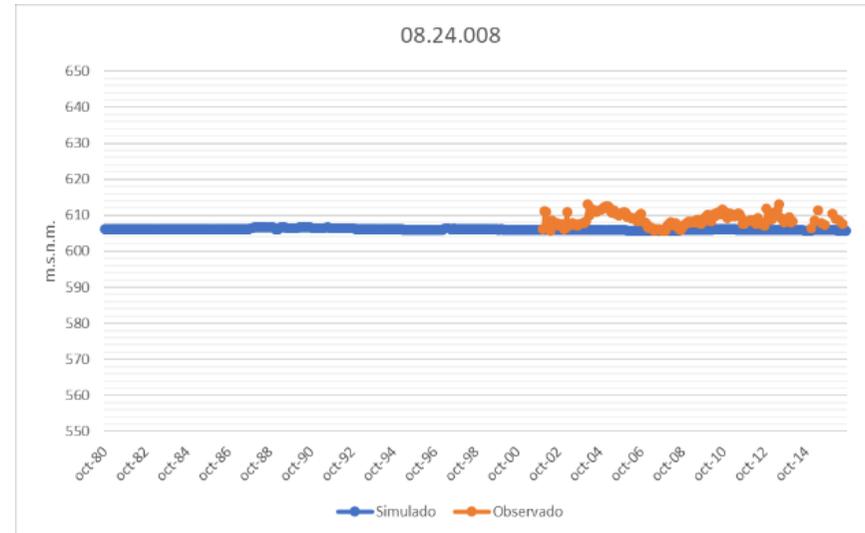
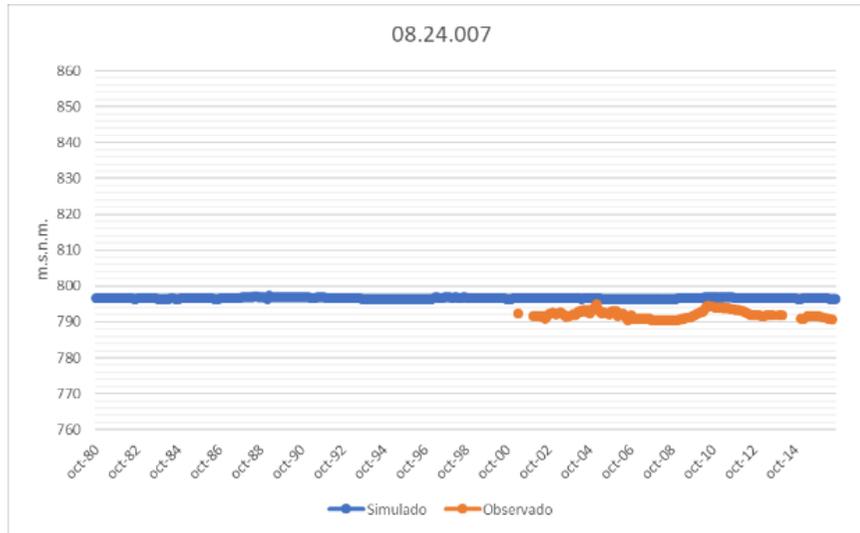
Función objetivo	Fórmula	Valores de referencia	Resultado
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$	0 Perfecto	9,58
NRMSE	$NRMSE = 100 \times \frac{1}{h_{obs}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$	< 10% Excelente 10-20% Bueno 20-30% Aceptable >30% Pobre	1,36

Función objetivo	Fórmula	Valores de referencia	Resultado
Criterio de Nash-Sutcliffe	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2}$	<0,2 Insuficiente 0,2-0,4 Satisfactorio 0,4-0,6 Bueno 0,6-0,8 Muy bueno >0,8 Excelente	0,980
Coeficiente de determinación	$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs}) \times (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2) \times (\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})^2)}} \right)^2$	1 Perfecto	0,981

En la figura 41 se muestran las gráficas que representan el ajuste de las series simuladas en cada uno de los piezómetros analizados.

Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel.





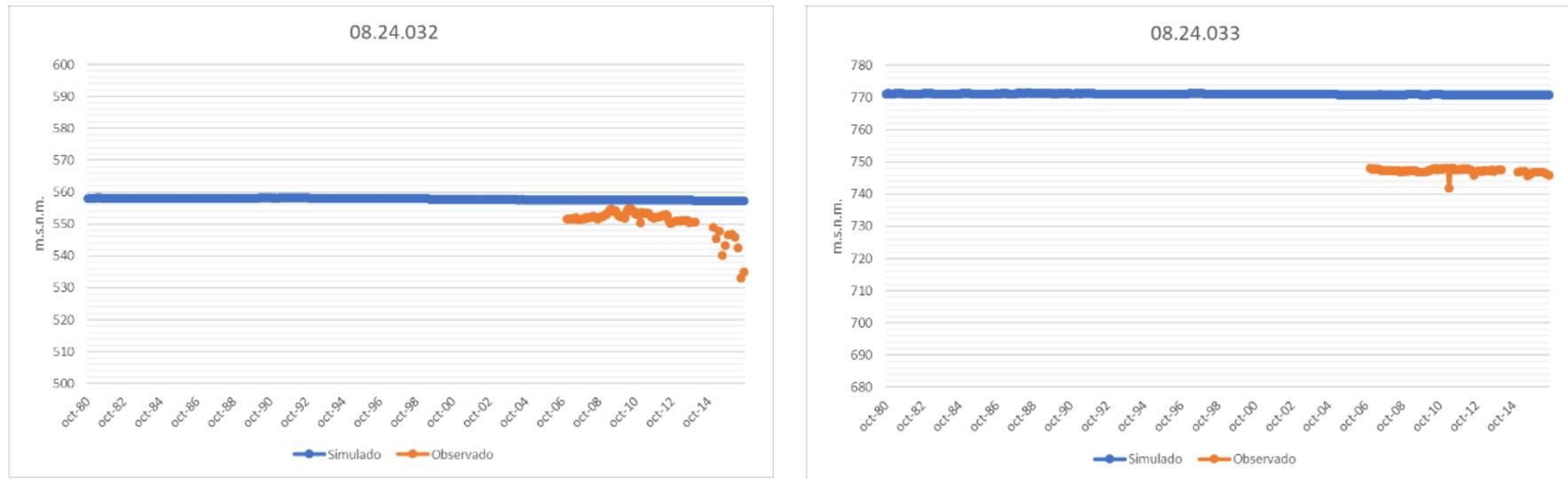


Figura 41. Ajustes obtenidos en los piezómetros seleccionados. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia que el modelo consigue reproducir la tendencia de la evolución de las alturas piezométricas en la mayoría de ellos, a pesar de que, en algunos exista una variación de alturas de, entre, 0 y 10 metros entre lo observado y simulado. Dichas variaciones se deben, principalmente, a la condición inicial definida en régimen influenciado. A pesar de ello, se considera que se trata de una variación razonable y aceptable en el caso de los modelos hidrogeológicos. Únicamente un piezómetro dispone de datos en régimen no influenciado, así como en el influenciado, que es el 08.24.005. Éste presenta el mejor ajuste sin lugar a duda.

La condición inicial considerada puede que no reproduzca de forma adecuada las alturas piezométricas del año 1980 en toda la superficie. No obstante, debido a la poca cantidad de datos observados disponibles en dicho año, no se ha podido obtener un mejor ajuste de la citada condición. A pesar de ello, para la mayoría de la superficie se ha conseguido obtener resultados próximos a la realidad.

Sin embargo, en el caso del piezómetro 08.24.033, se ha obtenido una serie que reproduce la tendencia de las observaciones, pero no así los valores absolutos reales. La serie simulada queda, aproximadamente, 23-24 metros por encima de la realidad. La causa principal de dicha desviación puede ser la reducida información disponible, lo que ha conllevado a una errónea conceptualización del modelo en dicha zona. Una mejora del ajuste sin afectar al resto de las series simuladas y sin conocer ningún dato objetivo, no garantizaba la mejora del modelo, por lo que se decidió dejarlo tal y como estaba.

Asimismo, el piezómetro 08.24.32 presenta un descenso brusco en los datos observados en los últimos meses, que no ha sido posible reproducir por el modelo. Se ha consultado la evolución de las observaciones en dicho punto desde octubre de 2016 hasta la actualidad y se aprecia que la altura piezométrica vuelve a recuperarse. Por lo tanto, se deduce que el descenso brusco producido en el año hidrológico 2015/2016 se puede deber a algún uso incontrolado que no se ha tenido en cuenta en los datos de entrada al modelo.

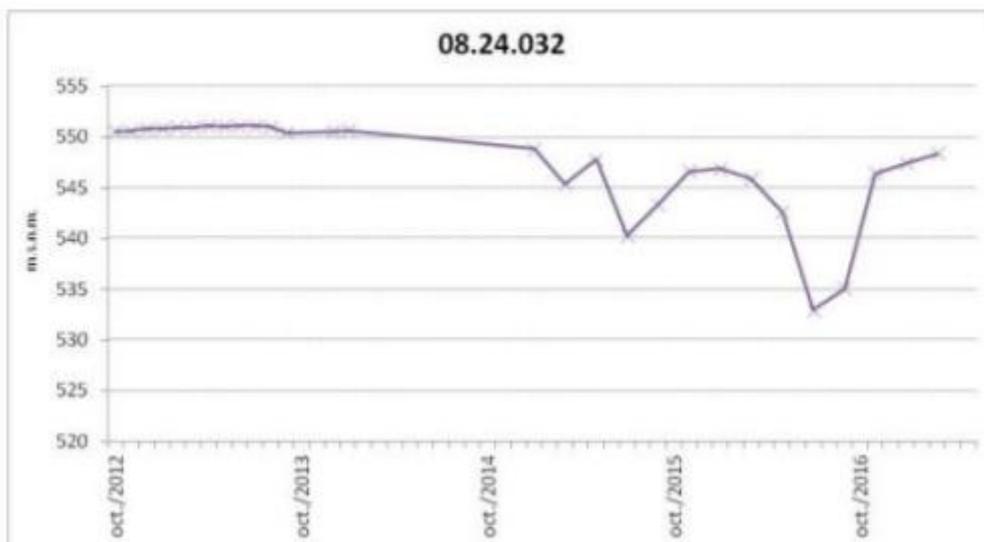


Figura 42. Evolución de alturas piezométricas en el piezómetro 08.24.032, periodo oct-2012 hasta la actualidad.
Fuente: CHJ, 2017

En general, como la tendencia de las observaciones está contemplada en las simulaciones y, debido a los buenos resultados obtenidos en el análisis de los indicadores estadísticos se ha considerado que se ha obtenido un buen ajuste de la realidad.

6. APLICACIÓN DEL MODELO

Uno de los usos más valiosos y prácticos de un modelo es la predicción del futuro, es decir, conocer la respuesta del sistema bajo diferentes supuestos o hipótesis. Es importante tener en cuenta que los resultados de dichas predicciones se encuentran sujetas a un grado de incertidumbre que es necesario considerar.

El objetivo de este capítulo es conocer la respuesta del sistema bajo los términos establecidos en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, elaborado por la CHJ en diciembre de 2016.

Para la simulación de estos escenarios se ha partido de las alturas piezométricas resultantes del modelo en régimen influenciado, correspondientes a septiembre del 2016.

6.1 Escenario 1: Plan Hidrológico del Júcar 2009-2015

En este escenario se desea conocer la respuesta del sistema a lo largo del periodo 2016/17-2030/31 teniendo en cuenta los siguientes datos:

- Recarga derivada del modelo Patricial (Pérez-Martín, 2005), correspondiente al periodo 2001/02-2015/16.
- Dotación bruta de apoyo para el riego de la vid establecido en el PHJ 2009-2015 (450 m³/ha/año).
- Superficie regable del año 2016 para todo el periodo de estudio.
- Derechos concesionales vigentes en octubre de 2016.

En la tabla 15 se presenta el balance medio resultante del presente escenario. En el caso de no aplicar las dotaciones del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel y continuar con lo establecido en el ciclo de planificación anterior (2009-2015), el sistema perdería una media de 28 m³/ha/año, 10 más que en la simulación del periodo transitorio.

Tabla 15. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia

Balance medio. Periodo 2016/17-2030/31 (hm ³ /año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Infiltración de la lluvia	46,34			Δ Srecarga = 46,34
Entradas desde Mira	10,78	Salidas hacia Mira	5,71	Δ SMira = 5,07

Balance medio. Periodo 2016/17-2030/31 (hm³/año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Entradas desde Las Serranías	0	Salidas hacia Las Serranías	14,41	Δ SSerranías = -14,41
Entradas desde Buñol-Cheste	0	Salidas hacia Buñol-Cheste	3,03	Δ SBuñol-Cheste = -3,01
Entradas desde Hoces de Cabriel	0,007	Salidas hacia Hoces de Cabriel	1,30	Δ SHocesDeCabriel = -1,30
Entradas desde el río Magro	2,03	Drenaje hacia el río Magro	23,95	Δ SMagro = -21,92
Entradas desde el cauce Romeroso	0	Drenaje hacia el cauce Romeroso	17,87	Δ SRomeroso = -17,87
		Bombeos	21,27	Δ SBombeos = -21,27
Total	59,16	Total	87,54	ΔStotal = -28,38

No obstante, si se tiene en cuenta únicamente el periodo 2001/02-2015/16 (ver figura 28) de toda la simulación transitoria, el sistema pierde, de media, 27 m³/ha/año. Dicha ligera discrepancia respecto al resultado de esta simulación está ligada a la demanda total derivada de las concesiones consideradas. En este escenario se han incluido todos los aprovechamientos vigentes en octubre de 2016, por lo que la demanda es superior y, en consecuencia, el balance resulta más desfavorable.

Se podría considerar que el estado del sistema permanecería prácticamente igual que en los últimos 15 años. Sin embargo, de acuerdo con las alegaciones que los usuarios presentaron a lo largo del primer ciclo de planificación, habría dificultades para satisfacer las demandas agrícolas, sobre todo en años secos, por lo que sería necesario aumentar la dotación para regadío.

En la figura 43 se muestra la evolución anual del almacenamiento y el almacenamiento acumulado correspondiente.

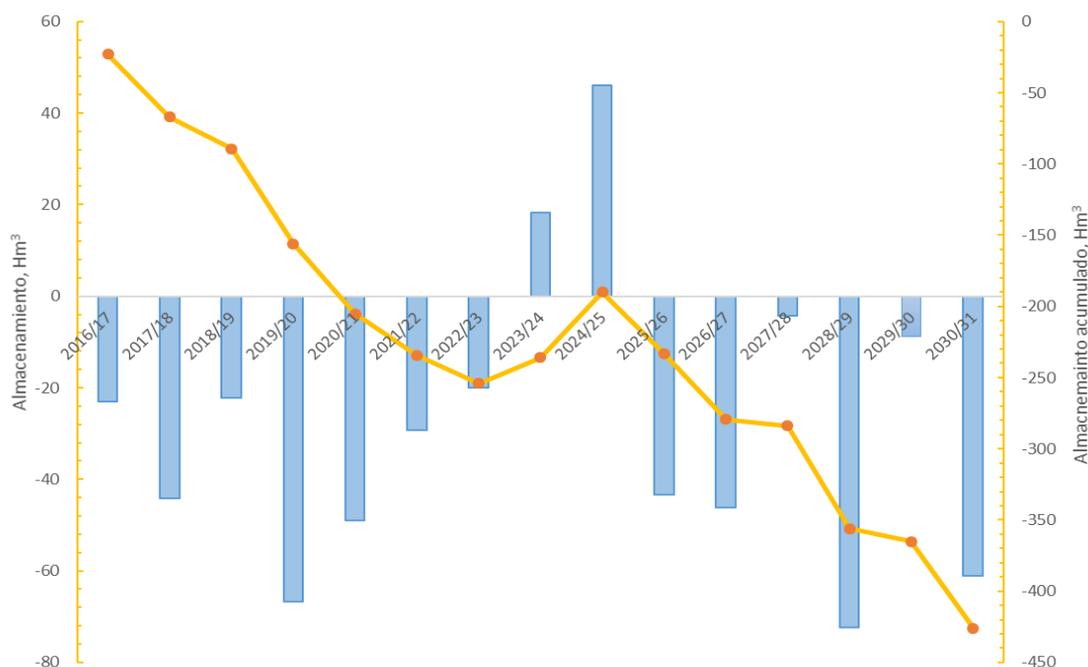


Figura 43. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia

6.2 Escenario 2: Aplicación del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel

Tal y como se ha comentado en los apartados introductorios, en diciembre del año 2016, se aprobó el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. El principal objetivo del citado plan es conseguir una planificación racional de la reserva de agua subterránea, sin dejar de reconocer la problemática sobre la escasez de recursos existente. Para su redacción final, se llevaron a cabo varias reuniones entre diferentes organismos, con la finalidad de alcanzar un acuerdo común y establecer las medidas oportunas para lograr el principal objetivo.

El plan define las dotaciones de referencia para los distintos usos. Éstas han sido acordadas por los usuarios y la Administración para este sistema en concreto. Se establece un incremento de la dotación bruta media a 600 m³/ha/año para la vid de toda la superficie consolidada, así como para la vid, el olivar y los frutales de todos los aprovechamientos que no estuvieran en regadío a la entrada en vigor del Real Decreto 1/2016, de 8 de enero. Las superficies consolidadas del almendro y olivar mantienen una dotación bruta de 1250 m³/ha/año, definida en el PHJ 2015-2021.

No obstante, la dotación del plan de explotación puede variar en función de las condiciones climatológicas de cada año, diferenciándose años secos, con una dotación

máxima de 900 m³/ha/año, años medios, con una dotación máxima de 600 m³/ha/año y años húmedos, con una dotación máxima de 450 m³/ha/año.

La caracterización climatológica de cada año se ha basado en el promedio de los datos registrados en las estaciones pluviométricas de Caudete de las Fuentes y de Requena, propios del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). Los rangos de precipitación para cada tipo de año se definen en la tabla 16:

Tabla 16. Caracterización del tipo de año establecido en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Fuente: Elaboración propia

Caracterización	Rango de precipitación entre octubre y abril (mm)
Año seco	< 230
Año medio	230 - 310
Año húmedo	> 310

Además, dicho plan establece la necesidad de la constitución de una Junta Central de Usuarios de la masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel y el resto de las masas asociadas, que integre las comunidades de regantes existentes, así como los usuarios de abastecimiento, industriales y particulares.

Con el propósito de conocer el efecto de las medidas tomadas en relación con la dotación bruta, se establece la necesidad de definir una serie de simulación, determinando la caracterización de cada año. Como no se dispone de datos históricos del pluviómetro de Caudete de las Fuentes, el análisis se ha basado, en este caso, en la estación de Requena. La caracterización de los años resultante se presenta en la figura 44.

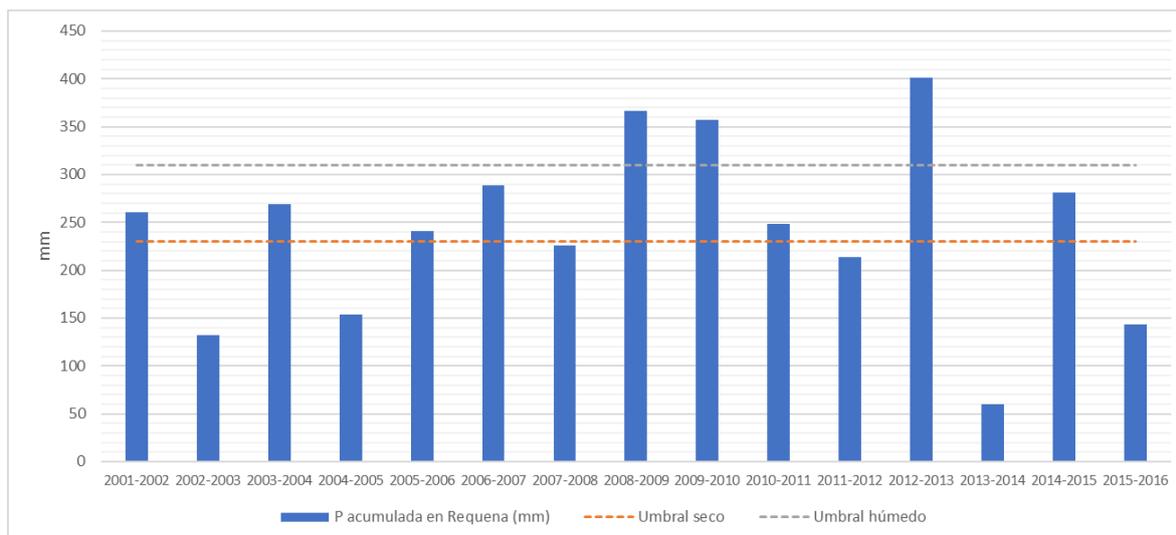


Figura 44. Caracterización del tipo de año de acuerdo con los datos registrados en el pluviómetro de Requena.
Fuente: Elaboración propia

Este escenario pretende simular el periodo 2016/17-2030/31, considerando los siguientes datos:

- Recarga derivada del modelo Patrical (Pérez-Martín, 2005), correspondiente al periodo 2001/02-2015/16.
- Evolución de las precipitaciones del periodo 2001/02-2015/16, y por consiguiente la caracterización de los años definidos en la figura 44.
- Dotación bruta de apoyo para el riego de la vid establecida en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.
- Un crecimiento de 4100 ha de dos expedientes en trámite que serán transformadas en los próximos años.
- Derechos concesionales vigentes en octubre de 2016.

En resumen, se simulará el periodo 2016/17-2030/31 asumiendo que se repite la climatología del periodo 2001/02-2015/16 y, por tanto, manteniendo la recarga resultante del modelo Patrical (Pérez-Martín, 2005). La condición inicial será el resultado del modelo en régimen influenciado para septiembre del año 2016. El propósito principal será predecir la evolución del sistema para el horizonte 2030/31, considerando los condicionantes establecidos en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.

En la tabla 17 se presenta el balance medio resultante del periodo de simulación.

Tabla 17. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia

Balance medio. Periodo 2016/17-2030/31 (hm³/año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Infiltración de la lluvia	46,34			$\Delta S_{\text{recarga}} = 46,34$
Entradas desde Mira	10,87	Salidas hacia Mira	5,68	$\Delta S_{\text{Mira}} = 5,19$
Entradas desde Las Serranías	0	Salidas hacia Las Serranías	14,37	$\Delta S_{\text{Serranías}} = -14,37$
Entradas desde Buñol-Cheste	0	Salidas hacia Buñol-Cheste	3,03	$\Delta S_{\text{Buñol-Cheste}} = -3,01$
Entradas desde Hoces de Cabriel	0,007	Salidas hacia Hoces de Cabriel	1,30	$\Delta S_{\text{HocesDeCabriel}} = -1,30$
Entradas desde el río Magro	2,05	Drenaje hacia el río Magro	23,88	$\Delta S_{\text{Magro}} = -21,84$
Entradas desde el cauce Romeroso	0	Drenaje hacia el cauce Romeroso	17,87	$\Delta S_{\text{Romeroso}} = -17,87$
		Bombeos	28,82	$\Delta S_{\text{Bombeos}} = -28,82$
Total	59,27	Total	94,95	$\Delta S_{\text{total}} = -35,68$

Debido al aumento de la dotación bruta establecida en el plan de explotación de la masa en cuestión, el volumen medio bombeado crecería considerablemente y, en consecuencia, el sistema perdería, de media, 7 hm³ anuales más que en el escenario 1. El resto de los componentes del balance se mantendrían prácticamente constantes.

Se podría destacar que después de la simulación transitoria el volumen que el sistema drena al río Magro seguiría descendiendo progresivamente, tanto en el escenario 1, como en este segundo.

En la figura 45 se representa la evolución anual que sufriría el almacenamiento del sistema y la acumulación respectiva. Analizando dicha gráfica y contrastando los resultados con los representados en la figura 43 se aprecia que, con la aplicación del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, el sistema podría llegar a perder 100 hm³ adicionales en el escenario 2 a lo largo del periodo simulado.

Por lo tanto, a pesar de que los usuarios de este recurso presenten sus escritos alegando que las dotaciones son insuficientes para el riego de la vid, la conclusión es que, con las dotaciones establecidas en el plan de explotación, el estado del sistema empeoraría

considerablemente. La situación podría tener consecuencias negativas, tales como el aumento de los costos de explotación y el deterioro de la calidad del agua, entre otros.

Es necesario tener en cuenta que gran parte del volumen extraído se utiliza para satisfacer las demandas urbanas. En el caso de que la población de los municipios crezca a lo largo del tiempo, la demanda urbana aumentará y, en principio, se trataría de una demanda prioritaria, frente a la agrícola.

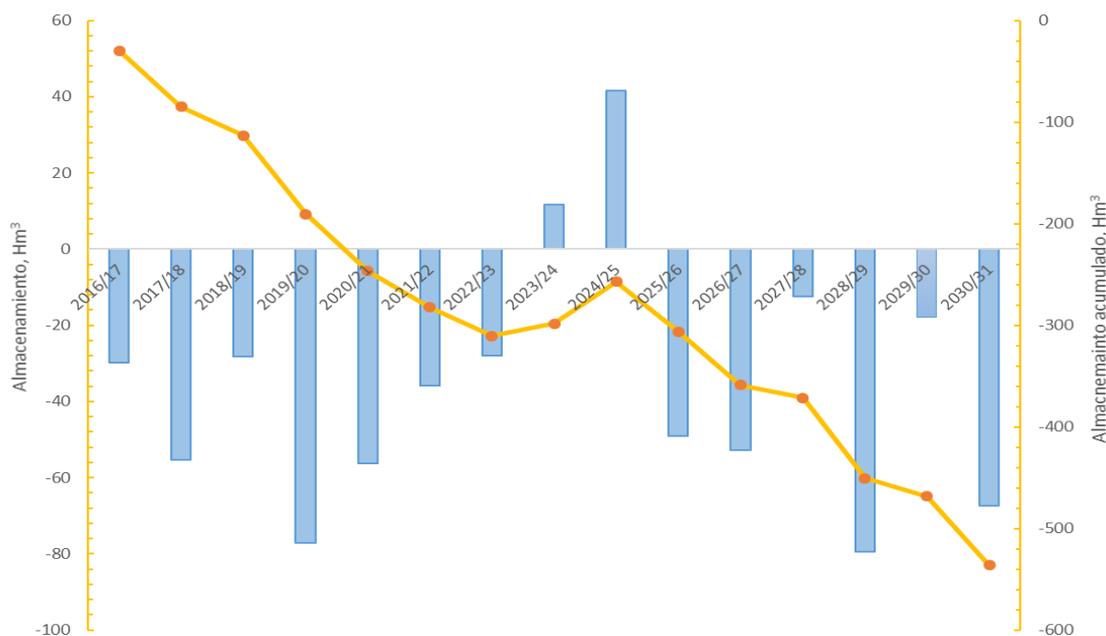


Figura 45. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia

6.3 Escenario 3: Análisis de las consecuencias del cambio climático

El objetivo de tercer escenario será simular el mismo periodo de tiempo que en los escenarios anteriores, pero en este caso, teniendo en cuenta el posible efecto que el cambio climático podría tener en los recursos hídricos del sistema. Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes datos:

- Reducción del 12% de la precipitación, de acuerdo con lo que se establece en los balances de recursos hídricos del PHJ 2015-2021 en condiciones de cambio climático y, por consiguiente, la caracterización de los años definidos en la figura 46.
- Reducción del 12% de la recarga derivada del modelo Patrical (Pérez-Martín, 2005), correspondiente al periodo 2001/02-2015/16.

- Dotación bruta de apoyo para el riego de la vid establecido en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.
- Un crecimiento de 4100 ha de dos expedientes en trámite que serán transformadas en los próximos años.
- Derechos concesionales vigentes en octubre de 2016.

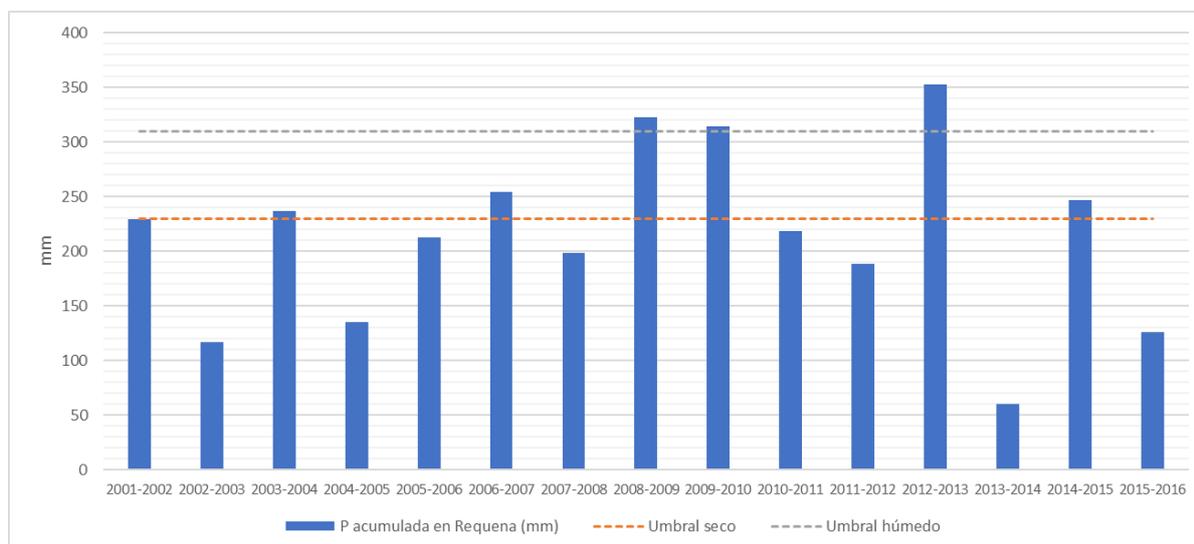


Figura 46. Caracterización del tipo de año de después de aplicar una reducción del 12% a la precipitación registrada en la estación de Requena. Fuente: Elaboración propia

Contrastando la figura 46 con la figura 44, se puede concluir que, bajo los efectos del cambio climático, el número de años secos aumentaría de 6 a 9.

En la tabla 18 se presenta el balance medio resultante del periodo 2016/17-2030/31. Como es evidente, una situación influenciada por el cambio climático provocaría una reducción de las entradas al sistema. Además, debido a la caracterización de los años, sería preciso más volumen de agua para satisfacer las demandas de los agricultores, por lo que las extracciones o presiones sobre el sistema se incrementarían. En consecuencia, el balance medio resultante sería aún más desfavorable. El sistema perdería aproximadamente 41 hm³ anuales.

Este escenario trata de simular una situación hipotética a futuro, pero que, al mismo tiempo, engloba el efecto que el cambio climático está produciendo en la zona. Evidentemente, la reducción de las precipitaciones y aportaciones no se ha dado, ni se dará, bruscamente, pero para el horizonte 2030/31, se espera que las mismas se vean notablemente afectadas. Por lo tanto, el sistema seguiría perdiendo progresivamente un volumen importante y, por consiguiente, los agricultores necesitarían un volumen

superior de recurso subterráneo. En el futuro, se podría llegar a cuestionar la compatibilidad entre los usos actuales de la zona y el buen estado ambiental de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.

Tabla 18. Balance medio del sistema para el periodo 2016/17-2030/31 en el escenario 3. Fuente: Elaboración propia

Balance medio. Periodo 2016/17-2030/31 (hm³/año)				
Entradas		Salidas		Almacenamiento
Infiltración de la lluvia	40,77			Δ Srecarga = 40,77
Entradas desde Mira	10,89	Salidas hacia Mira	5,61	Δ SMira = 5,28
Entradas desde Las Serranías	0	Salidas hacia Las Serranías	14,00	Δ SSerranías = -14,00
Entradas desde Buñol-Cheste	0	Salidas hacia Buñol-Cheste	3,02	Δ SBuñol-Cheste = -3,02
Entradas desde Hoces de Cabriel	0,007	Salidas hacia Hoces de Cabriel	1,30	Δ SHocesDeCabriel = -1,30
Entradas desde el río Magro	2,05	Drenaje hacia el río Magro	23,84	Δ SMagro = -21,80
Entradas desde el cauce Romeroso	0	Drenaje hacia el cauce Romeroso	17,87	Δ SRomeroso = -17,87
		Bombeos	29,48	Δ SBombeos = -29,48
Total	53,72	Total	95,12	ΔStotal = -41,4

Tal y como se aprecia en la figura 47, si se diera el caso representado en este escenario, el sistema podría llegar a perder unos 625 hm³ en los próximos 15 años, que sería prácticamente el mismo volumen que ha perdido desde el año hidrológico 1980/81 hasta la actualidad.

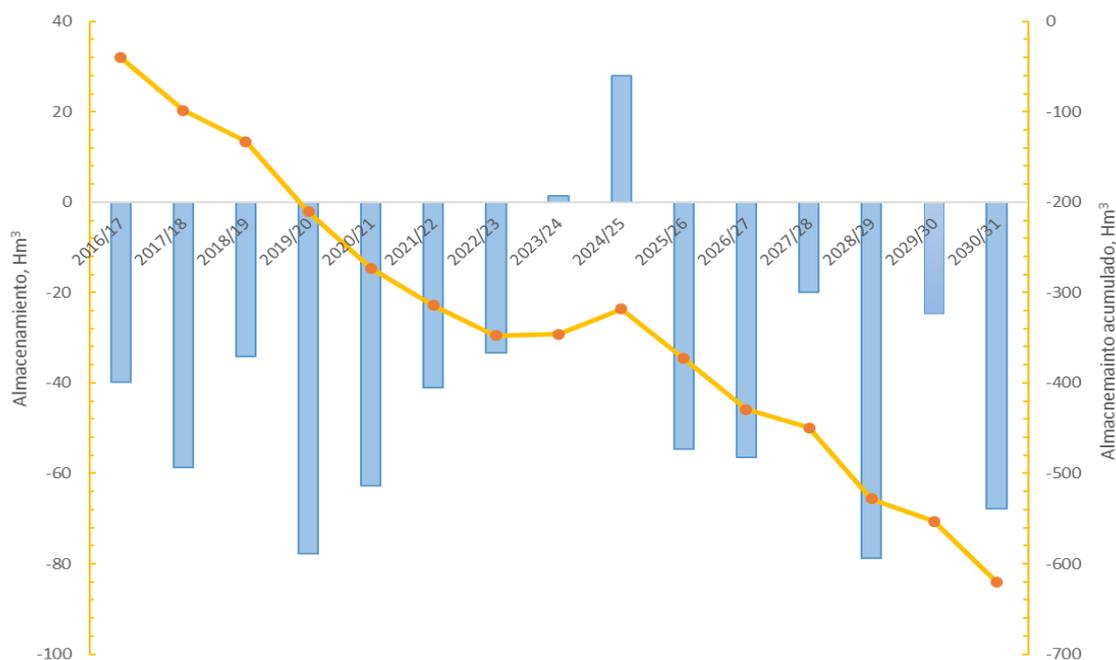


Figura 47. Evolución del almacenamiento anual y almacenamiento acumulado en el escenario 3. Fuente: Elaboración propia

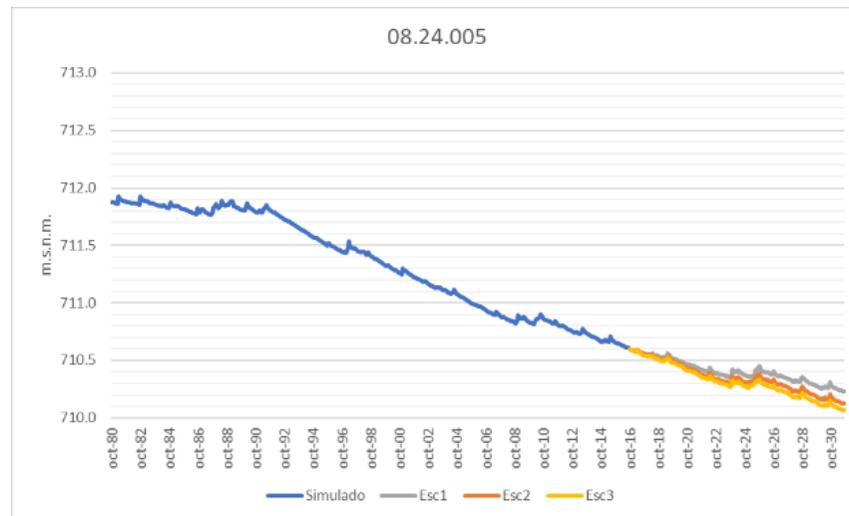
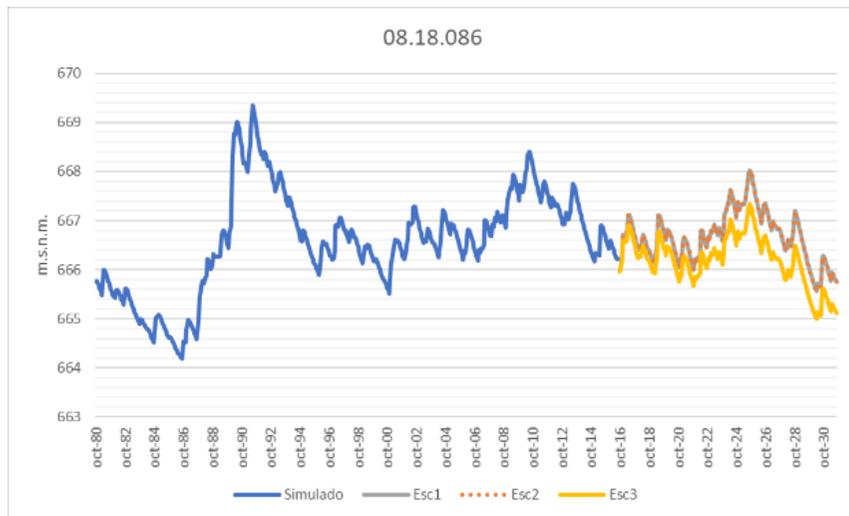
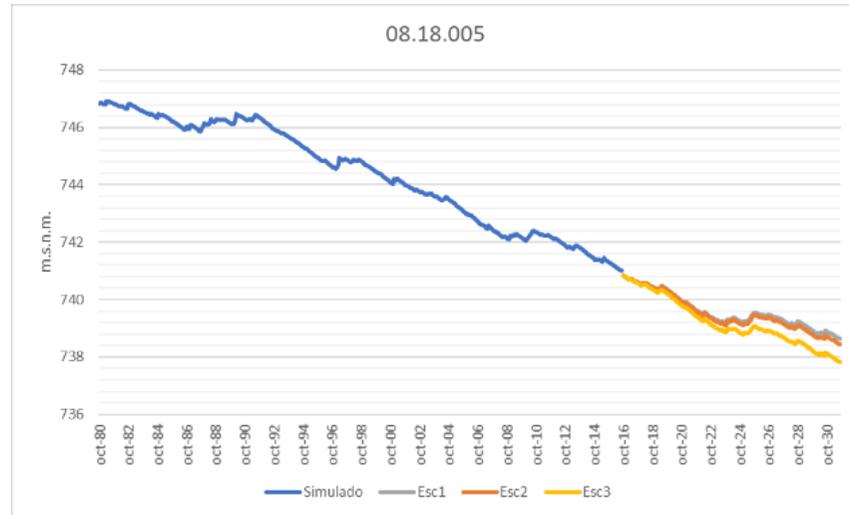
6.4 Análisis de la evolución piezométrica en los diferentes escenarios

En la figura 48 se representa la evolución de las alturas piezométricas que podría darse en los diferentes escenarios anteriormente descritos.

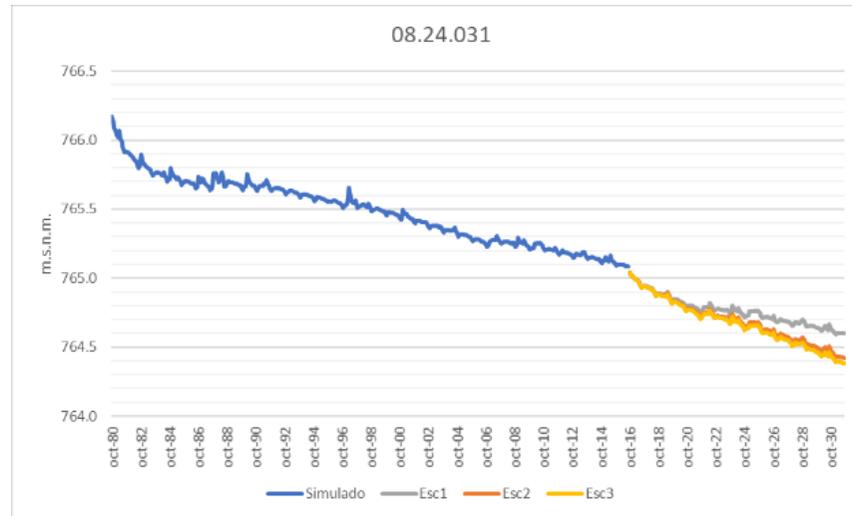
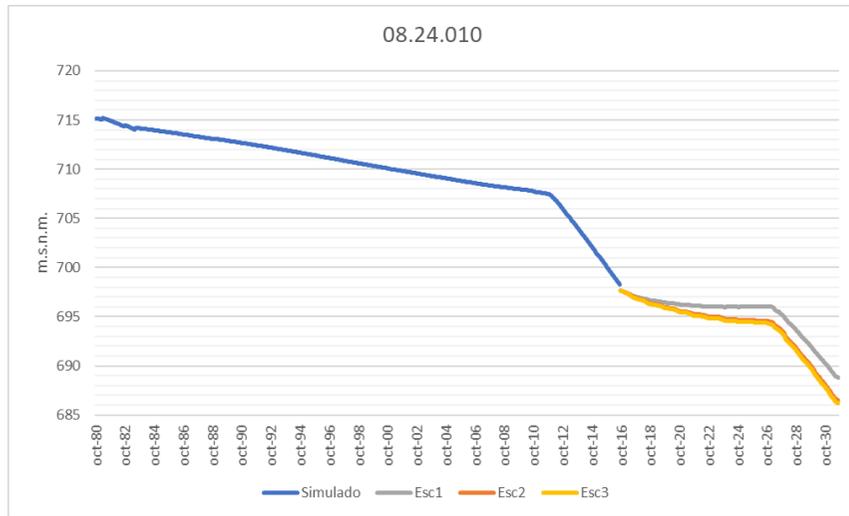
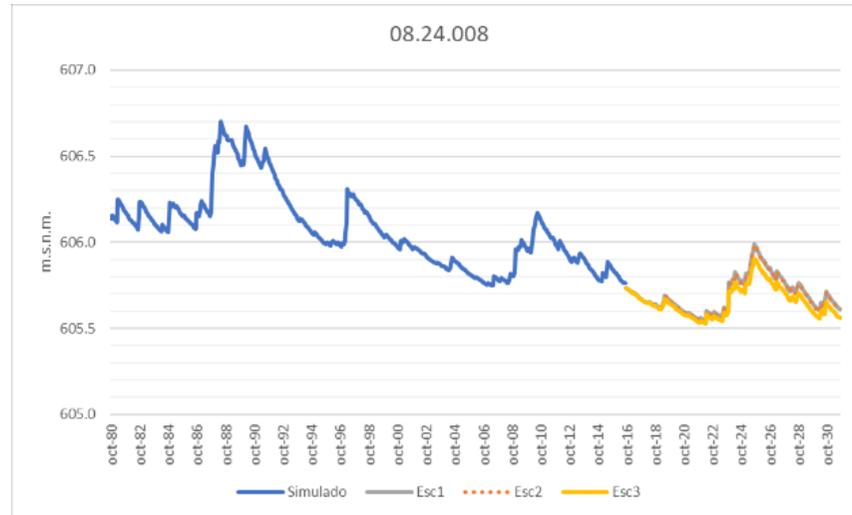
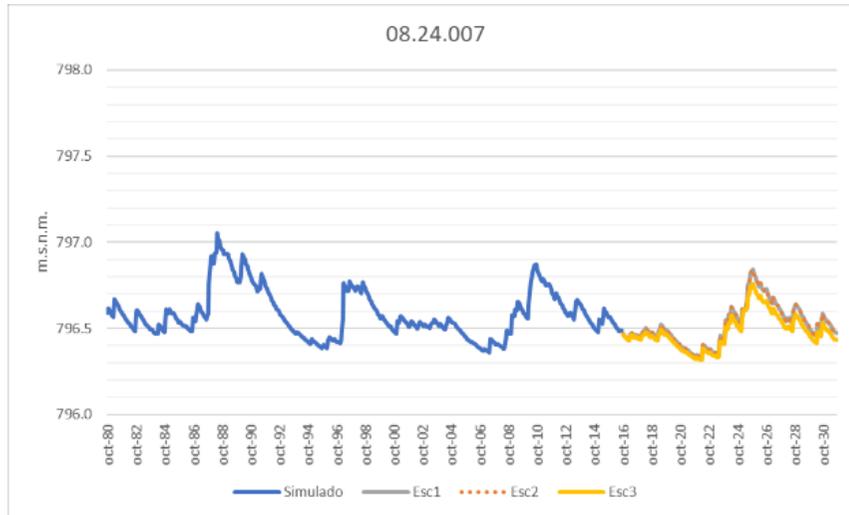
De todas las gráficas representadas cabe destacar la correspondiente al piezómetro 08.24.010. Este piezómetro sufre un descenso de la altura alarmante. Se encuentra situado donde se ubican dos pozos de bombeo destinados al abastecimiento urbano del municipio de Requena, además de otros pozos destinados a usos agrícolas de magnitud importante. En la misma zona se localiza el piezómetro 08.24.005 que, igualmente, pero en menor medida, sufre un descenso en las alturas piezométricas registradas.

Asimismo, los piezómetros 08.24.031, 08.24.032 y 08.24.033 se sitúan en la región de Utiel que, junto a Requena, es el municipio más poblado del sistema. Los bombeos que se realizan para satisfacer las demandas urbanas, así como las agrarias de la zona, provocan un descenso notable de los niveles en los citados piezómetros.

Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel.



Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel.



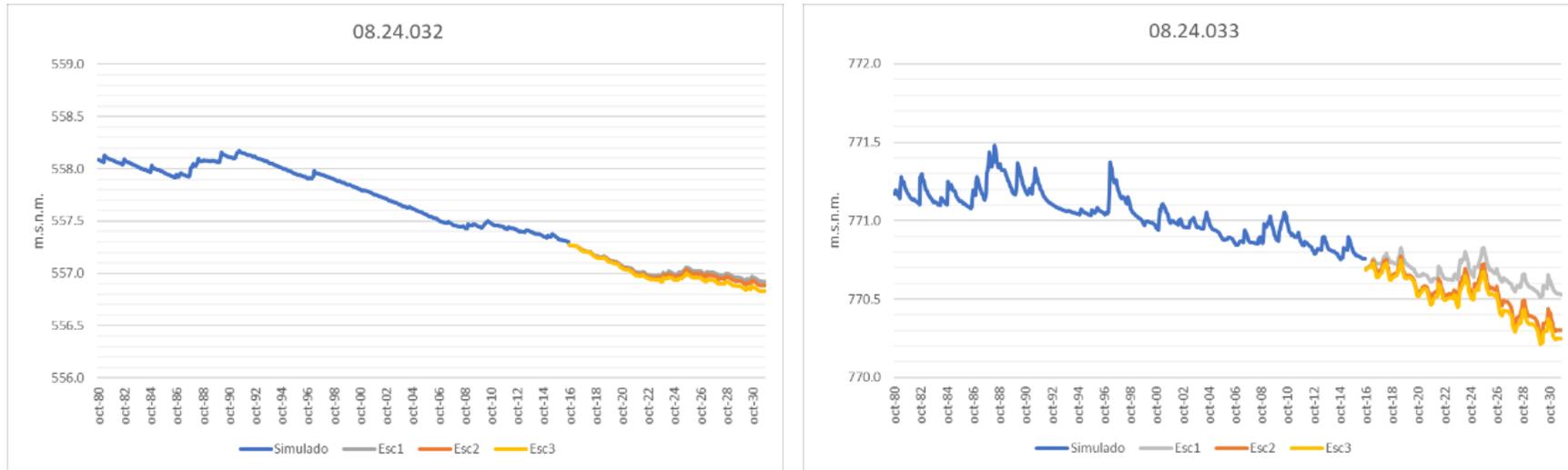


Figura 48. Evolución de las alturas piezométricas en los piezómetros analizados en los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia

En el resto de los puntos los niveles piezométricos tienen una tendencia descendente, pero se podría decir, que no se encuentran ubicados en zonas de alta explotación del recurso subterráneo. Dos de los mismos se localizan sobre la masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara, que se encuentra en buen estado cuantitativo y el otro, cerca del contorno noroeste de la masa de agua Requena-Utiel, zona en la cual apenas existen extracciones. Las series de las alturas piezométricas en los pozos de observación ubicados en zonas de baja explotación responden en la práctica a un régimen natural.

En resumen, la tendencia del sistema no presenta indicios de mejora, sino que tiende a liberar progresivamente un volumen de agua superior con el tiempo. Además, la aplicación del plan de explotación podría producir una situación más dañina para el sistema, que podría agravarse con condiciones climatológicas desfavorables.

7. RECOMENDACIONES Y PROSPECTIVA

Actualmente, este modelo constituye la herramienta más actualizada que explica el funcionamiento del sistema y permite predecir su comportamiento a corto, medio y largo plazo bajo diferentes hipótesis. No obstante, durante el desarrollo del presente trabajo, se han cuestionado una serie de puntos que podría ser interesante resolver mediante estudios y trabajos detallados. Ellos son:

- La discretización vertical definida en el modelo se ha realizado basándose en los datos del modelo del año 2001. No obstante, tal y como se ha comentado en el apartado de los antecedentes, desde entonces, se han llevado a cabo varios trabajos y estudios de carácter técnico que han permitido profundizar y mejorar en el conocimiento del sistema, así como conocer la delimitación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Por lo tanto, se deberían actualizar los datos litológicos de la zona, teniendo en cuenta la nueva delimitación del sistema, con el propósito de progresar en el conocimiento de los acuíferos existentes.
- A pesar de que la discretización espacial y temporal definida permita representar adecuadamente la realidad, a veces puede llegar a perderse información de suma importancia que el modelo no consigue reproducir. Una discretización más rigurosa permitiría reducir las incertidumbres asociadas a diferentes parámetros y una mejora del modelo. No obstante, con los datos disponibles actualmente y teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, se considera que con la escala espacial y temporal establecida se obtienen buenos resultados.
- Del análisis bibliográfico realizado se ha deducido que es necesario profundizar en el conocimiento de la interacción entre el sistema y el exterior. La información sobre la conexión entre las masas Requena-Utiel y Hoces de Cabriel presenta una contradicción, tal y como se ha mencionado en el apartado 4.2.1. Se trata de una zona con gran influencia topográfica, por lo que ha sido necesario estudiar diferentes hipótesis para obtener una solución aceptable. Aun así, se precisa de un estudio técnico que permita definir correctamente dicho contorno. Lo mismo ocurre con el límite este del sistema. Debido a su comportamiento dinámico es complicado determinar su funcionamiento por lo que es necesario profundizar en el conocimiento del mismo.

- En toda la superficie de estudio se encuentra una única estación de aforos ubicada en el municipio de Requena. El poco conocimiento de los caudales circulantes por el río dificulta la cuantificación de los posibles flujos que el sistema pueda ceder al río Magro, ya que la interacción entre los mismos no será la misma a lo largo del perfil del río. Es necesario conocer la magnitud de los flujos que la masa de agua subterránea drena hacia el río Magro.
- Actualmente la red de control piezométrico cuenta con series de datos muy reducidos. El número de puntos de observación es relevante, pero se debe proponer una red complementaria a la actual compuesta por puntos adicionales en las zonas más problemáticas.

Igualmente, con el propósito de solventar el problema de compatibilización entre los usos actuales y el estado ambiental del sistema, sería necesario aplicar las mejores prácticas disponibles por parte de los usuarios. A continuación, se proponen una serie de actuaciones posibles:

- La asignación futura de los recursos, incluso el otorgamiento de nuevas concesiones deberá ser estudiada de forma exhaustiva e individualizada, sobre todo en zonas de alto grado de explotación. Una de las posibles soluciones para concesiones futuras podría ser modificar el origen del recurso. Se podría estudiar la posibilidad de reutilizar las aguas residuales para la agricultura, lo que representaría un beneficio evidente, tanto desde el punto de vista de la gestión sostenible, como del medio ambiente.
- Los usuarios con derechos concesionales vigentes deberán cumplir estrictamente las dotaciones establecidas en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.
- Se propone promover la mejora de los sistemas de regadío mediante prácticas tendentes al ahorro del agua a través del aumento de la eficiencia. De la misma forma, se debe elevar la eficiencia de las redes de distribución para conseguir un notable ahorro del agua.

Asimismo, el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel expone la necesidad de un seguimiento anual de dicho plan para conocer la evolución de los recursos subterráneos y superficiales. Dicho informe se publicará en la página web de la CHJ¹ y mostrará la información sobre el nivel piezométrico en los puntos de control, así como la variación de los niveles del embalse de Forata. Asimismo, publicarán la información sobre la caracterización del año hidrológico en curso. En base a dicha caracterización, se establecerán las dotaciones correspondientes.

Por último, sería recomendable realizar una actualización del modelo a corto o medio plazo. En los próximos años se debe proceder a actualizar los datos de entrada y conocer así la evolución del sistema completo, sin que sea necesario la calibración correspondiente. Sin embargo, a medio plazo, se recomienda actualizar todos los datos, realizar estudios específicos para mejorar el conocimiento del sistema y calibrar el modelo, esto es, realizar un modelo completo actualizado.

¹ Página web de la Confederación Hidrográfica del Júcar: <http://www.chj.es/>

8. CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo ha sido construir un modelo de flujo subterráneo de la masa de agua Requena-Utiel y utilizarlo para predecir su comportamiento a futuro bajo las condiciones establecidas en el plan de explotación elaborado por la CHJ en diciembre del año 2016.

A lo largo del informe se han descrito detalladamente las fases que han formado el desarrollo del modelo. Las bases de datos y los sistemas de información geográfica han constituido una herramienta muy útil y eficiente para el procesado de los datos necesarios. Además, han permitido la introducción de dichos datos de manera cómoda y sencilla al programa MODFLOW.

Con el modelo construido y después de analizar la bondad de ajuste mediante indicadores estadísticos se deduce que, éste reproduce adecuadamente la piezometría del sistema, incluso los flujos conocidos y definidos en la conceptualización del modelo. Además, su aplicación ha permitido predecir el futuro, simulando escenarios con horizonte en el año 2030/31, bajo diferentes hipótesis.

A continuación, se citan las principales conclusiones extraídas de los resultados del modelo. Ellas son:

- El régimen estacionario (periodo 1940/41-1979/80) representa el estado del sistema en el que el cambio en el almacenamiento es prácticamente nulo. Tanto las entradas, como las salidas del sistema son del orden de $67 \text{ hm}^3/\text{año}$ y los acuíferos drenan un volumen de agua importante hacia el río Magro, por lo que éste se comporta como ganador a lo largo de toda su longitud.
- El funcionamiento del sistema a lo largo del periodo 1980/81-2015/16 está regido por el aumento progresivo del volumen extraído, debido al cambio de usos experimentado y a la expansión de las superficies regadas, lo que provoca una disminución del flujo que el sistema drena hacia los ríos y un descenso de las alturas piezométricas en algunas zonas. Asimismo, a lo largo de este periodo las precipitaciones sufren una ligera disminución con el tiempo. Se confirma que la masa de agua subterránea Requena-Utiel se encuentra en mal estado cuantitativo.

- En relación con la interacción río-acuífero, se observa que el volumen que el sistema drena al río Magro disminuye progresivamente, lo que puede constituir una de las posibles causas de la disminución de los niveles del embalse de Forata. Sin embargo, la disminución de la precipitación que se ha producido en los últimos años, puede ser la causa más influyente de la reducción de las aportaciones del río Magro.
- En cuanto a los escenarios simulados, el horizonte temporal considerado ha sido el año hidrológico 2030/2031. La aplicación del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel podría constituir una solución para los usuarios de la zona. No obstante, el estado del sistema empeoraría notablemente, alcanzando unas pérdidas de 35 hm³ anuales. Dicha situación se podría agravar bajo los efectos del cambio climático.
- Las extracciones más voluminosas, es decir, las presiones que más influyen sobre el estado del sistema se encuentran alrededor de los municipios más poblados. Es importante destacar que no toda la superficie se encuentra bajo el mismo grado de explotación. Hay zonas en las que apenas existen extracciones por lo que, se puede considerar que las series observadas en dichas zonas responden prácticamente a un régimen natural.

Asimismo, es importante citar las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo, así como en el proceso de modelación. Ellas son:

- La bondad de ajuste del modelo depende de la calidad de los datos de entrada. En este caso, el criterio del modelador juega un papel muy importante a la hora de elaborar el modelo conceptual, debido a que constituye la base del modelo numérico. No se debe olvidar que todos los resultados están sujetos a un grado de incertidumbre que es fundamental tener en cuenta a la hora de manejarlos.
- En cuanto al proceso de calibración del régimen influenciado, la condición inicial es uno de los datos de entrada más influyentes en los resultados. Una condición inicial errónea puede derivar en soluciones no coherentes con la realidad, incluso puede producir problemas de convergencia. Es importante que

dicha condición se base en datos físicos y reales del tiempo cero del periodo de estudio.

- Para medir la bondad de ajuste del modelo es necesario analizar los resultados obtenidos mediante indicadores estadísticos, que miden la relación entre los datos observados o reales y los simulados por el modelo. En el presente trabajo se han utilizado diferentes índices para contrastar los resultados obtenidos. En todos los casos el ajuste obtenido fue bueno.
- La aplicación de los modelos permite realizar simulaciones predictivas con la finalidad de conocer la respuesta del sistema a corto, medio o a largo plazo ante diferentes situaciones. Una de las ventajas de dichas simulaciones es que permiten gran flexibilidad a la hora de plantear situaciones. Es importante mencionar que, generalmente, se trata de situaciones “hipotéticas” por lo que están sujetas a un grado de incertidumbre que es necesario considerar.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, J. (s.f.). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- CEDEX. (s.f.). *Centro de Estudios Hidrográficos. Anuario de Aforos 2013-2014*. Recuperado el Marzo de 2017, de <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>
- CHJ. (1997). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar*. Valencia.
- CHJ. (2005a). *Informe para la Comisión Europea sobre los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Demarcación Hidrográfica del Júcar*.
- CHJ. (2005b). *Delimitación y caracterización de los acuíferos en las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar*.
- CHJ. *Sistemas de información (S.I.A. Júcar)*. Obtenido de http://idejucar.chj.es/SIG/services/IDEJucar_WMS/mapserver/WMSServer?
- CHJ. (2017). *Seguimiento del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel. Campaña del año hidrológico 2016/2017*.
- CHJ. (2001). *Redacción del Plan de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 08.24 Requena-Utiel*. Valencia.
- CHJ. (2009a). *Identificación y delimitación de las masas de agua superficial y subterránea. Ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar*.
- CHJ. (2014). *Proyecto del plan hidrológico de cuenca. Demarcación Hidrográfica del Júcar*. Valencia.
- CHJ. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021*. Valencia.
- CHJ. (2016). *Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel*. Valencia.
- CHJ. *Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H.)*. Recuperado el Marzo de 2017, de <http://saih.chj.es>

- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- IGME-DGA. (2005). *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias*. .
- IGME-DGA. (2009a). *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*.
- IGME-DGA. (2009b). *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*.
- IGME. (2006). *Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España*.
- IGME. (2009). *Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea*.
- IGME. (2011). *Informe sobre la caracterización básica de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar*.
- McDonald, M., & Harbaugh, A. (1984). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. U.S. Geological Survey.
- MAGRAMA. (Marzo de 2017). *Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR)*. Obtenido de <http://portal.mapama.gob.es/websiar/>
- MAGRAMA. (2014). Real Decreto 595/2014, de 11 de julio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. *Boletín Oficial del Estado*, 54787.
- MAGRAMA. (2016). Real Decreto 1/2016. *Boletín Oficial del Estado*, 2972.
- Pérez-Martín, M. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua*.
- Servicio de Evaluación Ambiental, SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el SEIA*.

Vázquez, S. P. (2017). *Mejoras de la componente subterránea y de la relación río-acuífero del modelo Patricial en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.*

Winston, R. B. (2009). *ModelMuse - A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST.* U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Virginia. Obtenido de <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29>.

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water A Single Resource.* U.S. Geological Survey (USGS).