



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Modelación matemática del flujo de agua subterránea de
los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.
Desarrollo de scripts con el uso de Python y Flopy

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Corales Chauca, Andy Joel

Tutor/a: Gómez Hernández, José Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LOS ACUÍFEROS REQUENA-UTIEL Y CABRILLAS-MALACARA. DESARROLLO DE SCRIPTS CON EL USO DE PYTHON Y FLOPY

**Intensificación:
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

Autor:
ANDY JOEL CORALES CHAUCA

Tutor:
J. JAIME GÓMEZ HERNÁNDEZ

SETIEMBRE, 2022



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 de los acuíferos Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. desarrollo de scripts con el uso de Python y Flopy

Título del TFM en inglés:

Mathematical modeling of the groundwater flow of the Requena-Utiel and Cabrillas-Malacara aquifers. Development of scripts with the use of Python and Flopy

Título del TFM en Valenciano: Modelació matemàtica del flux d'aigua subterrània dels aqüífers de Requena- Utiel i Cabrillas-Malacara. Desenrotllament de scripts amb l'ús de Python i Flopy

Alumno: Andy Joel Corales Chauca.

Tutor: J. Jaime Gómez Hernández

Cotutor/es:

Director experimental:

Fecha de Lectura: Setiembre, 2022

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

En la Comunidad Valencia se extiende una red extensa de masas de agua subterránea, que a través de su explotación ha permitido el desarrollo de diversas actividades productivas, sin embargo, el aprovechamiento intensivo más allá del punto de recuperación causara impacto negativo en todas las actividades que se realizan, es por ello la necesidad de conocer a detalle el comportamiento de las masas de agua, con el fin de tomar las acciones correctivas pertinentes en los diversos usos a fin de asegurar la el uso sostenible de dicho recurso.

La masa de agua subterránea Requena-Utiel (080.133) se sitúa en la parte central de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (Figura 1), presenta una superficie total de 987.90 km², de las cuales 966.40 km² (97.8%) se ubica en la provincia de Valencia y 21.50 km² (2.2%) a

la provincia de Cuenca. La otra masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara (080.139) tiene una superficie total de 286.34 km², límite por el noroeste con la masa de Requena-Utiel.

La red fluvial de mayor importancia es el río Magro, que resulta de la afluencia del río La Madre y la Rambla La Torre, fluyendo por la masa de Requena-Utiel de noroeste a sureste hacia parte de la masa de Cabrillas-Malacara. Existen aportaciones efímeras a las masas de agua, tales como los ríos Reatillo y Romeroso en Requena-Utiel y los ríos Buñol y Mijares en Cabrillas-Malacara.

El impacto que ha sufrido el acuífero de Requena-Utiel, en los últimos años, debido a la explotación de los recursos subterráneos y al incremento de pozos de extracción a lo largo del tiempo ha provocado una disminución notoria en los niveles piezométricos.

Es por ello, que con la aprobación del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar para el ciclo 2015-2021, se declarada en mal estado cuantitativo a la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Por tal motivo, es de gran importancia un conocimiento profundo de la masa de agua subterránea de Requena-Utiel en conjunto con Cabrillas-Malacara.

Para la construcción del modelo se utilizará el lenguaje de programación Python y FloPy, con la finalidad de optimizar tiempos de procesamiento y facilitar resultados rápidos que sirvan para la toma de decisiones y potencien la gestión de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.

El modelo desarrollado en MODFLOW por Pérez Membrives, (2019), que cuenta con parámetros calibrados y que reproducen los valores simulados con gran aproximación a los valores observados en los piezómetros, servirá como estudio base principal para este modelo. Posteriormente se realizarán escenarios de cambio climático para evaluar el comportamiento de los acuíferos para futuros cercanos.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

En la Comunitat Valenciana s'estén una xarxa extensa de masses d'aigua subterrània, que a través de la seua explotació ha permés el desenvolupament de diverses activitats productives, no obstant això, l'aprofitament intensiu mes alla del punt de recuperació causara impacte negatiu en totes les activitats que es realitzen, és per això la necessitat de conéixer a detall el

comportament de les masses d'aigua, amb la finalitat de prendre les accions correctives pertinents en els diversos usos a fi d'assegurar l'el ús sostenible d'aquest recurs.

La massa d'aigua subterrània Requena-Utiel (080.133) se situa en la part central de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer (Figura 1), presenta una superfície total de 987.90 km², de les quals 966.40 km² (97.8%) se situa a la província de València i 21.50 km² (2.2%) a la província de Conca. L'altra massa d'aigua subterrània Cabrillas-Malacara (080.139) té una superfície total de 286.34 km², limítrof pel nord-oest amb la massa de Requena-Utiel.

La xarxa fluvial de major importància és el va riure Magre, que resulta de l'afluència del va riure La Mare i la Rambla La Torre, fluïnt per la massa de Requena-Utiel de nord-oest a sud-est cap a part de la massa de Cabrillas-Malacara. Existeixen aportacions efímeres a les masses d'aigua, com ara els rius Reatillo i Romeroso a Requena-Utiel i els rius Buñol i Millars en Cabrillas-Malacara.

L'impacte que ha patit l'aqüífer de Requena-Utiel, en els ultimos anys, a causa de la explotacion dels recursos subterranis i a l'increment de pous de extraccion al llarg del temps ha provocat una disminucion notòria en els nivells piezometricos.

És per això, que amb la aprobacion del Pla Hidrològic de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer per al cycle 2015-2021, es declarada en mal estat quantitatiu a la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel. Per tal motiu, és de gran importància un coneixement profund de la massa d'aigua subterrànea de Requena-Utiel en conjunt amb Cabrillas-Malacara.

Per a la construccion del model s'utilitzarà el llenguatge de programació Python i FloPy, amb la finalitat d'optimitzar temps de processament i facilitar resultats ràpids que servisquen per a la presa de decisions i potencien la gestion de les masses d'aigua subterrània de Requena-Utiel i Cabrillas-Malacara.

El model desenvolupat en MODFLOW per Pérez Membrives, (2019), que compta amb parametres calibrats i que reprodueixen els valors simulats amb gran aproximacion als valors observats en els piezometros, servirà com a estudi base principal per a aquest model. Posteriorment es realitzaran escenaris de canvi climatico per a avaluar el comportament dels acuíferos per a futurs pròxims.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

In the Valencian Community, an extensive network of underground water masses extends, which through its exploitation has allowed the development of various productive activities, however, the intensive use beyond the recovery point will cause a negative impact on all the activities that are carried out, which is why it is necessary to know in detail the behavior of the water masses, in order to take the pertinent corrective actions in the various uses in order to ensure the sustainable use of said resource.

The mass of groundwater Requena-Utiel (080.133) is located in the central part of the Júcar Hydrographic Demarcation (Figure 1), it has a total area of 987.90 km², of which 966.40 km² (97.8%) is located in the province from Valencia and 21.50 km² (2.2%) to the province of Cuenca. The other groundwater mass Cabrillas-Malacara (080.139) has a total area of 286.34 km², bordering to the northwest with the Requena-Utiel mass.

The most important fluvial network is the Magro River, which results from the inflow of the La Madre River and the Rambla La Torre, flowing through the Requena-Utiel mass from northwest to southeast towards part of the Cabrillas-Malacara mass. There are ephemeral contributions to water masses, such as the Reatillo and Romero rivers in Requena-Utiel and the Buñol and Mijares rivers in Cabrillas-Malacara.

The impact that the Requena-Utiel aquifer has suffered in recent years, due to the exploitation of underground resources and the increase in extraction wells over time, has caused a notorious decrease in piezometric levels.

That is why, with the approval of the Hydrological Plan of the Júcar Hydrographic Demarcation for the 2015-2021 cycle, the Requena-Utiel groundwater body was declared in poor quantitative condition. For this reason, a deep knowledge of the Requena-Utiel groundwater mass together with Cabrillas-Malacara is of great importance.

For the construction of the model, the programming language Python and FloPy will be used, in order to optimize processing times and facilitate quick results that serve for decision making and enhance the management of the groundwater bodies of Requena-Utiel and Cabrillas-Malacara.

The model developed in MODFLOW by Pérez Membrives, (2019) which has calibrated parameters and reproduces the simulated values with great approximation to the values

observed in the piezometers, will serve as the main base study for this model. Subsequently, climate change scenarios will be carried out to evaluate the behavior of the aquifers for the near future.

Palabras clave español (máximo 5): Phytón y FloPy, Modelación matemática, Flujo subterráneo, Masa de agua subterránea Requena-Utiel.

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

Palabras clave inglés (máximo 5): Phytón and FloPy, Mathematical modeling, Groundwater flow, Requena-Utiel groundwater mass.

Agradecimientos

Deseo agradecer a Dios sobre todas las cosas, permitiéndome dar este gran paso en mi vida profesional, a mis padres Teodoro y Amada por las muestras de afecto incondicional, es para mí sumamente gratificante dedicarles a ellos este trabajo.

De forma especial agradecer al Dr. J. Jaime Gómez Hernández, por brindarme los conocimientos necesarios, por ser su paciencia y guía constante durante el tiempo que demandó este trabajo, por ser el pionero de grandes investigaciones que contribuyen al campo de la hidrogeología. También, pero no menos importante, al profesor Eduardo F. Cassiraga, quien con su sapiencia y buena disposición me brindó su apoyo y las herramientas en el desarrollo de este trabajo.

Y sin dejar atrás a mis familiares y amigos, por sus constantes muestras de afecto durante el transcurso de esta formidable experiencia universitaria.

Contenido

1. Introducción	12
1.1. Justificación y objetivos.....	12
1.2. Antecedentes	13
1.3. Organización del documento	16
2. Estado del arte	17
2.1. Modelación matemática en agua subterránea	19
2.2. Lenguajes de programación para modelar aguas subterráneas	19
2.3. Ecuaciones que gobiernan el flujo y transporte	20
2.3.1. Solución de la ecuación de flujo	20
3. Modelo conceptual	21
3.1. Localización del área de estudio	21
3.2. Modelo digital del terreno (MDT)	22
3.3. Contexto hidrológico	22
3.3.1. Climatología.....	22
3.3.2. Recursos hídricos superficiales.....	25
3.4. Contexto hidrogeológico.....	28
3.4.1. Límites del sistema	28
3.4.2. Unidades hidrogeológicas.....	29
3.4.3. Dominios hidrogeológicos	30
3.5. Recarga	31
3.6. Bombeos	32
3.7. Modelo hidrológico conceptual	35
4. Selección del código	37
5. Implementación del modelo	38
5.1. Discretización y diseño de malla	38
5.1.1. Diseño de la malla.....	38
5.1.2. Discretización temporal	40
5.2. Condiciones de contorno	40
5.2.1. Límites laterales.....	40
5.2.2. Cauces superficiales.....	42
5.2.3. Recarga por infiltración	43
5.3. Condición inicial.....	44

5.4. Parámetros hidrogeológicos.....	45
5.5. Bombeos	47
6. Calibración y análisis de resultados obtenidos.....	50
6.1. Ejecución del modelo y resultados	51
6.2. Pruebas de bondad de ajuste	65
7. Aplicación del modelo.....	68
7.1. Escenario 1.....	68
7.2. Escenario 2.....	68
7.3. Escenario 3.....	69
7.4. Escenario 4.....	70
7.5. Análisis del balance del sistema en los diferentes escenarios	71
7.6. Análisis del balance por zonas en los diferentes escenarios.....	72
7.7. Evolución piezométrica en los diferentes escenarios simulados:	76
8. Recomendaciones y prospectiva	81
9. Conclusiones	82
10. Bibliografía.....	84
Anejo 1: Script de modelo de flujo	87
Anejo 2: Script de generación de gráficos - Pos procesamiento	99
Anejo 3: Script de reporte de balance de aguas del sistema.....	103
Anejo 4: Script de reporte de balance por zonas	107
Anejo 5: Script de reporte de niveles simulados	111

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros hidrogeológicos por zonas y capas.....	46
Tabla 2: Parámetros para el paquete de procesamiento DE4.....	51
Tabla 3: Entradas y salidas del balance global.....	52
Tabla 4: Promedio anual del balance del sistema	53
Tabla 5: Componentes del balance por zonas	53
Tabla 6: Promedio anual del balance por zonas	58
Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste del modelo	68
Tabla 8: Promedio anual del balance global	71
Tabla 9: Resumen de resultados de escenarios	73

Índice de Figuras

Figura 1: Localización de la zona de estudio	21
Figura 2: Modelo digital del terreno	22
Figura 3: Temperatura media anual.	23
Figura 4: Precipitación mensual acumulada, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con el uso de datos de la red SIAR	24
Figura 5: Precipitación anual acumulada, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con el uso datos de la red SIAR.....	24
Figura 6: Pecipitación media, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con datos con el uso de la red SIAR.....	25
Figura 7: Sistema fluvial en las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas- Malacara.....	26
Figura 8: Registro de caudales en la estación de aforos de Requena.....	26
Figura 9: Caudales medios mensuales en la estación de aforos de Requena (2004-2017)	27
Figura 10: Embalses proximos a las masas de agua subterránea de estudio.....	27
Figura 11: Volúmenes mensuales de entradas, salidas y almacenamiento (embalse de Forata)	28
Figura 12: Límites del sistema	29
Figura 13: Dominios hidrogeológicos.....	30
Figura 14: Zonificación de la recarga	31
Figura 15: Evolución de la recarga anual en la zona de estudio	32
Figura 16: Pozos de extracción destinados a las demandas	33
Figura 17: Pozos de extracción según el tipo de demanda.....	34
Figura 18: Agua extraída en las masas de agua subterránea de estudio.....	34
Figura 19: Mapas piezométricos. Fuente: CHJ (2015)	36
Figura 20: Modelo hidrogeológico conceptual	37
Figura 21: Discretización horizontal y dominio del modelo.....	39
Figura 22: Discretización vertical del modelo a lo largo de la fila 20	39
Figura 23: Conductancia en los límites del modelo	41
Figura 24: Valores piezométricos en los límites del modelo	41
Figura 25: Conductancia en los ríos del modelo	42
Figura 26: Recarga por infiltración en el modelo	43

Figura 27: Distribución de la recarga por los retornos de riego.....	44
Figura 28: Zonificación de parámetros hidrogeológicos basada en el modelo de Fernández-Urizar, (2017).....	45
Figura 29: Parámetros hidrogeológicos en FloPy	48
Figura 30: Pozos de bombeo por capas en FloPy.....	49
Figura 31: Ubicación de piezómetros observados en la calibración del modelo	51
Figura 32: Balance global del sistema ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	52
Figura 33: Balance hidrogeológico en el contorno con Mira ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	54
Figura 34: Balance hidrogeológico en el contorno con Buñol-Cheste ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	55
Figura 35: Balance hidrogeológico en la rambla de la Torre ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	55
Figura 36: Balance hidrogeológico en el río Madre ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	56
Figura 37: Balance hidrogeológico en el río Magro ($\text{hm}^3/\text{año}$)	57
Figura 38: Balance hidrogeológico en el río Buñol ($\text{hm}^3/\text{año}$)	57
Figura 39: Valores de los piezómetros observados y simulados.....	61
Figura 40: Curvas hidroisohipsas en FloPy.....	62
Figura 41: Direcciones del flujo en FloPy	63
Figura 42: Secciones transversales del nivel piezométrico en la dirección “X”	64
Figura 43: Secciones transversales del nivel piezométrico en la dirección “Y”	65
Figura 44: Análisis estadístico de los valores observados y simulados de los niveles piezométricos	66
Figura 45: Frecuencia relativa de los residuos	67
Figura 46: Reducción de retornos de riego en el escenario 2.....	69
Figura 47: Reducción de recargas por infiltración en el escenario 3	70
Figura 48: Reducción de recargas por infiltración en el escenario 4	70
Figura 49: Balance medio del sistema en los diferentes escenarios simulados	72
Figura 50: Balance medio por zonas para el periodo 2016/17-2026/27 en los diferentes escenarios	75
Figura 51: Variación de los niveles piezométricos en los diferentes escenarios	76
Figura 52: Evolución de los niveles piezométricos en los diferentes escenarios.....	80

1. Introducción

Desde finales del siglo XX se ha producido de manera significativa la explotación de las masas de agua subterránea en todo el mundo (Sahuquillo et al., 2008) debido a la disminución de los recursos hídricos superficiales, existiendo muchas experiencias alrededor del mundo de sobreexplotación de los recursos subterráneos generando problemas en el terreno, contaminación de las aguas, etc., siendo necesario definir acciones que permitan una gestión sostenible de los mismos.

Se estima que en España cerca del 80% de la demanda de agua corresponde a la agricultura, un 14% al abastecimiento urbano y el 6% restante es la demanda de la industria. Estas demandas son cubiertas en su gran mayoría gracias a los recursos hídricos superficiales, pero estos no resultan suficientes en algunas zonas por lo que se hace uso de los acuíferos a fin de satisfacer la demanda de los distintos usos, siendo una de estas zonas la Comunidad Valenciana.

La Comunidad Valenciana se caracteriza por un clima típicamente mediterráneo, constituyendo el agua subterránea uno de los pilares para el desarrollo de diversas actividades de entre ellas la agricultura.

1.1. Justificación y objetivos

Para una correcta gestión de los recursos hídricos, debemos conocer y cuantificar las fuentes disponibles del mismo, de este modo el conocimiento de un recurso que es prácticamente imperceptible a simple vista resulta trascendental en aquellas regiones áridas, siendo este una parte trascendental del ciclo hidrológico, pues constituye un flujo base o caudal base que transcurre por el cauce de los ríos e impide que este llegue a secarse en épocas de estiaje. Ante los graves problemas de agua que se enfrenta en las zonas áridas, el ser humano ha desarrollado métodos y técnicas que le han permitido extraer el agua del suelo constituyéndose como la principal fuente de abastecimiento para los usos urbanos como agrícolas.

Tomando como ejemplo la Comunidad Valenciana, el uso del agua subterránea se ha visto incrementado en gran medida durante las últimas décadas generando un descenso preocupante de los niveles freáticos, como es el caso de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas- Mala Cara objetos del presente trabajo.

Es así que, con la aprobación del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar para el ciclo 2015-2021, se declarada en mal estado cuantitativo a la masa de agua subterránea

Requena-Utiel. Para recuperar un estado cuantitativo aceptable de la masa de agua antes mencionada es necesario el conocimiento de la misma, de forma que permitan adoptar las acciones y medidas pertinentes motivo por el cual en el presente **trabajo tiene por objeto elaborar un modelo matemático, que permita tener un conocimiento de la masa de agua como las interacciones entre río-acuífero, los efectos causados por los bombeos y la efectividad de las reservas asignadas utilizando lenguajes de programación como Python, a fin de optimizar los tiempos de procesamiento del modelo y brindar respuestas rápidas ante decisiones que aporten a la gestión de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.**

Para dar cumplimiento al objetivo del presente trabajo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el propósito del modelo, en base a los requisitos específicos en el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel (CHJ, 2016) aprobado.
- Desarrollar un modelo conceptual del comportamiento de los acuíferos, considerando la mayor cantidad de información del sistema.
- Diseñar y construir el modelo numérico con el código MODFLOW utilizando Python como lenguaje de programación a través de la Plataforma Jupyter Lab.
- Simular escenarios de cambio climático con el propósito de conocer el comportamiento de las masas de agua subterránea.

1.2. Antecedentes

Con la finalidad de mejorar la gestión que se hace de las aguas subterráneas ha sido necesaria la elaboración de estudios que permitan la evaluación de la evolución del estado de las masas de agua subterránea Requena -Utiel y Cabanillas-Malacara, constituyéndose en un gran avance en cuanto al estado del arte de ambos acuíferos en la Comunidad Valenciana.

Los planes de explotación de las masas de agua subterránea buscan garantizar el suministro de los derechos vigentes, impedir posibles deterioros de las aguas por actividades o procesos contaminantes, reforzar las acciones para restaurar el estado cuantitativo y cualitativo de las masas de aguas actuales (CHJ, 2001).

Como parte de la profundización del conocimiento de estado de la masa de agua Requena-Utiel se han elaborado varios planes hidrológicos, entre los cuales destacamos los siguientes:

- Plan hidrológico de la Cuenca del Júcar aprobado con Real Decreto 1664/1998, de fecha 24 de julio de 1998.
- Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2009-2015 aprobado con Real Decreto 595/2014, de fecha 11 de julio 2014
- Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021 aprobado con Real Decreto 1/2016, de fecha 8 de enero de 2016

En cumplimiento de lo establecido en la Directiva Marco del Agua (DMA), la Dirección General del Agua se realizó la primera demarcación de las masas de agua subterránea para cuyo caso se elaboró el *“Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias”* donde se considera la masa de agua subterránea 080.026 Requena-Utiel. Posteriormente con la aprobación de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), se indican criterios técnicos para una mejor caracterización de los acuíferos, siendo oportuna la actualización de los límites contemplado en el estudio del año 2005. Adaptándose las correspondientes divisorias a las unidades litológicas del Mapa Litoestrogáfico y de Permeabilidad de España (IGME, 2006).

Por otro lado, el IGME trabajó una caracterización adicional, que permitió mejorar la adaptación ya realizada (IGME-DGA, 2009), asimismo se consideró las masas en riego que se encuentran dentro de la Confederación Hidrográfica del Júcar (IGME-DGA, 2009). El conjunto de estos trabajos permitió obtener un gran conocimiento general de la hidrogeología en el ámbito de la Comunidad Valenciana que permitió una mejor caracterización de las masas de agua subterránea de entre ellas los acuíferos Requena-Utiel y Cabanillas-Malacara.

A la par se trabajó el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar correspondiente al periodo 2009-2015, que establece una serie de condiciones y medidas que se requieren para mejorar la gestión sostenible del sistema, considerando que el problema radica en el incremento de las extracciones, se definió una dotación de 450 m³/ha/año para el cultivo de la vid. Esto ha generado una incomodidad en los usuarios por lo que ellos consideran una muy baja dotación de agua para el cultivo de la vid en años secos, requiriendo el incremento de las mismas para los periodos de sequías.

En el último quinquenio, el plan aprobado establece una dotación bruta de 1,250 m³/ha/año en aquellos acuíferos que reflejen disminuciones piezométricas por bombeos o sean calificados en malas condiciones cuantitativas. Asimismo, producto de acuerdos entre los usuarios y las

Administración de la CHJ se incrementó la dotación bruta media hasta los 600 m³/ha/año para el cultivo de la vid.

Por último, en el 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 /años que se establecen como reserva se distribuyen de la siguiente manera:

- 5.5 hm³/año se reserva para abastecer a los usuarios con concesiones vigentes y futuras para regadío de cultivos de vid.
- 0.5 hm³/año se destinan para mejorar la garantía de los regadíos superficiales con derechos concesionales vigentes.
- El volumen restante satisficará el crecimiento de la demanda urbana y la industria de la zona.

Es preciso señalar que el art. 20.C.13 de la mencionada normativa prevé una reserva adicional de 2 hm³/año para nuevos usos. Ante la necesidad de contar con un plan de explotación actualizado de la masa de agua subterránea Requena-Utiel se aprueba el plan según se dispone en el PHJ 2015-2021 con fecha diciembre de 2016, donde se indica la necesidad de elaborar un modelo numérico a fin de predecir el comportamiento y evolución del sistema.

Uno de los primeros modelos numéricos se elaboró con Visual Modflow en la versión 2.8.2, durante la elaboración del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 Requena-Utiel, que permitió un conocimiento detallado y un profundo análisis del funcionamiento del sistema de la masa de agua en el año 2001. Este modelo se realizó en estado estacionario considerando la extracción efectuada por 630 pozos de bombeo cuantificada en 22.4 hm³/año. Posteriormente, se realizó la modelación considerando las solicitudes de derechos otorgados que se tramitaban en el año 2000, resultando un aumento hasta 23.85 hm³/año, sustentado en el incremento de 96 pozos de bombeos. También se consideró un escenario de demandas futuras donde se contemplaba la transformación de parcelas de viñedo de secano a regadío antes del 2008, el resultado del citado escenario mostró que en esas condiciones la masa de agua se encontraría en sobreexplotación. Estos resultados demuestran la necesidad de prestar atención

cuantitativa al acuífero, por los cambios de los usos del suelo que se vienen dando durante los últimos años, razón a la cual se debe actualizar a corto y mediano plazo el plan de explotación.

Otras investigaciones que brindar soporte a este documento son:

Mercé Gallo, (2015) establece como conclusiones que los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara abastecen al río Magro y tienen un comportamiento natural, sin embargo, no llega suficiente agua al embalse de Forata, asumiendo que están drenando hacia otros lados. Asimismo, Fernández Urizar, (2017) utiliza un modelo de flujo subterráneo para predecir el comportamiento a futuro según el plan de explotación del CHJ, elaborado en diciembre del 2016.

El incremento de extracciones de agua subterránea en la zona de los acuíferos Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, ha repercutido en la disminución del flujo en el acuífero, el cual drena a los cauces superficiales. También los cambios en la climatología, es decir, el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones han impactado negativamente en el almacenamiento de agua en el acuífero, (Pérez Membrives, 2019).

El modelo matemático que implementar está basado en este último, por ser el modelo más actualizado y contar con buenas calibraciones, las cuales son requeridas para el modelamiento numérico del flujo de los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara mediante lenguajes de programación en Python y FloPy.

1.3. Organización del documento

Tal como se menciona al principio de la sección, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo matemático que permita analizar como se comporta la masa de agua como las interacciones entre río-acuífero, los efectos causados por los bombeos y la efectividad de las reservas asignadas utilizando lenguajes de programación como Python. En la sección 1 se muestra la justificación, objetivos a alcanzar luego de realizar del trabajo de fin de máster, antecedentes y la descripción de la organización del documento.

La sección 2 se presenta el estado del arte de los modelos numéricos para la modelación de acuíferos, principalmente haciendo uso de lenguajes de programación. En la sección 3 se describe el área de estudio, climatología, hidrología e hidrogeología existentes dentro de los límites de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. Esta

información permitirá desarrollar un modelo conceptual que servirá de soporte inicial para la elaboración del modelo matemático.

La descripción del código seleccionado para la elaboración del modelo numérico para el caso de estudio se presenta en la sección 4 del presente trabajo. En la sección 5 se describe la metodología usada para el uso de MODFLOW, así como los paquetes utilizados y el procesamiento utilizando Python a través de la biblioteca FloPy.

En la sección 6, se ejecuta el modelo y se analizan los resultados para determinar si el modelo reproduce de forma cercana los valores observados en campo. Posteriormente se realizan escenarios climáticos para evaluar el comportamiento del modelo de forma predictiva, presentada en la sección 7.

En la sección 8, se presentan recomendaciones y prospectivas para realizar mejoras continuas al modelo. La sección 9 corresponde a las conclusiones obtenidas en el estudio, en relación con los objetivos planteados.

En la sección 10, se muestran las referencias bibliográficas utilizadas. La sección 11 se muestran los anejosm que corresponden a los scripts desarrollados para la modelación matemática del flujo de agua subterránea de los acuíferos Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara y el post-procesamiento de resultados.

2. Estado del arte

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) tiene como objetivo promover la gestión conjunta y el desarrollo de los recursos naturales relacionados con el agua para un mejor uso económico y un mayor bienestar social sin dañar el medio ambiente (Silva Hidalgo et al., 2006), es así que la modelación matemática cobra gran importancia en el desarrollo de capacidades técnicas a fin de mejorar la gestión que se realiza del recurso.

El cambio sufrido en estas últimas décadas en la modelación ha creado un sinnúmero de oportunidades para la optimización operativa y económica de las decisiones relacionadas con la gestión del agua. También existen avances informáticos que permiten un modelamiento más baratos, más accesibles, más fáciles de usar e interpretar (DGIRH, 2018).

Bassanezi & Biembengut (1997) indican que el modelado matemático ha sido utilizado tradicionalmente por aquellos conocidos como matemáticos aplicados como un proceso dinámico que les ayuda a comprender problemas y situaciones específicas, en las ramas de la

ciencia como la Física, Química o Biológica (Lucía Brito-Vallina et al., 2011). Estos investigadores a menudo buscan modelos matemáticos capaces de tener en cuenta situaciones del mundo real, en particular teniendo en cuenta posibles posiciones relevantes para el sujeto de investigación. Formalizar problemas en términos matemáticos es a menudo el paso más difícil en el modelado matemático y debe aprenderse con la experiencia. Es necesario tener presente que el tener una buena formación matemática no significa necesariamente que los investigadores tengan éxito en su trabajo de modelación.

Por supuesto, el modelo matemático es una analogía incompleta. Es decir, refleja parte de las propiedades del sistema modelado. Al mismo tiempo, los modelos matemáticos se caracterizan por una generalidad suficiente para describir un objeto completo. Por otro lado, los modelos matemáticos no requieren grandes costos de material y se pueden hacer en un tiempo relativamente corto realizando el proceso de modelado utilizando herramientas informáticas modernas (Lucía Brito-Vallina et al., 2011).

El avance tecnológico de las computadoras ha permitido el análisis de los procesos hidrológicos para brindar resultados más confiables y cuantitativos para la planificación, uso y operación de los sistemas hidráulicos. De hecho, a partir de los años 1960, el desarrollo de computadoras extremadamente rápidas con grandes cantidades de memoria llevó a la creación de muchos modelos que simulaban una o más partes del ciclo hidrológico. Esto gracias a la invención de los circuitos integrados impresos. Desde entonces, el número de modelos hidrológicos ha aumentado cada día. Porque para cualquier investigador, hace que sea fascinante y atractivo "jugar" con números y simular los procesos físicos de la naturaleza. Sabe cómo manejar esta maravilla moderna que es una computadora electrónica (CEPAL, 1983).

Según Döll et al., (2012): conocer el movimiento del agua continental y los sistemas de almacenamiento de agua dulce en varios compartimentos (hielo, nieve, suelo, agua subterránea, agua superficial, incluidos lagos y humedales) (Güntner et al., 2007), proporciona un mejor entendimiento del ciclo a global del agua. Esto proporciona una mejor evaluación de las fuentes de agua dulce y cómo se ven afectadas por los cambios globales.

2.1. Modelación matemática en agua subterránea

Es muy importante tener presente cada vez que se modela que ***“la modelación matemática hidrogeológica sustentada en una correcta conceptualización del sistema acuífero se transforma en una valiosa herramienta”***, tal como se menciona en la web Cooperación Española Conocimiento/Interconecta.

Döll et al. (2012) desarrollaron una serie temporal de extracciones y usos consuntivos de aguas subterráneas y superficiales a escala global, lo que les permite por primera vez, a escala global, indicar dónde y cuándo las extracciones de agua reducen o incrementan el almacenamiento de aguas subterráneas o superficiales.

Es importante que durante la modelación se tengan presente los escenarios de cambio climático en el periodo 2016-2026. Hughes et al. (2021) tomando como referencia el modelo de recarga del continente británico (BM) para elaborar una serie temporal de potencial entre los años 1950 – 2099 para Reino Unido, determinan que, las recargas tienen una tendencia a aumentar o serán similares a la situación actual para el periodo comprendido entre 2050 al 2080.

Döll & Fiedler (2008), en su artículo *“Global-scale modeling of groundwater recharge”* estimaron en promedio la recarga de agua subterránea a largo plazo utilizando una escala global, corresponde aproximadamente a 1266 km³/año para un clima normal en el periodo 1961-1990, lo que equivale al 32 % de los recursos hídricos renovables, asimismo señalan que los recursos hídricos subterráneos renovables promedio per cápita de los países rondan desde los 8m³/(cápita año) en Egipto a más de 1 millón m³/(cápita año) en las Islas Maldivas, llegando a un promedio mundial de 2091m³/(año cápita) en el año 2000.

2.2. Lenguajes de programación para modelar aguas subterráneas

Han tenido gran acogida durante varios años las interfaces gráficas de usuario; sin embargo, para trabajos que poseen grandes volúmenes de información resultan inconvenientes al generar un gran gasto de recursos computacionales, es así que el empleo de lenguajes de programación facilita el análisis de sistemas complejos que de otra manera serían difíciles o prácticamente imposibles de realizar (M. Bakker et al., 2016).

Python es un lenguaje que ha crecido con bastante rapidez en los últimos años siendo muy común encontrarlo en numerosas aplicaciones científicas (Bakker & Kelson, 2009; Pérez et al., 2011) se puede ejecutar MODFLOW a través de FloPy que contiene los módulos de

MODFLOW, MT3DMS, SEAWAT, SUTRA y otros, (Bakker, 2014), de igual manera, debido a la variedad de bibliotecas que posee, se puede utilizar para diversos tipos de análisis e ingreso de datos.

Una de las cosas buenas de crear modelos en Python es que es muy fácil cambiar una o dos variables y cambiar, por ejemplo, la resolución de la cuadrícula de su modelo.

2.3. Ecuaciones que gobiernan el flujo y transporte

La solución de las fórmulas matemáticas que rigen el flujo y transporte de solutos en acuíferos se basan en el principio de conservación de la masa (ya sea aplicado al caudal o al soluto), teniendo como punto de partida o referencia un volumen de control y realizando un balance alrededor del citado punto (Konikow, 2003).

2.3.1. Solución de la ecuación de flujo

La secuencia para determinar el flujo o caudal que atraviesa un medio poroso fue estudiada por Henry Darcy, quien propuso una relación que posteriormente llevaría su nombre: la ley de Darcy, que relaciona las propiedades del agua, de los medios porosos y el gradiente. Utilizando notación tensorial, la ecuación se expresa tal como sigue

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}, \quad (1)$$

donde q_i [LT^{-1}] representa el flujo; K_{ij} [LT^{-1}] corresponde a la conductividad hidráulica del medio poroso y por último h [L] es el nivel piezométrico.

La ecuación de flujo es descrita por Freeze & Cherry (1979) como resultado de la combinación de las ecuaciones de conservación de la masa y la ley de Darcy. Considerando constante la densidad del fluido (Fernández Torroba, 2004), la ecuación en derivadas parciales de flujo en estado estacionario en un medio poroso saturado anisotrópico queda

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0. \quad (2)$$

Mientras que para el caso de flujo transitorio, la ecuación es

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W^*, \quad (3)$$

donde K_x , K_y , K_z corresponden a las conductividades hidráulicas en las tres direcciones en $[LT^{-1}]$, h representa la carga hidráulica o altura piezométrica en $[L]$, S_s corresponde al almacenamiento específico en $[L^{-1}]$, t es el tiempo en $[T]$ y por último W^* corresponde al flujo volumétrico por unidad de volumen (el signo está sujeto a si sale o entra flujo al sistema)

3. Modelo conceptual

En esta sección se describe el área de estudio, climatología, hidrología e hidrogeología existentes dentro de los límites de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, esta información permitirá desarrollar un modelo conceptual que será el soporte inicial para el desarrollo del modelo matemático.

3.1. Localización del área de estudio

La masa de agua subterránea Requena-Utiel (080.133) se sitúa en la parte central de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (figura 1), presenta una superficie total de 987.90 km², de las cuales 966.40 km² (97.8%) se ubica en la provincia de Valencia y 21.50 km² (2.2%) a la provincia de Cuenca. La otra masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara (080.139) tiene una superficie total de 286.34 km², limítrofe por el noroeste con la masa de Requena-Utiel.

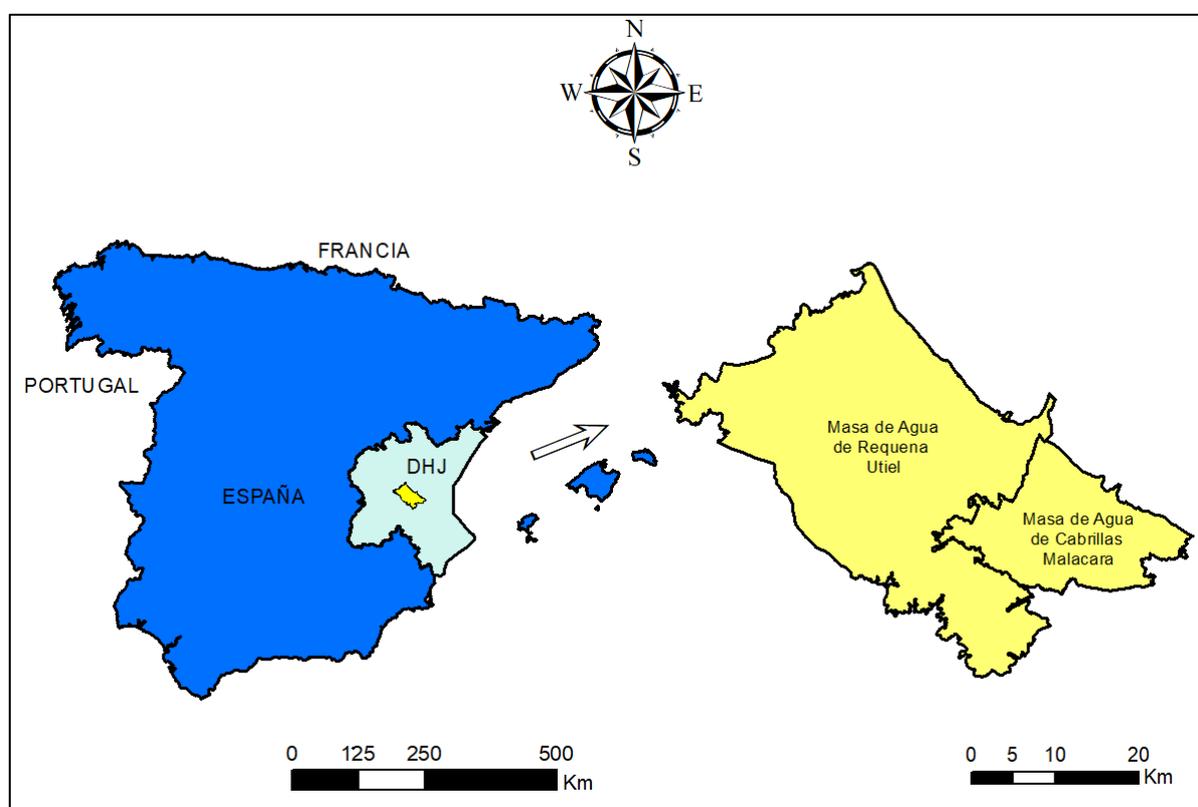


Figura 1: Localización de la zona de estudio

3.2. Modelo digital del terreno (MDT)

El MDT con una definición de 5 m por 5 m se obtuvo del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscador.do#>), la altitud varía entre los 559 y los 1010 msnm, con una altitud media de 750 m en el área de estudio (véase la figura 2).

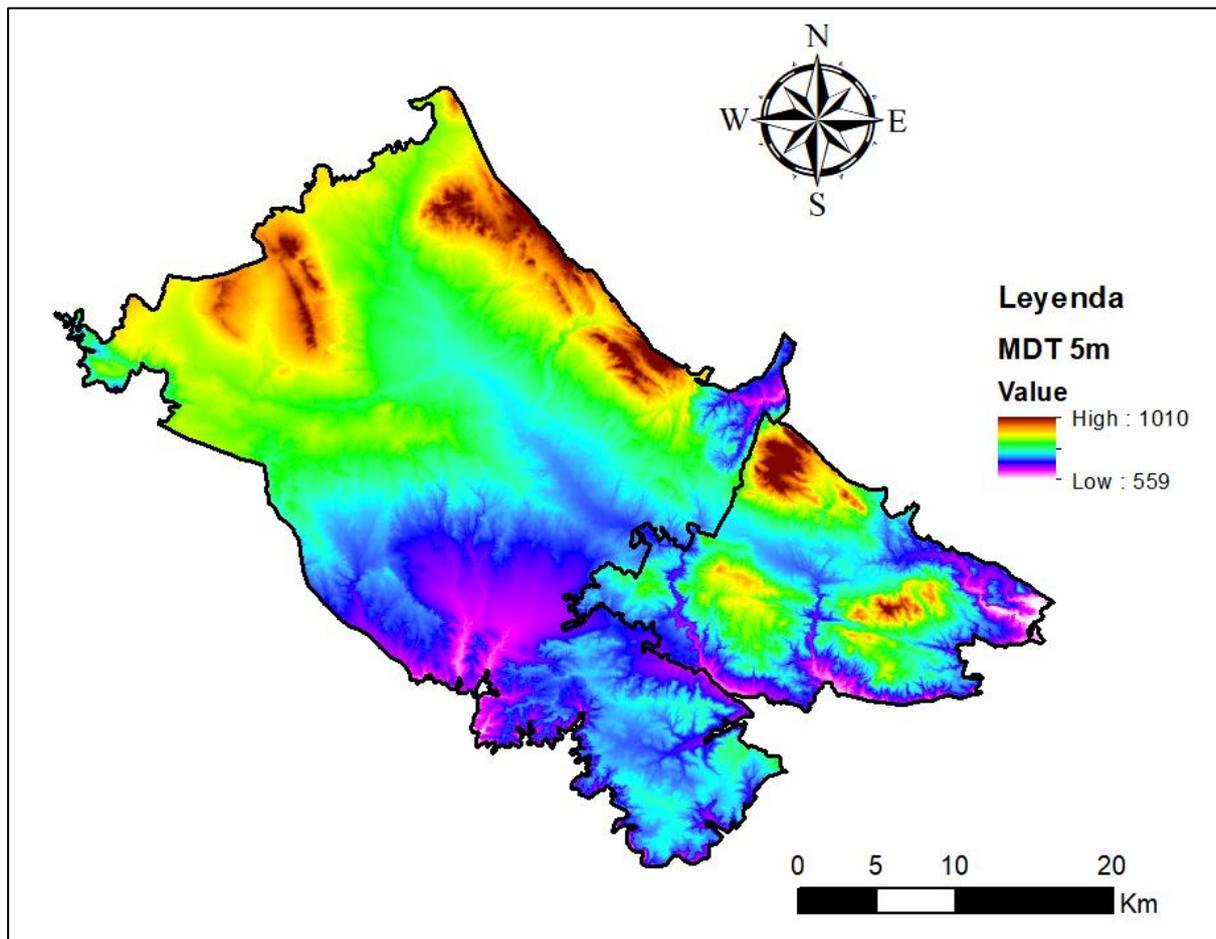


Figura 2: Modelo digital del terreno

3.3. Contexto hidrológico

3.3.1. Climatología

El clima es mediterráneo continentalizado, con inviernos largos y fríos, heladas tardías, veranos calurosos, tormentas y granizo. Las lluvias más abundantes se dan en otoño y primavera.

Temperatura

La fuente de datos de climatológicos fue extraída del municipio de Requena a través del sistema SIAR (Sistema de Información Agroclimático para el regadío), proporcionando datos para el análisis de esta zona de estudio.

El registro de la temperatura de la estación Requena (figura 3) comprendida en el periodo 2001/02 a 2015/16, presenta una temperatura media de 13°C, con temperaturas máximas de hasta 37°C en épocas de verano y temperaturas mínimas de -3°C en épocas de invierno.

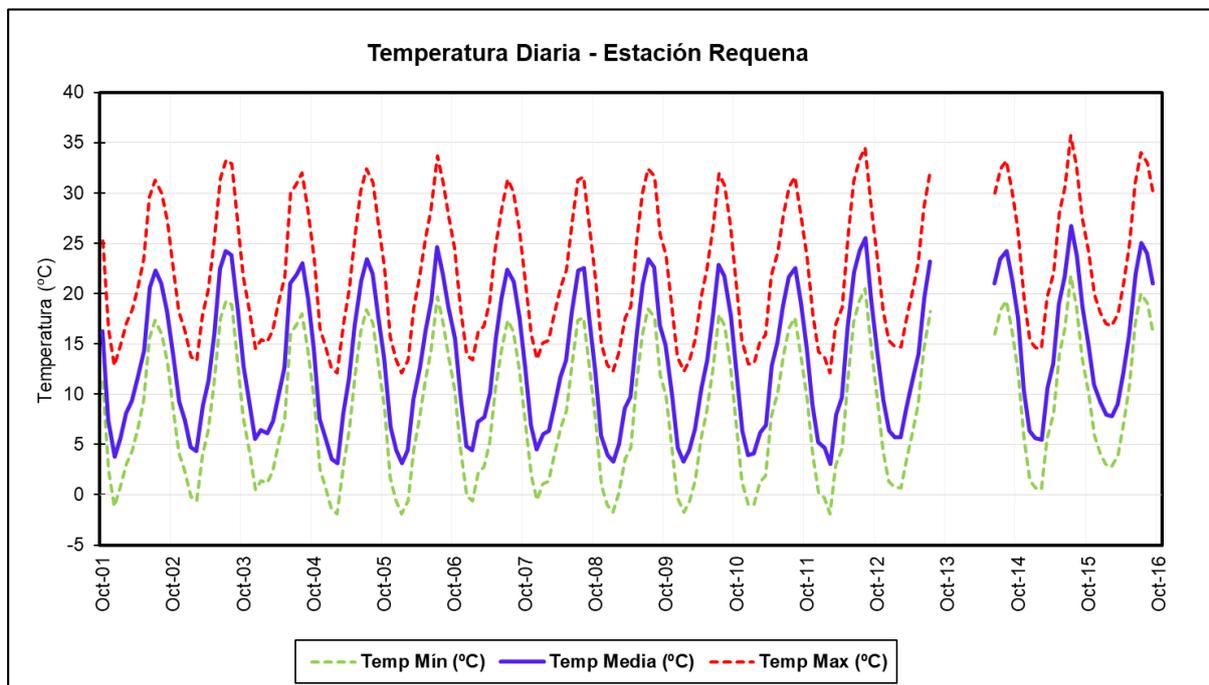


Figura 3: Temperatura media anual.

Precipitación

La información extraída de la red SIAR muestra precipitaciones discontinuas a lo largo del periodo 2001/02 a 2015/16 y contando con información incompleta en algunos meses de 2013/14 (figura 4). Se observan precipitaciones máximas diarias de 139 mm en octubre del 2008 y siendo el año 2019 el más lluvioso con 576 mm (figura 5).

En la figura 6, se observa que los meses con mayor presencia de lluvias son abril, mayo, setiembre y octubre (siendo mayo y octubre los meses de cosecha de la uva) con precipitaciones promedio de 48 mm, mientras que los meses de julio y agosto con precipitaciones entre los 10 y los 20 mm representan la época de estiaje.

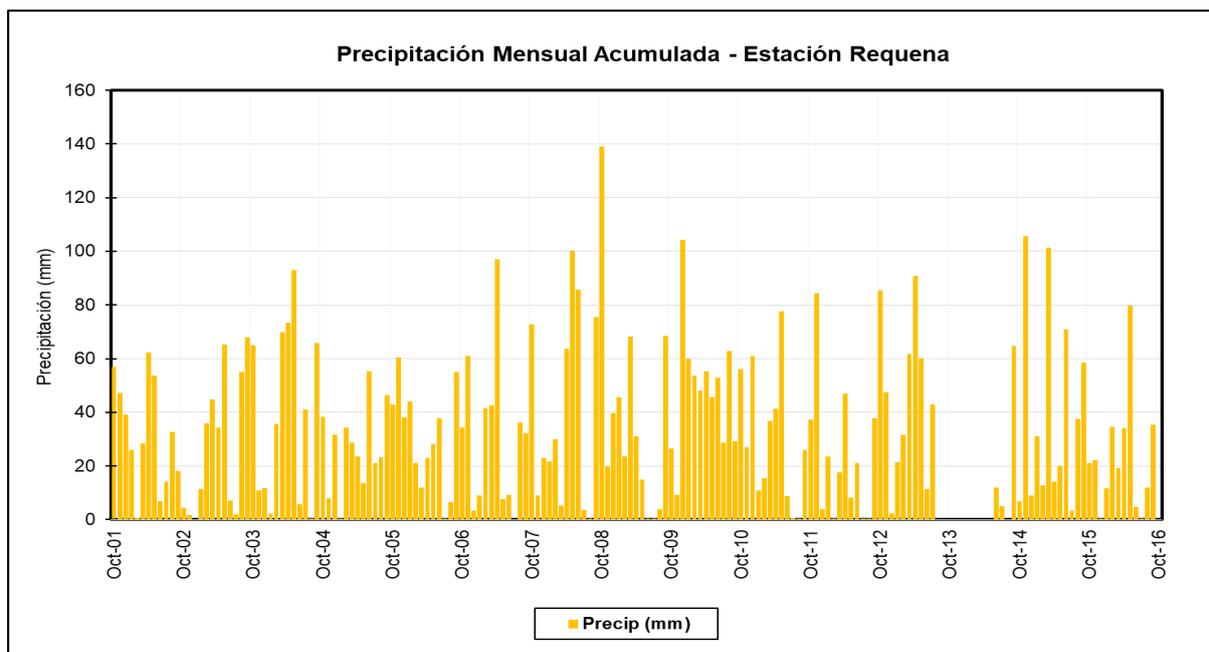


Figura 4: Precipitación mensual acumulada, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con el uso de datos de la red SIAR

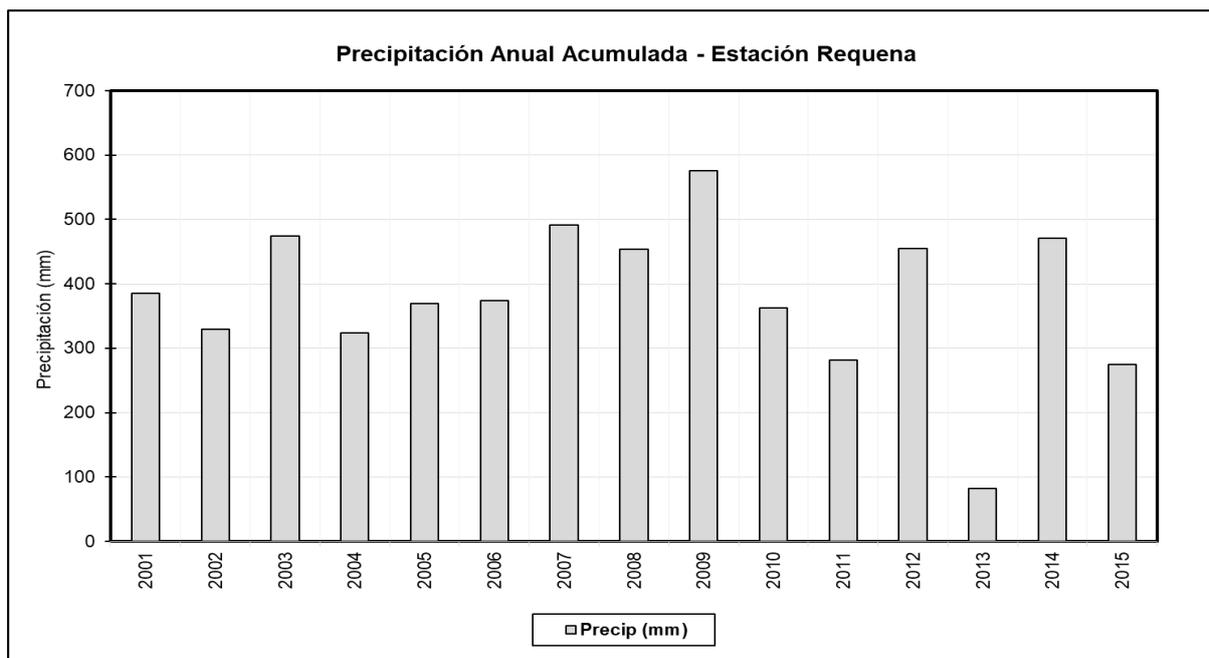


Figura 5: Precipitación anual acumulada, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con el uso de datos de la red SIAR

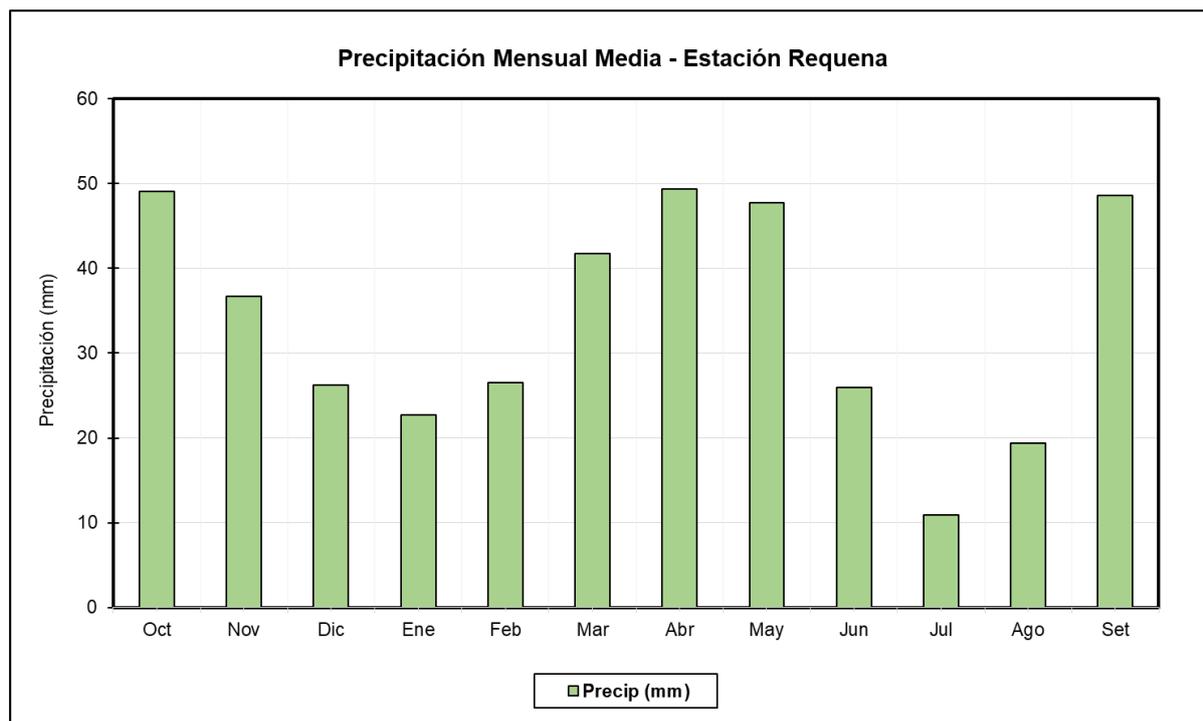


Figura 6: Precipitación media, estación de Requena (2001-2016). Fuente: Elaboración propia con datos con el uso de la red SIAR

3.3.2. Recursos hídricos superficiales

Las masas de agua superficiales como ríos y embalses aledañas o dentro de la zona de estudio se han identificado para analizar la interacción con las masas de agua subterránea de Requena-Utiel o Cabrillas-Malacara y viceversa, y se muestran a continuación:

Red fluvial

La red fluvial de mayor importancia es el río Magro, que resulta de la afluencia del río Madre y la Rambla de la Torre, fluyendo por la masa de Requena-Utiel de noroeste a sureste hacia parte de la masa de Cabrillas-Malacara. Existen aportaciones efímeras a las masas de agua, tales como los ríos Reatillo y Romeroso en Requena-Utiel y los ríos Buñol y Mijares en Cabrillas-Malacara.

En el municipio de Requena, se ubica una estación de aforo en el río Magro, en la cual se registra información en dos series temporales del año 1914 hasta 1980 y desde el año 2004 hasta 2018 con caudales de aforo promedio de 2.13 hm³/mes y 0.33 hm³/mes respectivamente (figura 8), la interrupción no registrada se debe a un posible cambio abrupto de las aportaciones. En la segunda serie temporal se observa una ligera tendencia ascendente en ese periodo de tiempo (figura 9).

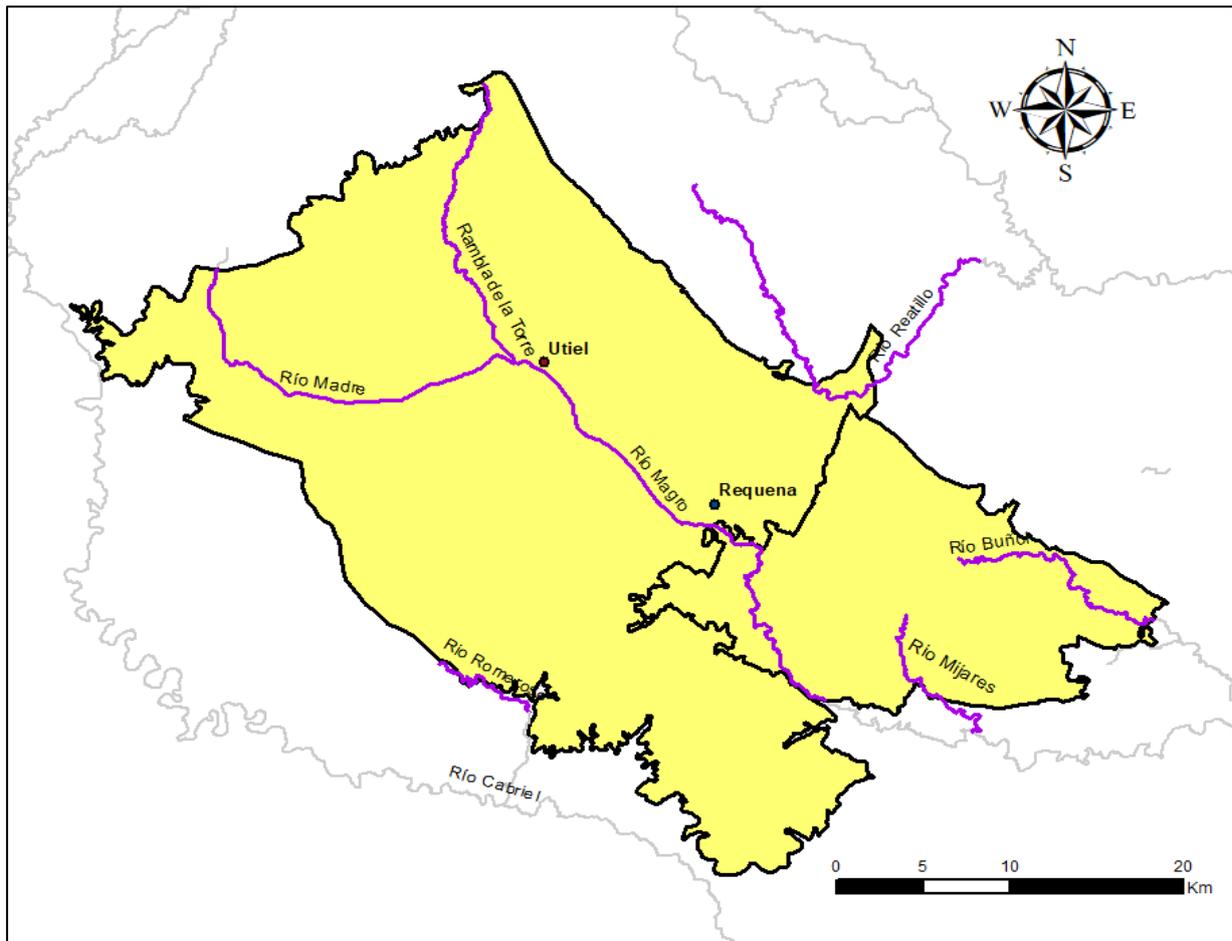


Figura 7: Sistema fluvial en las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara

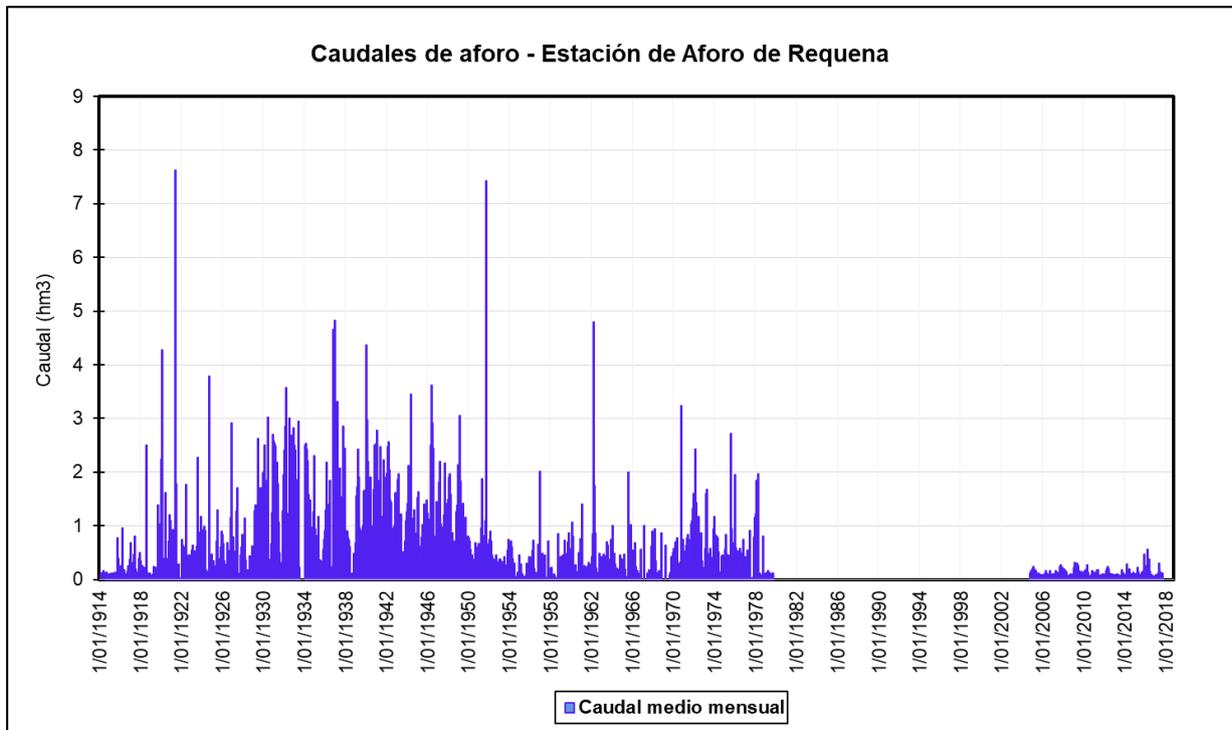


Figura 8: Registro de caudales en la estación de aforos de Requena

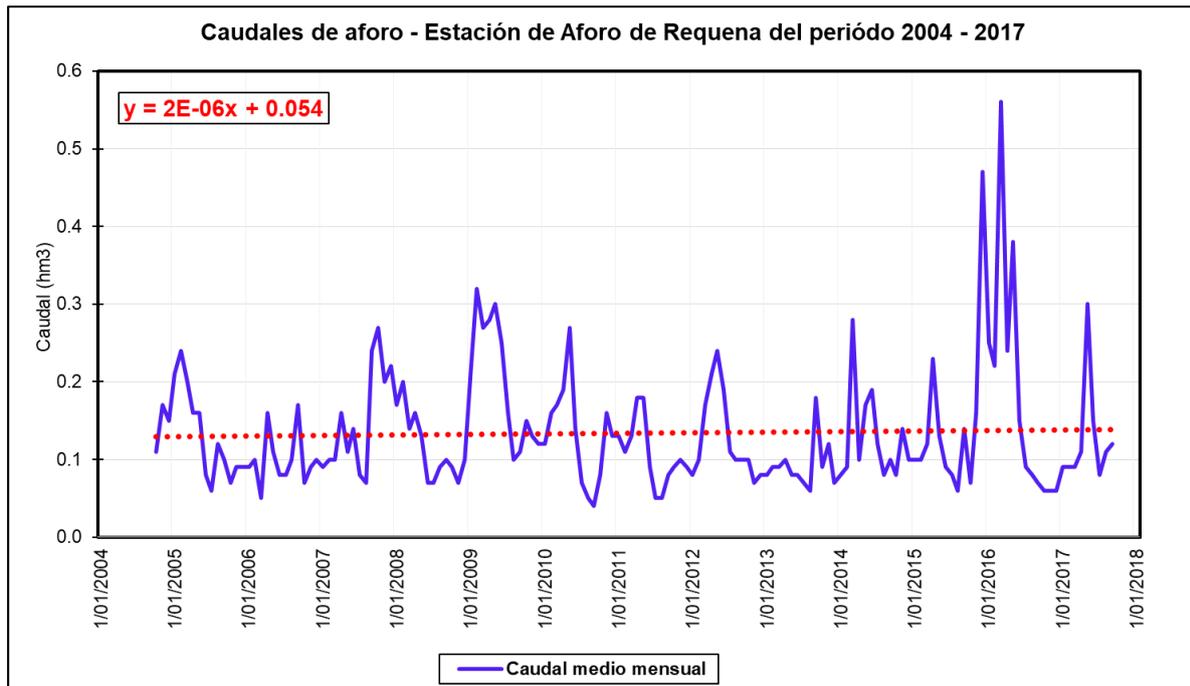


Figura 9: Caudales medios mensuales en la estación de aforos de Requena (2004-2017)

Embalses

En el área de estudio no se ubican embalses, los más cercanos son los embalses de Contreras en el borde noroeste de la masa de Requena-Utiel, y el embalse de Forata, el único que cuenta con información y ubicado al sureste (Figura 10).

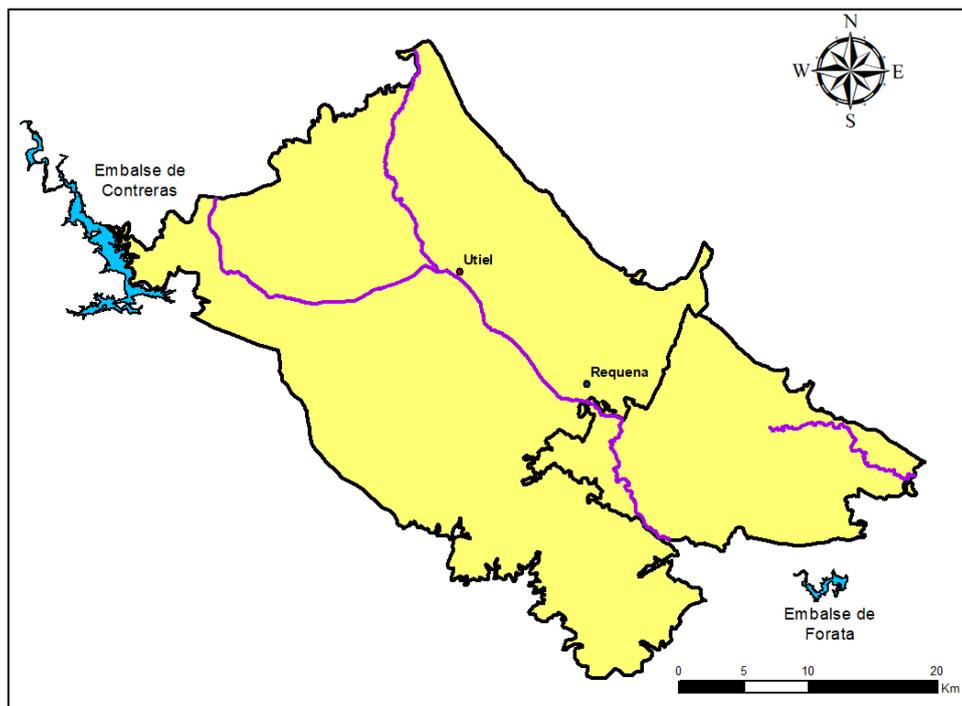


Figura 10: Embalses proximos a las masas de agua subterránea de estudio

Las aportaciones en el embalse de Forata han disminuido desde el año 1993, siendo concordantes con la reducción de los caudales por el río cercano, provocando un descenso en la recarga de los acuíferos que podrían generar un posible déficit en las demandas que se requieren primordialmente para el riego.

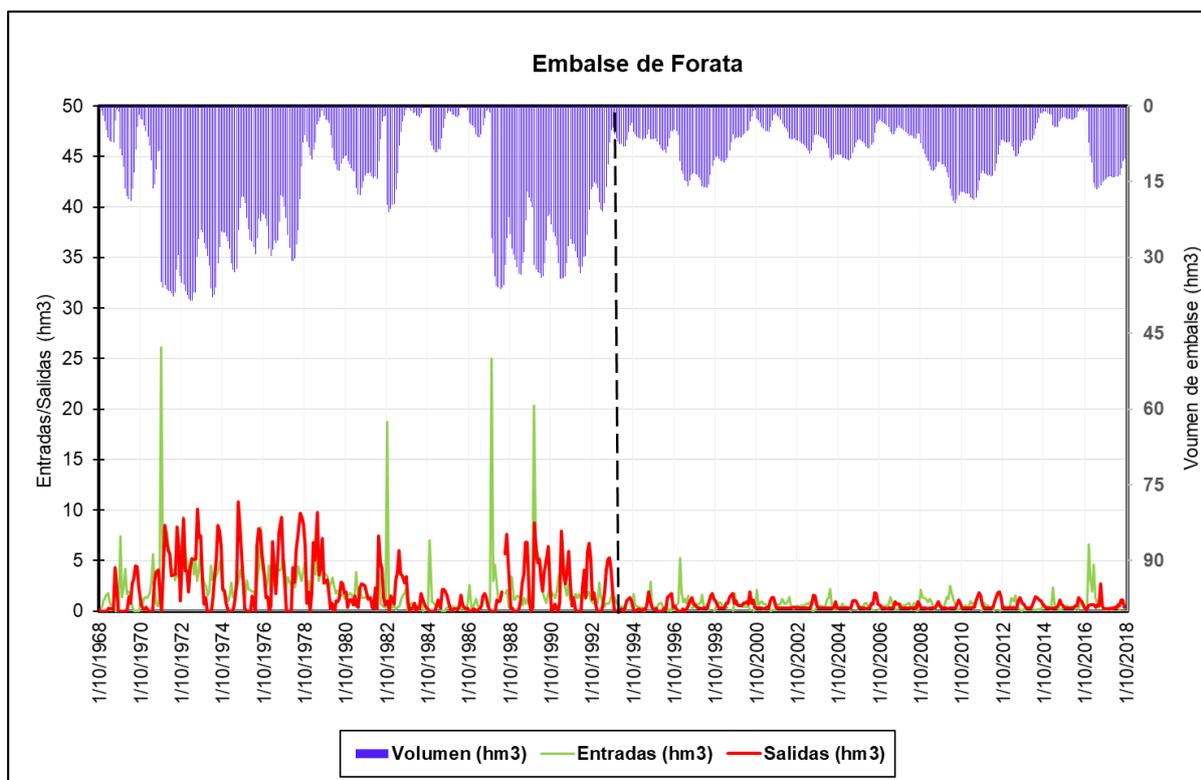


Figura 11: Volúmenes mensuales de entradas, salidas y almacenamiento (embalse de Forata)

Manantiales

Este trabajo no tiene en consideración los manantiales que se originan en las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, dada su pequeña magnitud.

3.4. Contexto hidrogeológico

En este apartado se identifican los aspectos hidrogeológicos que interactúan en el sistema de aguas subterráneas pudiendo o no influir en los resultados finales del modelo.

3.4.1. Límites del sistema

Los límites de las masas de agua subterráneas alrededor de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara se detallan a continuación (figura 12):

- Por el este: la masa de agua subterránea 080.132 las Serranías, entre los municipios de Sinarcas y Buñol.

- Por el suroeste: un límite totalmente impermeable.
- Por el sureste: la masa de agua subterránea 080.140 Buñol-Cheste.
- Por el oeste: una parte de la masa de agua subterránea 080.135 Hoces de Cabriel.
- Por el norte: formaciones cretácicas de la masa de agua subterránea 080.134 Mira.

Además, existen otras partes del límite completamente impermeable, como al noroeste, entre las masas de Mira y Hoces de Cabriel y al sureste, entre las masas de Buñol-Cheste y Sierra del Ave.

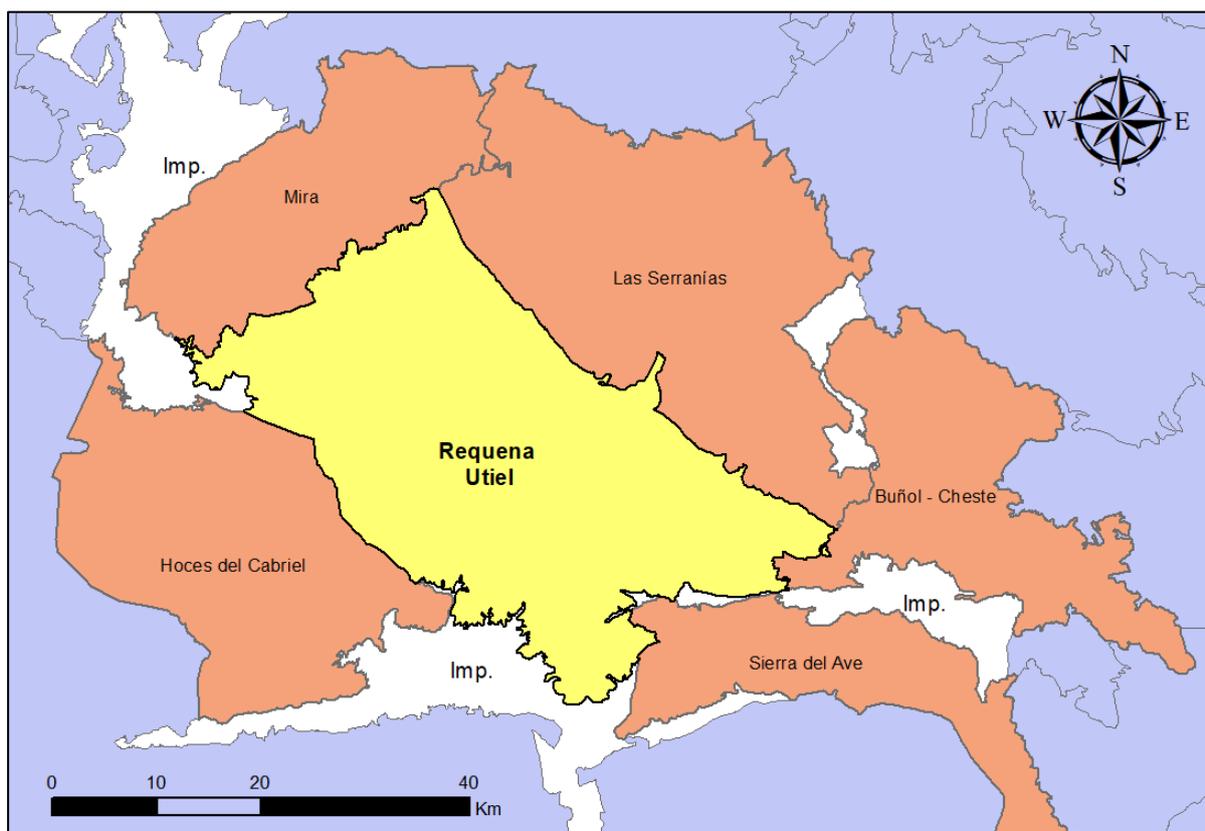


Figura 12: Límites del sistema

3.4.2. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas están formadas por uno o más acuíferos, la correspondiente a Requena-Utiel se compone de dos acuíferos. El primero, es el acuífero cuaternario, de naturaleza libre, una combinación de detríticos de aluvial y glaciares provenientes de Magro y Sierra de Utiel respectivamente. Y el otro, por el acuífero mioceno, que se divide en dos sistemas: calcáreo (acuífero libre, con calizas drenadas por materiales circundantes) y conglomerático de base (acuífero confinado o semiconfinado, con conglomerados y areniscas arcillosas). La masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara, presentan en toda su extensión,

las mismas unidades hidrogeológicas. Estos acuíferos se ubican sobre una fundación impermeable de facies del Keuper.

3.4.3. Dominios hidrogeológicos

La definición de los dominios hidrogeológicos, basada en información de mapas geológicos, hidrogeológicos, litológicos y de permeabilidad, determina cuatro principales dominios hidrogeológicos que se detallan a continuación (figura 13):

- Dominio 1: compuesto por formaciones de permeabilidad muy alta (gravas, arenas y limos)
- Dominio 2: compuesto por formaciones de permeabilidad alta (arenas, margas y calizas)
- Dominio 3: compuesto por formaciones de permeabilidad media (calizas y margas granularmente de menor tamaño y dolomías)
- Dominio 4: compuesta por formaciones de permeabilidad baja (arcillas, yesos y margas de menor tamaño de grano en comparación con el dominio 3)

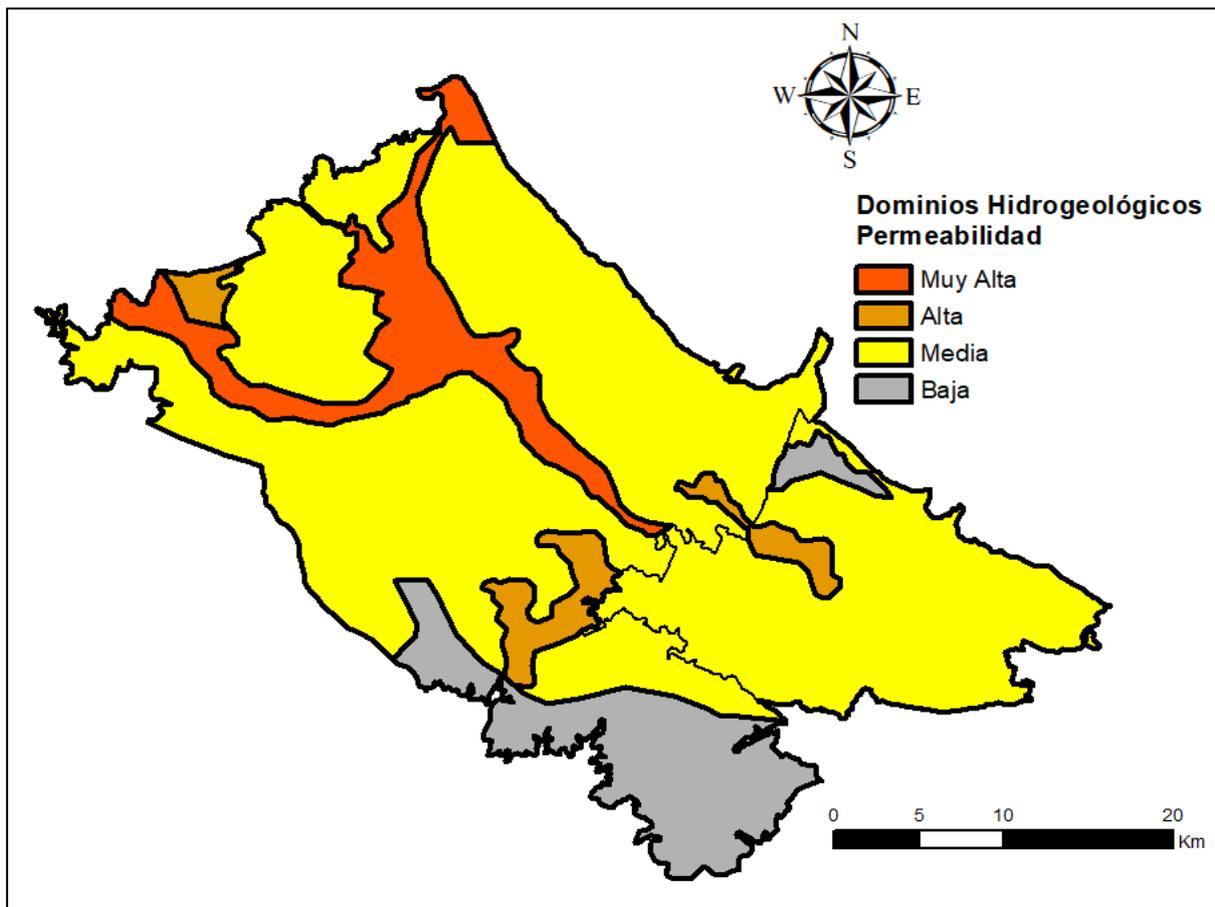


Figura 13: Dominios hidrogeológicos

3.5. Recarga

La recarga se obtuvo del trabajo realizado por Pérez Martín, (2005) en su investigación del modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado, estimada mediante PATRICAL, que se divide en 15 zonas y se muestran en la figura 14.



Figura 14: Zonificación de la recarga

El periodo desde 1940 hasta 2016 presenta una recarga variable con un valor medio de 50 hm³/año, siendo el mismo valor para el periodo desde 1980 a 2016, mostrando continuidad en la cantidad de agua que ingresa a las masas de agua subterránea (figura 15).

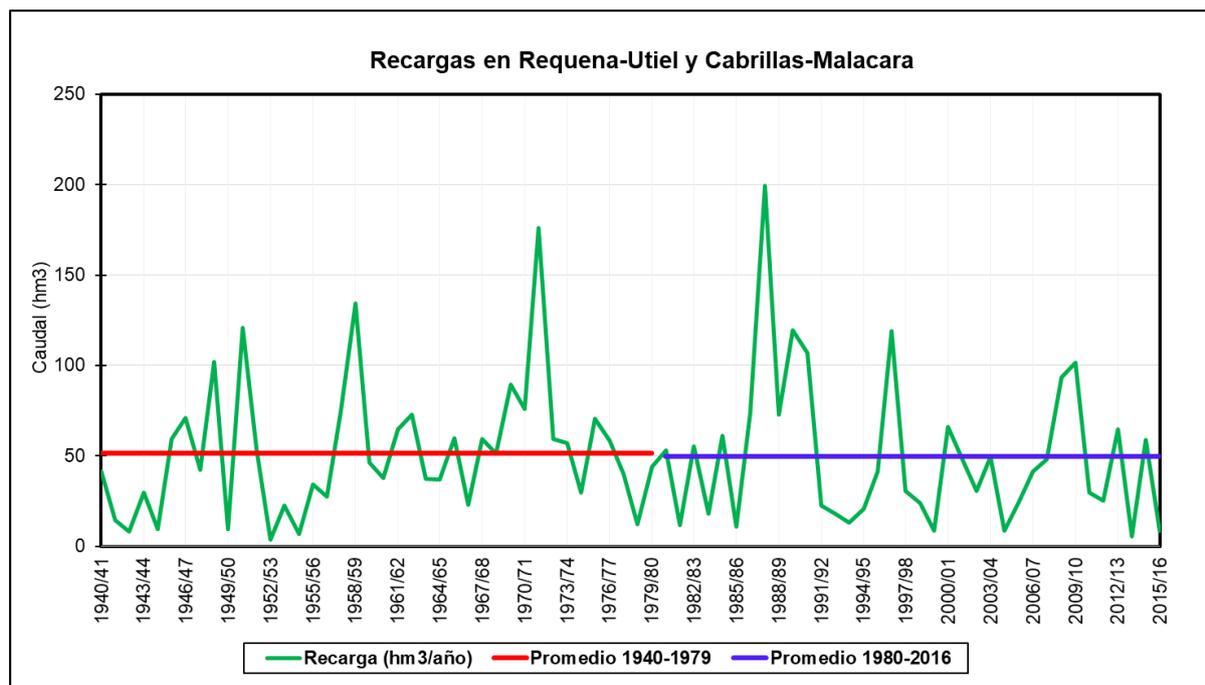


Figura 15: Evolución de la recarga anual en la zona de estudio

3.6. Bombeos

La mayor demanda de agua es destinada para uso agrícola, sin embargo, el uso urbano también requiere de un gran volumen. Estos recursos son abastecidos en gran parte por las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (figura 16). En los últimos años, se han observado descensos piezométricos que son producto de una sobreexplotación de bombeo en la masa de agua subterránea de Requena-Utiel.

El área de estudio tiene 1170 pozos de extracción, el 90% a favor de la demanda agrícola y el 95% ubicados en la masa de agua subterránea de Requena-Utiel (figura 17). La cantidad de pozos de extracción ha aumentado considerablemente en comparación con los 700 pozos registrados en anteriores modelos del 2001.

La demanda agrícola es destinada principalmente al cultivo de vid, y otros cultivos leñosos y herbáceos.

En la Demarcación Hidrográfica del Júcar existen 92 unidades de demanda urbana según el PHJ 2015-2021, de servicios locales e institucionales.

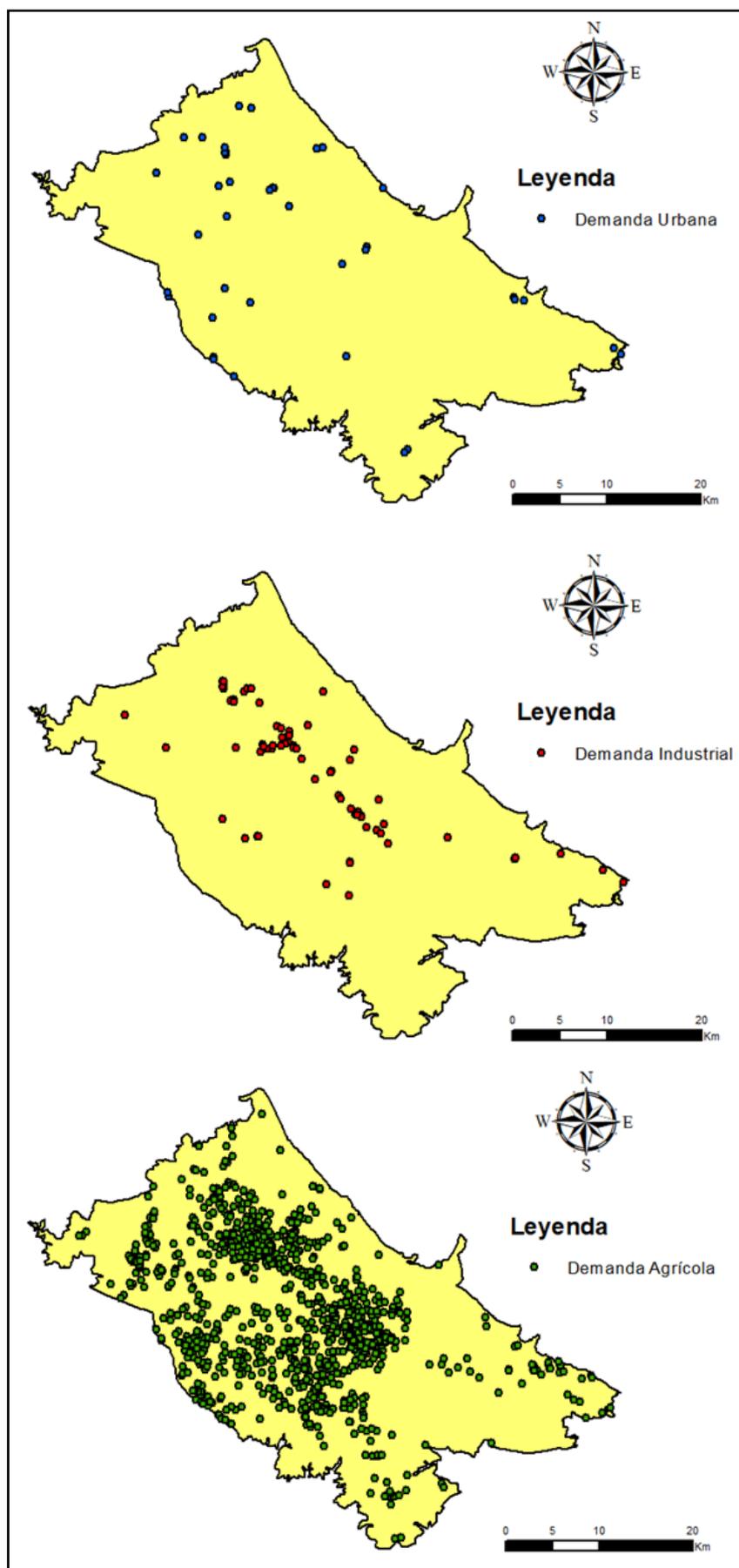


Figura 16: Pozos de extracción destinados a las demandas

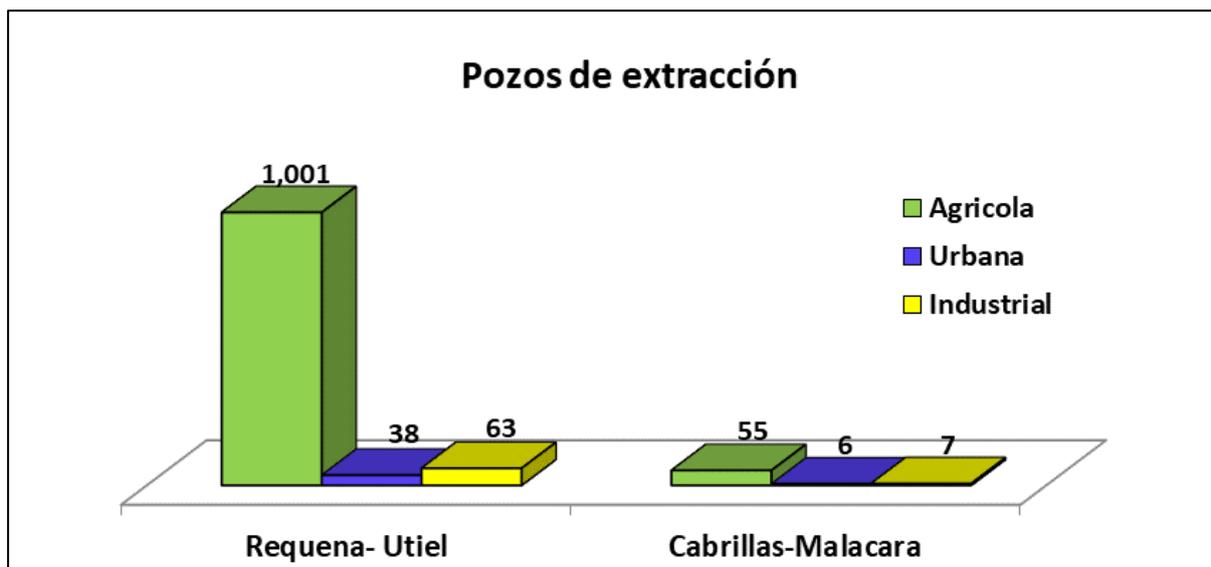


Figura 17: Pozos de extracción según el tipo de demanda

El periodo de 1980/81 a 2015/16 muestra una demanda promedio anual de 9.58 hm³ (figura 18). La demanda urbana e industrial representan un volumen de agua extraída sustancial respecto a la demanda agrícola, aunque esta último representa la mayor fracción de la demanda y el número de pozos es muy elevado.

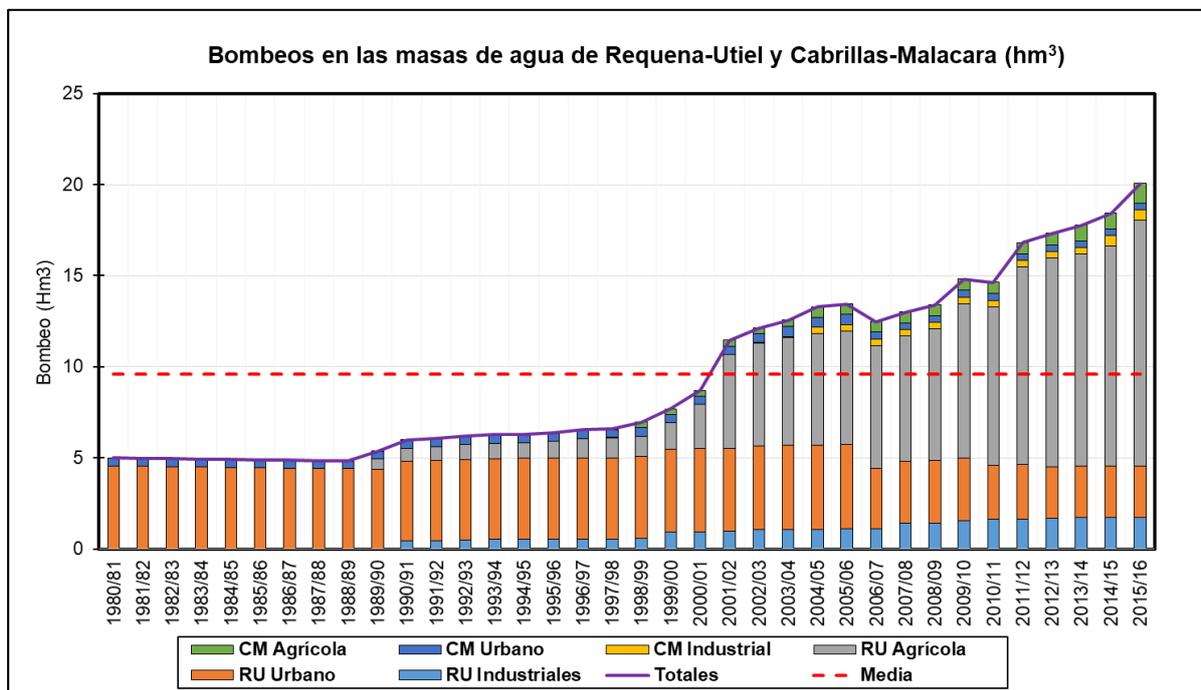


Figura 18: Agua extraída en las masas de agua subterránea de estudio

3.7. Modelo hidrológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual define de manera simplificada la naturaleza y las características del sistema hidrogeológico de la zona de estudio. Permite entender el flujo de agua subterránea y la influencia de las características geológicas, siendo fundamental identificar todos los elementos de los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara previo al desarrollo del modelo matemático.

Las entradas al sistema son la recarga por infiltración de la precipitación, pérdidas desde los cauces, retornos de riego y transferencias laterales desde las masas de agua subterráneas aledañas. Y los flujos de salida del sistema son los bombeos de los pozos de extracción, perdidas a los cauces y transferencias laterales hacia las masas de agua subterráneas aledañas.

En la sección 3.5.2, se muestra la zonificación del área de estudio extraída de PATRICAL (Pérez Martín, 2005), que se usa para el estimar la recarga producida por la infiltración de precipitaciones. Las mayores precipitaciones se dan en las zonas más altas.

En la sección 3.4.1, se describen las conexiones laterales de los acuíferos con las masas circundantes. Los valores transferidos se determinaran a partir de las fichas de masas de agua subterránea (IGME, 2011) y se detallan a continuación:

- Mira: flujo hacia Requena-Utiel de aproximadamente 10 hm³/año.
- Las Serranías: conexión dinámica producto de la variación piezometría del lugar.
- Buñol-Cheste: existe un flujo proveniente de Cabrillas-Malacara de aproximadamente 3 hm³/año.
- Hoces de Cabriel: no existe interacción de flujo y se considera una zona impermeable.

No obstante, los recientes estudios elaborados por la CHJ mencionan cambios en estos flujos de la siguiente manera:

- En Mira: flujo a Requena-Utiel entre 3- 5 hm³/año.
- En las Serranías: sin intercambio de flujo.
- En Buñol-Cheste: desde Cabrillas-Malacara, el flujo tranferido ha aumentado alrededor de unos 24 hm³/año.
- En Hoces de Cabriel: no existe intercambio de flujo.

Estos últimos valores serán los que usaremos en el modelo.

El río Magro y sus afluentes el río Madre y la Rambla de la Torre son los cauces superficiales que se tendrán en consideración en la masa de Requena-Utiel, y el río Buñol, en la masa de Cabrillas-Malacara.

Con la finalidad de conocer la evolución piezométrica de la zona de estudio se tienen mapas piezométricos desarrollados por la Confederación Hidrográfica del Júcar, que permiten conocer el comportamiento histórico del flujo subterráneo (figura 19).

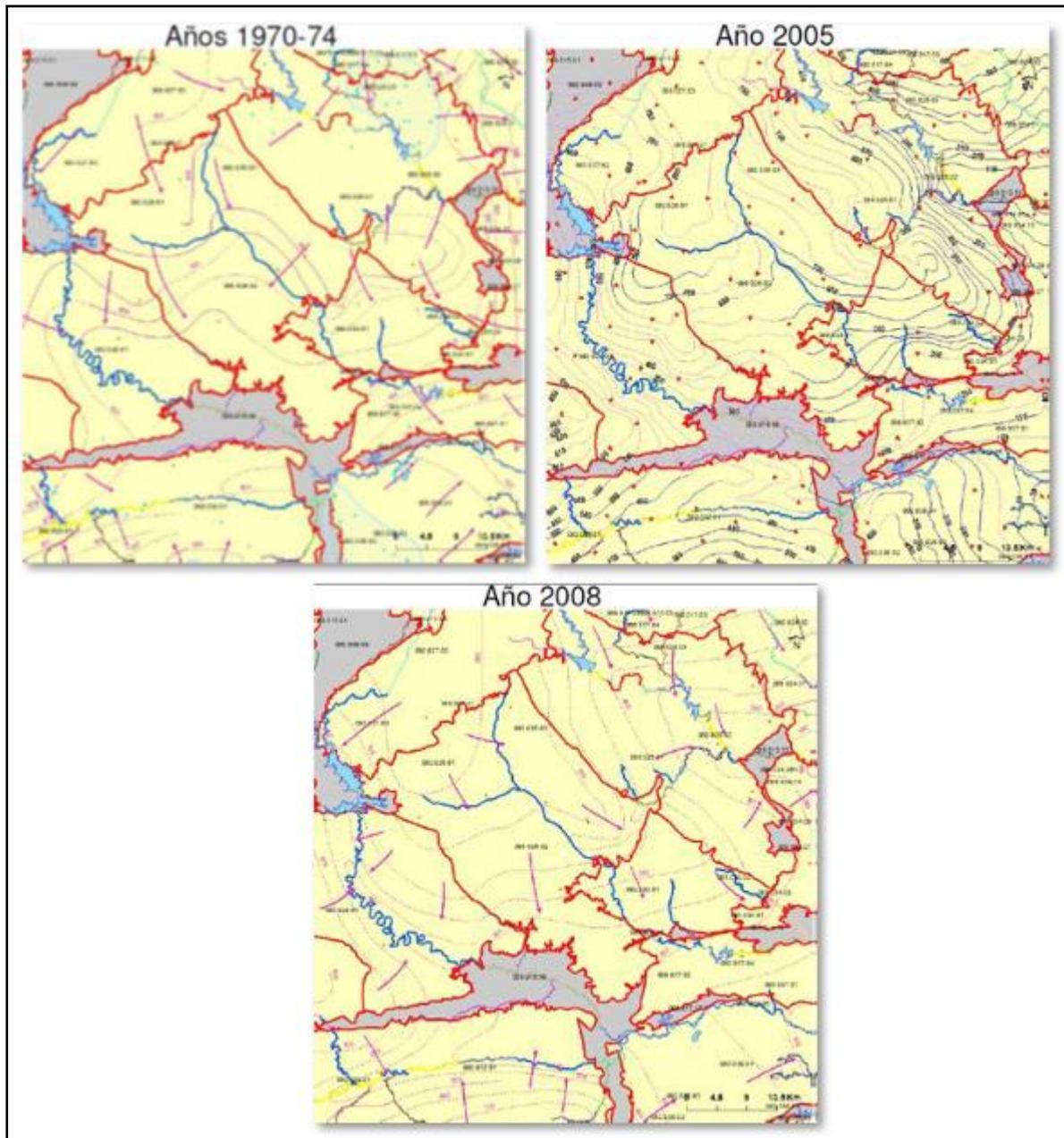


Figura 19: Mapas piezométricos. Fuente: CHJ (2015)

El bombeo de los pozos de extracción es el principal flujo de salida del sistema, sobre todo en la zona de Requena-Utiel, presentando una sobreexplotación en los últimos años que ha producido importantes descensos piezométricos.

La representación gráfica del modelo conceptual hidrogeológico permite conocer de forma sencilla las zonas de recarga y descarga, y los componentes del balance que facilitarán la elaboración del modelo matemático (figura 20).

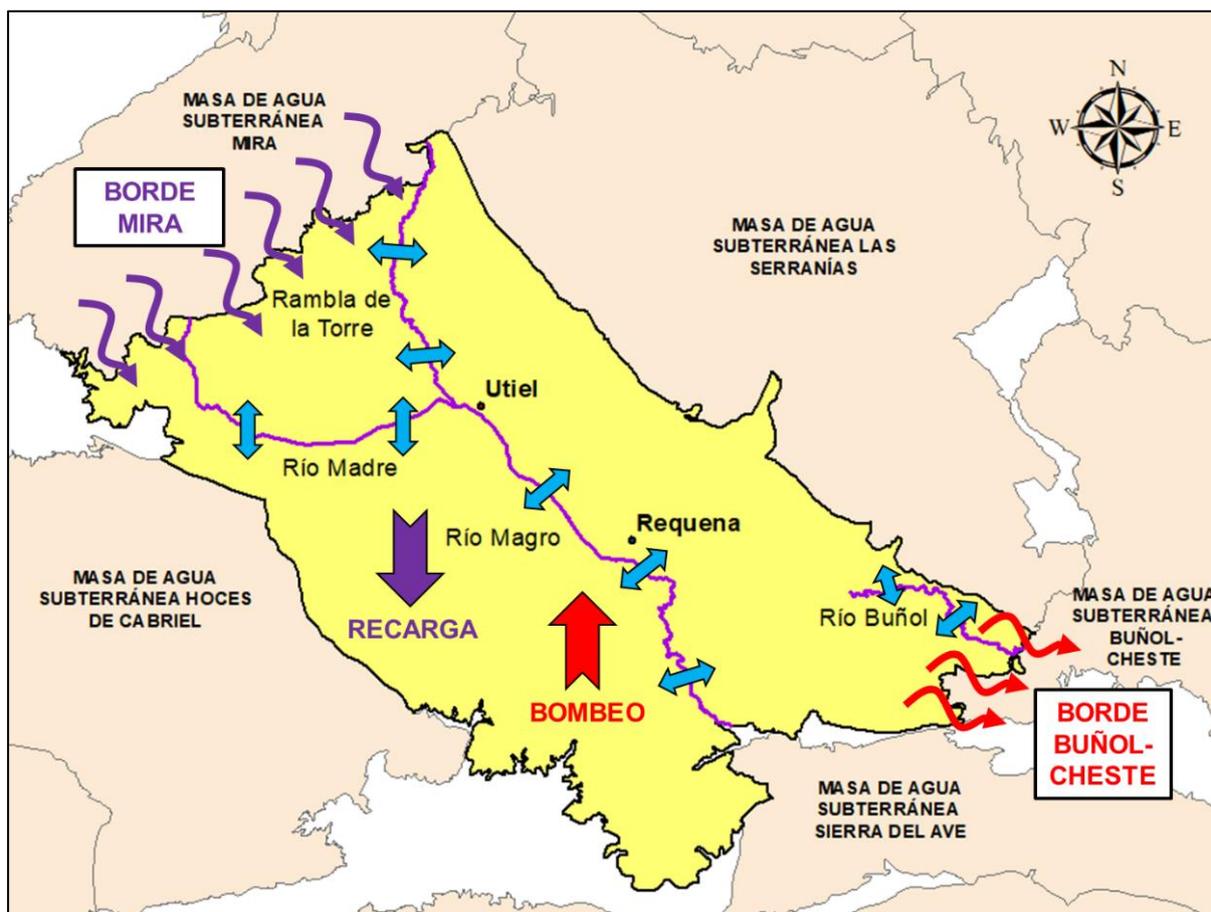


Figura 20: Modelo hidrogeológico conceptual

4. Selección del código

Hoy en día existe un sinnúmero de modelos matemáticos comerciales que facilitan a los usuarios resolver complejas ecuaciones analíticas sin mayor conocimiento del cálculo, las mismas que hace algunos años atrás requerían de incontables horas y de expertos para su solución y revisión (IHOBE, 2006). Sin embargo, es fundamental que cualquier usuario por lo menos conozca los procesos que están considerando y la forma en que se representan todos los parámetros que intervienen.

Para la elaboración del modelo numérico se utiliza un código libre, MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1984) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Utilizaremos la versión 2005, esta versión permite realizar el modelamiento de flujo haciendo uso del método de diferencias finitas centradas en bloque, asimismo, permite adicionar otros flujos al sistema como recarga, drenaje, bombeos, ríos, y otros, a través de paquetes individuales o módulos.

5. Implementación del modelo

Esta sección describe cada uno de los módulos utilizados en la biblioteca FloPy con el fin de correr los ejecutables de MODFLOW. La biblioteca FloPy permitirá ejecutar a través de unas cuantas líneas de código el modelo matemático elaborado.

Las características geométricas para el ingreso de datos para la implementación del modelo son por lo general shapefiles, previamente generados en software de sistemas de información geográficas – SIG; u hojas de Excel con tablas que contiene importantes datos de la información de parámetros e históricos.

5.1. Discretización y diseño de malla

5.1.1. Diseño de la malla

El modelo está compuesto por una malla construida por 12573 celdas (correspondiendo a 99 filas y 127 columnas) cuyas dimensiones son de 500 x 500 m² dentro de un dominio acotado por los límites siguientes:

Límite norte : UTM N 626.814,04

Límite sur : UTM N 690.314,04

Límite este : UTM E 4.399.265,08

Límite oeste : UTM E 4.349.765,08

La masa de agua subterránea, en sentido vertical, está compuesta por 3 capas que descansan sobre un sustrato impermeable de facies de Keuper, tal como se trabajó en el modelo numérico realizado por la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2001).

Las capas pueden ser confinadas, convertibles (confinada o libre) y no simuladas. En el presente modelo se considera a la capa superior e intermedia como convertibles y a la capa inferior como confinada.

Para la configuración de las celdas activas e inactivas hacemos uso del paquete BAS, cuyo procedimiento es determinar la matriz IBOUND donde se especifican las celdas activas (valor positivo), inactivas (valor igual a 0) y por último celdas con alturas prescritas (valor negativo).

En la figura 21, se muestra la discretización y el dominio del modelo. En color blanco, las celdas activas y en color negro, las celdas inactivas de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. La figura 22 muestra una sección del modelo a lo largo de la fila 20, donde se puede apreciar la discretización vertical.

El paquete “BAS” de MODFLOW se ejecuta usando “flop.modflow.ModflowBas”. Se utiliza para especificar la zona activa y los niveles iniciales de los acuíferos.

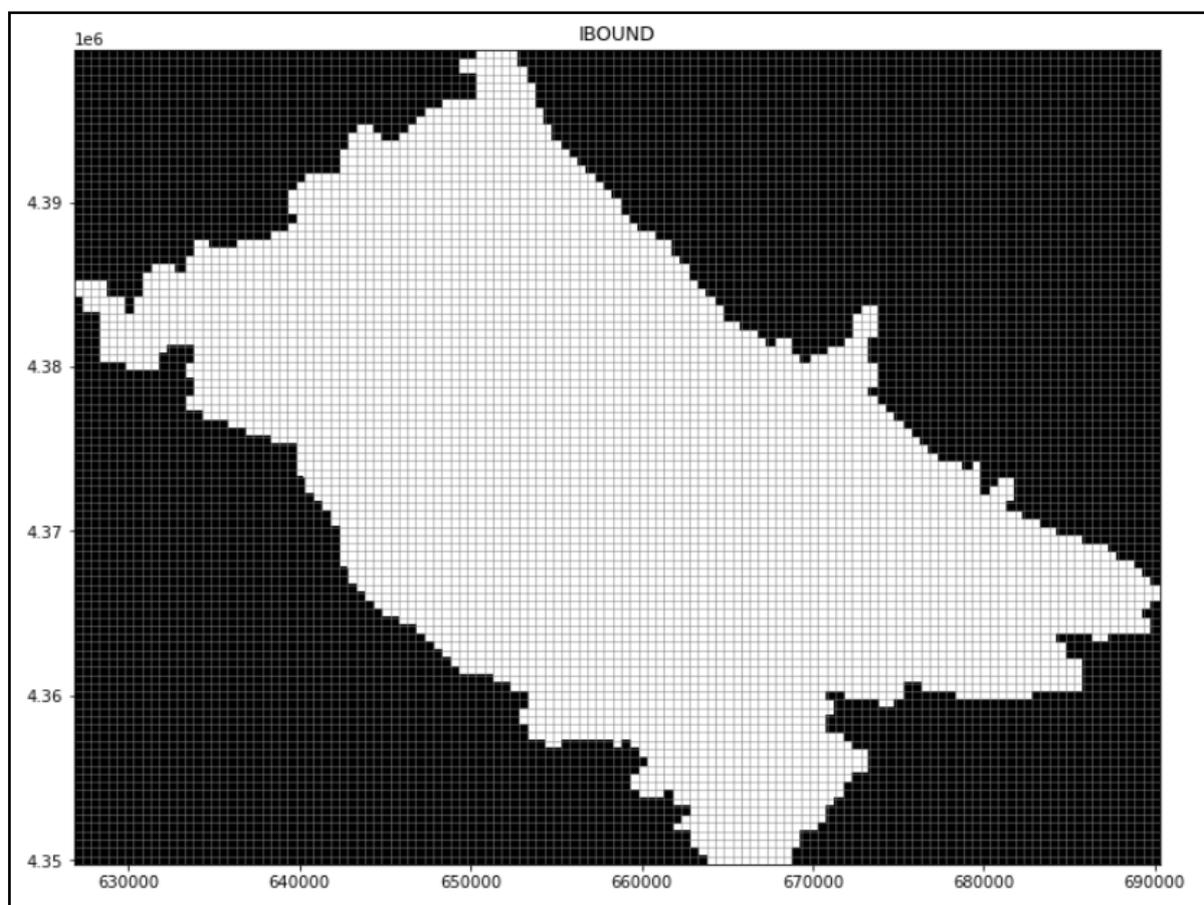


Figura 21: Discretización horizontal y dominio del modelo

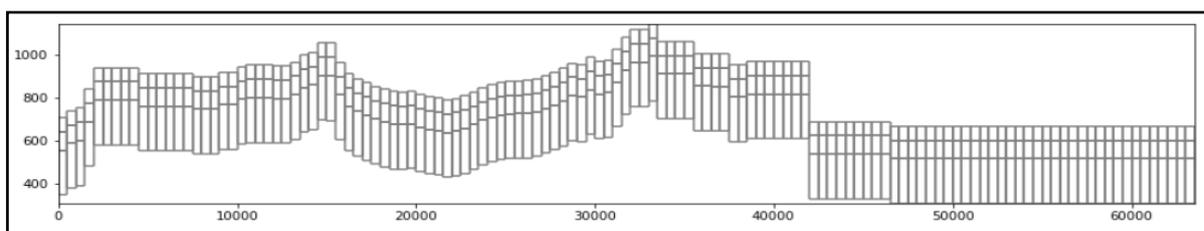


Figura 22: Discretización vertical del modelo a lo largo de la fila 20

5.1.2. Discretización temporal

Para la discretización temporal se ha definido un periodo de 36 años de información, comprendida entre los años hidrológicos 1979/80 y 2015/2016 a escala mensual y en régimen influenciado, que supondremos se encuentra en régimen estacionario.

El paquete “DIS” de MODFLOW se ejecuta usando “flopymodflow.ModflowDis”. Se utiliza para especificar el número de filas, columnas, y capas, tamaño de celdas, tipo de acuífero por capa y la discretización del tiempo.

5.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno describirán el intercambio de flujo entre las masas de aguas subterránea y el exterior. En un modelo pueden incluirse tres tipos de condiciones de contorno:

- Condición de Dirichlet (tipo 1). Se trata de una frontera con nivel piezométrico conocido.
- Condición de Neumann (tipo 2). Gradiente de la altura piezométrica conocida o flujo conocido.
- Condición de Cauchy (tipo 3). Es una condición mixta, siendo flujo dependiente de la altura piezométrica.

5.2.1. Límites laterales

Se considera todo el borde de la masa de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara como impermeable, excepto, los límites de las masas de Mira y Buñol-Cheste, tal como se describe en las secciones 3.4.1. y 3.7.

El paquete “GHB” de MODFLOW se ejecuta usando “flopymodflow.ModflowGhb”, se utiliza para simular los límites de flujo que dependen de la altura.

Se crea un shapefile de los contornos, cuyos atributos están compuestos de los niveles piezométricos y la conductancia. Este objeto es ingresado a la plataforma del Jupyter para ser programado y ejecutado en el paquete “GHB”.

En el límite con la masa de Buñol-Cheste hay 4 piezómetros cercanos con poca información, por ende, se considerará una piezometría constante de 300 m en todo el borde.

En el límite con la masa de Mira existe información de los piezómetros cercanos a la zona, calculando valores interpolados en todo el límite.

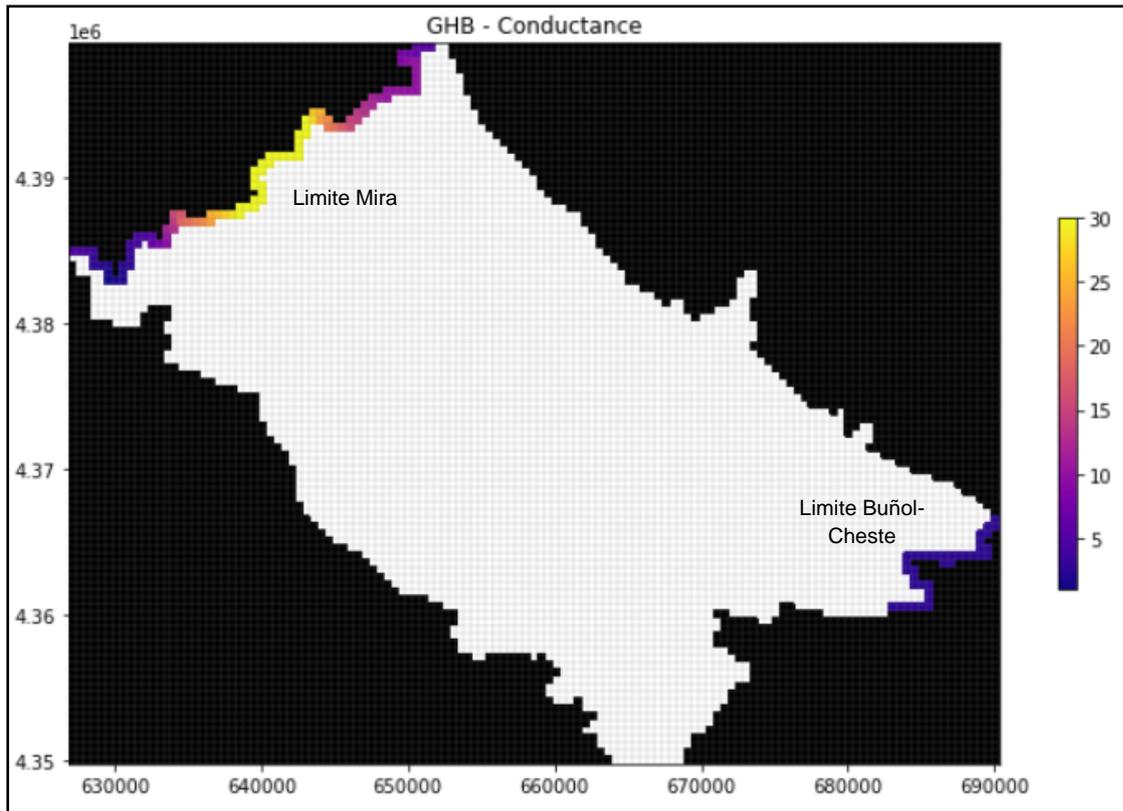


Figura 23: Conductancia en los límites del modelo

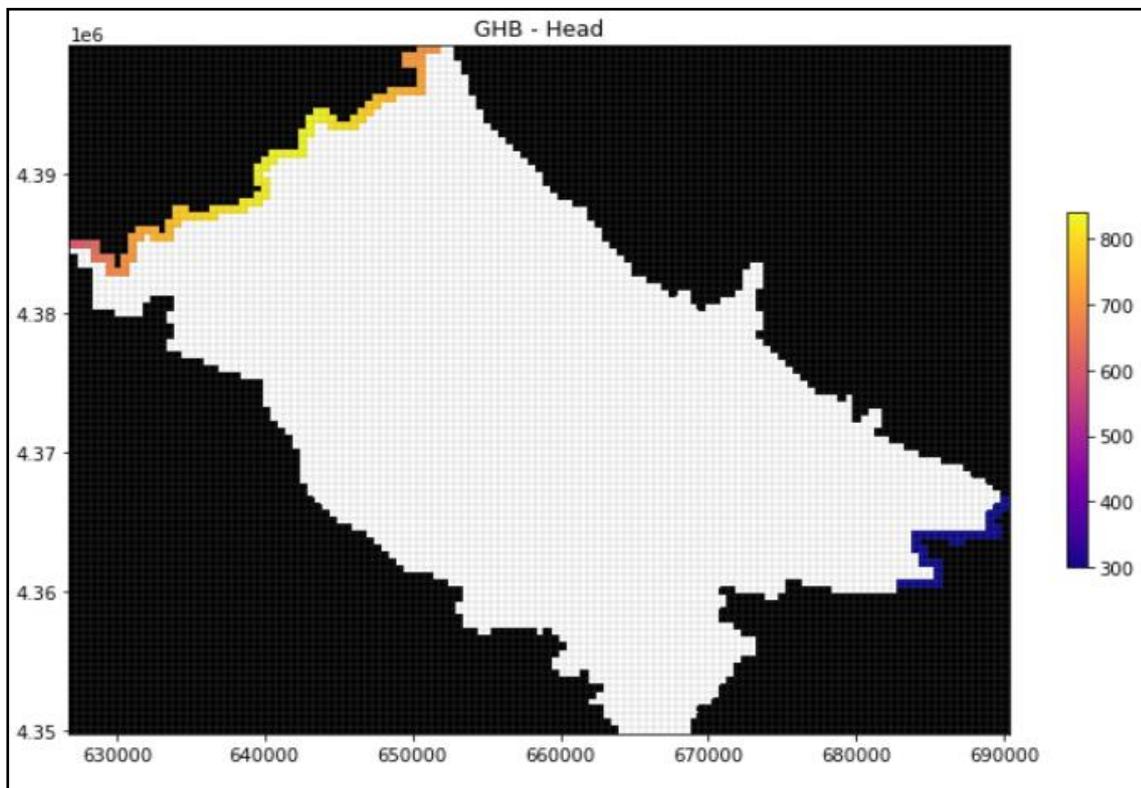


Figura 24: Valores piezométricos en los límites del modelo

5.2.2. Cauces superficiales

El modelo tendrá en cuenta el río Magro, que resulta de la unoin del río Madre y la rambla la Torre, que fluyen por la masa de Requena-Utiel y el río Buñol en la masa de Cabrillas-Malacara, considerando un contorno tipo 3, donde el flujo depende directamente de la altura piezométrica.

El paquete “RIV” de MODFLOW se ejecuta usando “flop.modflow.ModflowRiv”. En este paquete, se establece relaciones entre el agua superficial y las aguas subterráneas, siempre y cuando exista una conexión con el acuífero. Se requiere de la cota del agua superficial en el río, la cota del fondo del lecho del río, la conductancia y el periodo de simulación.

Se considera que la cota de agua superficial está a 1 m por encima de la cota del lecho para todos los ríos y que la conductancia es uniforme en cada río.

El modelo de Pérez Membrives, (2019), como resultado de un proceso de calibración, asigna una conductancia de $100 \text{ m}^2/\text{día}$ a los afluentes la rambla de la Torre y el río Madre, $12 \text{ m}^2/\text{día}$ al río Magro y $2.5 \text{ m}^2/\text{día}$ al río Buñol (figura 25)

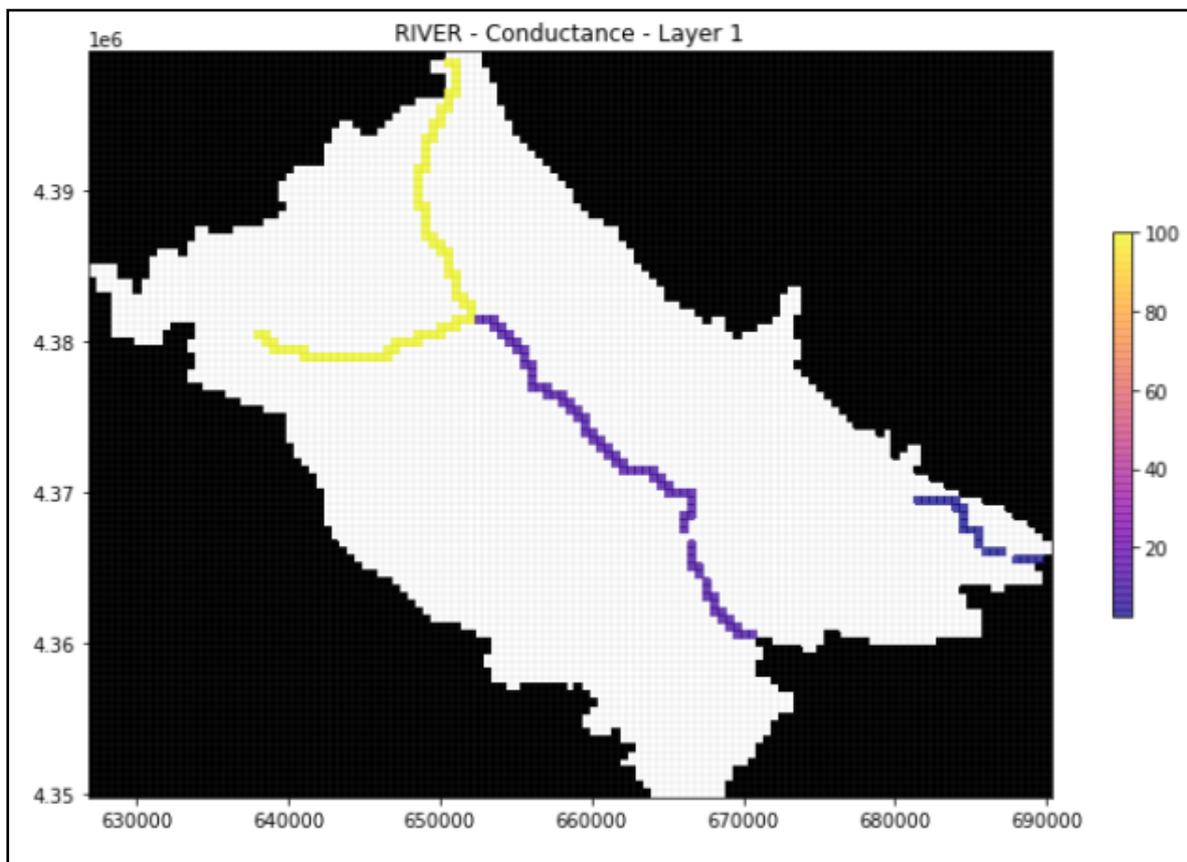


Figura 25: Conductancia en los ríos del modelo

5.2.3. Recarga por infiltración

La recarga es el flujo neto de agua que atraviesa la zona no saturada y llega al acuífero produciendo variaciones en el nivel freático.

El flujo es prescrito, por ello se asignará como contorno tipo 2. El paquete “RCH” de MODFLOW se ejecuta usando “flop.py.modflow.ModflowRch”. En este paquete, se establecen tres opciones para el código de la recarga. 1: recarga solo a la capa superior, 2: recarga a cualquier celda definida y 3: recarga a la celda activa más alta. En este caso se ha definido la matriz (filas y columnas) donde se aplicará a las celdas activas que presenten recarga.

En la sección 3.5, se describe la zonificación para la recarga por precipitación del modelo PATRICAL (Pérez Martín, 2005) y es utilizada para la recarga por infiltración en la figura 26.

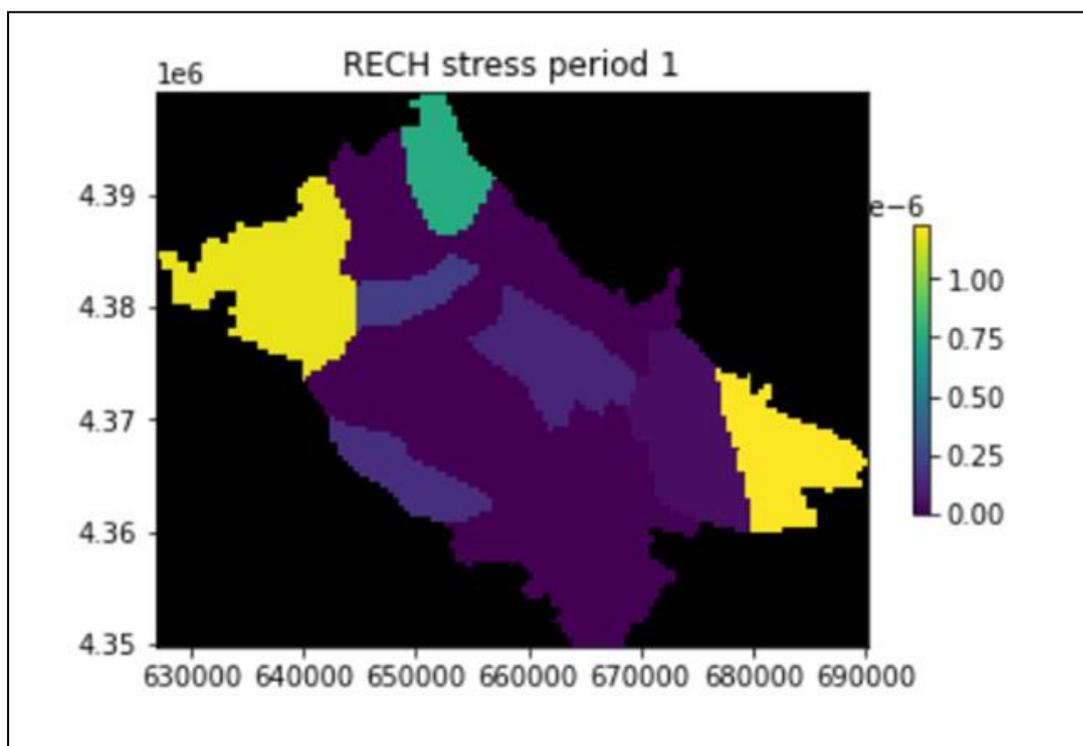


Figura 26: Recarga por infiltración en el modelo

Existen recargas por retorno de riego, cuya distribución en las celdas activas es determinada por las unidades de demanda (figura 27):

- Riegos mixtos de la Plana de Utiel.
- Hoya de Buñol y Chiva
- Riegos del Alto Magro.

Para la implementación de la recarga en la biblioteca FloPy se realizaron los siguientes pasos:

- Ingresar el código Python para la lectura de los shapefiles (zonificación de precipitación y retornos). Creando una matriz que permita conocer la ubicación de las celdas atribuidas a cada shapefile.
- Código Python que permita extraer la información de la tasa de recarga de la precipitación y retornos (hoja Excel).
- Asignar a la tasa de recarga a cada celda antes ubicada, en cada paso de tiempo por ser variable a lo largo del tiempo.
- Aplicar el paquete RCH.

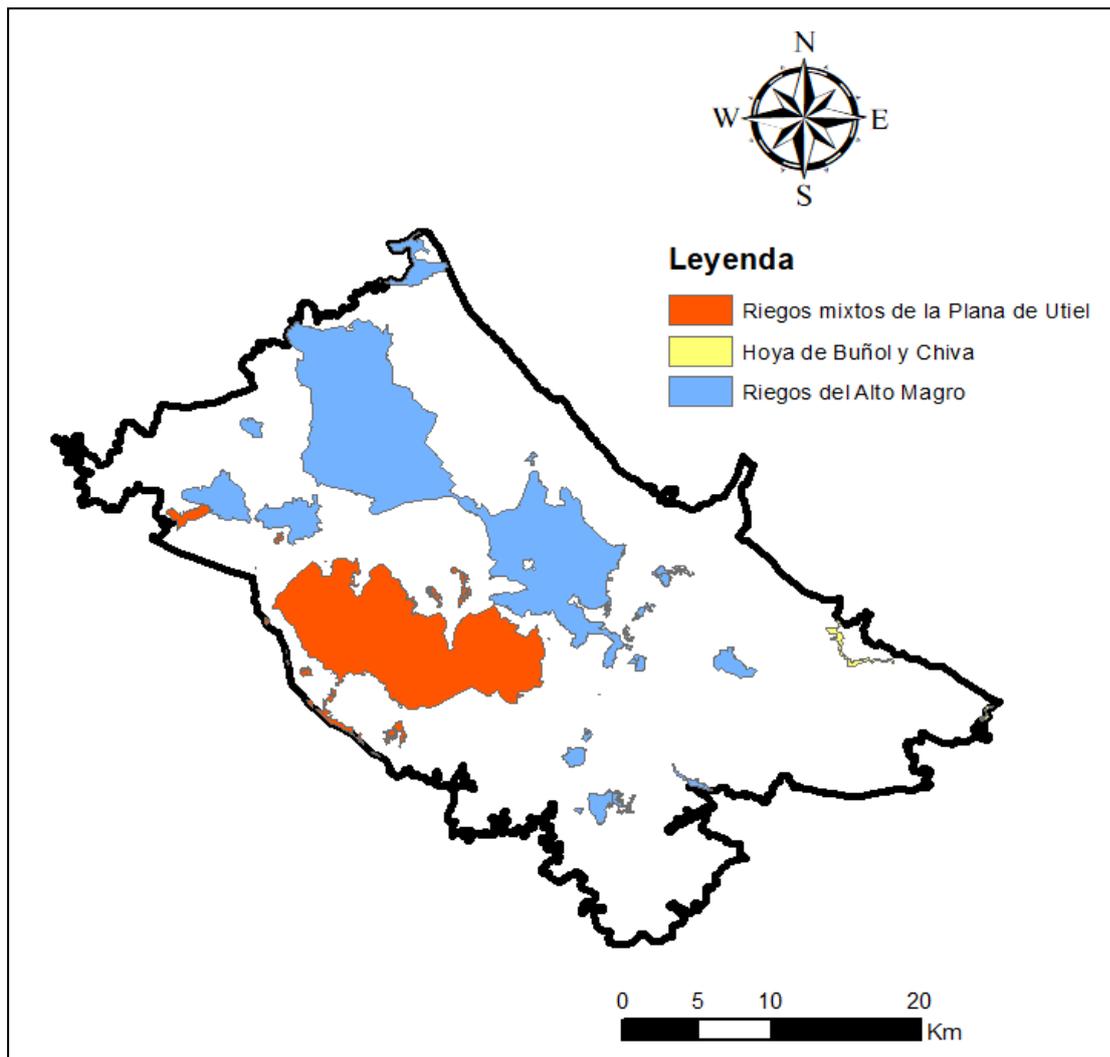


Figura 27: Distribución de la recarga por los retornos de riego.

5.3. Condición inicial

A causa de la falta de información piezométrica de la zona de estudio se ha considerado a la simulación del año 1980 como condición inicial del modelo para la simulación en régimen transitorio.

5.4. Parámetros hidrogeológicos

Existen distintos enfoques en representar la heterogeneidad en unidades hidrogeológicas, el método de dividirlos en zonas ofrece una mayor versatilidad cuando se realiza la calibración, porque al cambiar un valor uniforme al ajustar el parámetro del modelo, permite que todas las celdas pertenecientes a dicha zona se ajusten.

El modelo hidrogeológico de Fernández Urizar, (2017) divide en 20 zonas a los parámetros hidrogeológicos de las masas de agua de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. Este estudio está basado en datos hidrogeológicos del MAGNA y el IGME (Figura 28).

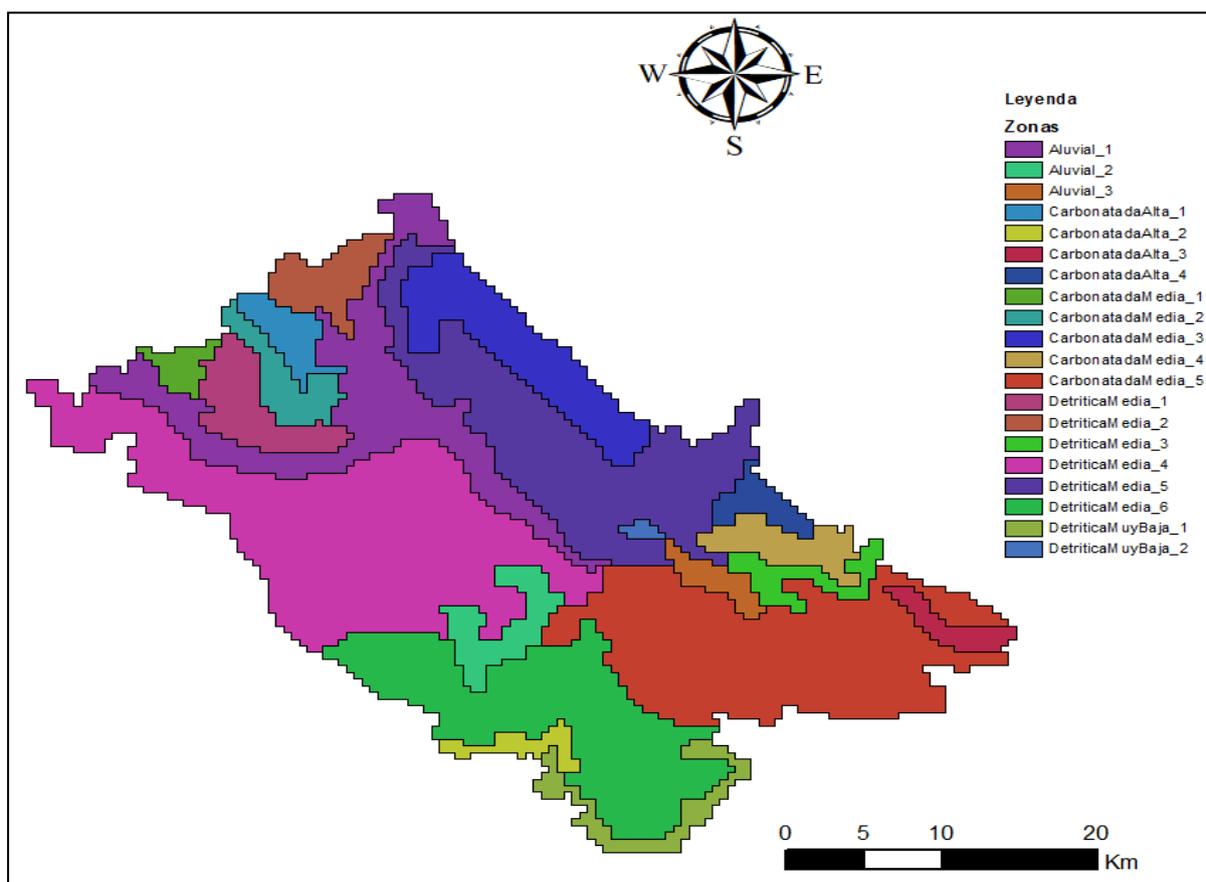


Figura 28: Zonificación de parámetros hidrogeológicos basada en el modelo de Fernández-Urizar, (2017)

Los parámetros por ingresar son la conductividad hidráulica, y el almacenamiento (coeficiente de rendimiento específico para acuíferos libres y de almacenamiento específico para acuíferos confinados; si la capa es convertible hay que ingresar ambos parámetros).

MODFLOW y FloPy requieren los valores de los parámetros hidrogeológicos en cada capa y zona de acuerdo con la discretización espacial. Los principales parámetros a considerar son los

valores de conductividad hidráulica (K_x), almacenamiento específico (S_y) y rendimiento específico (S_s).

El modelo de Pérez Membrives, (2019), realiza un proceso iterativo de prueba y error para calibrar los parámetros del modelo, y estos valores se presentan en la tabla 1:

Tabla 1: Parámetros hidrogeológicos por zonas y capas

Zona	K_x			S_s			S_y		
	Capa			Capa			Capa		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ZonaAluvial_1	30	30	30	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1
ZonaAluvial_2	0.14	0.14	0.13	0.03	0.03	0.001	0.2	0.2	0.2
ZonaAluvial_3	6	6	4	0.01	0.01	0.0001	0.3	0.3	0.3
ZonaCarbonatadaAlta_1	6	6	4	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_2	4	4	3	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_3	2	1	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_4	2	1	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaMedia_1	5	5	3	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_2	5	5	4	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_3	0.1	0.1	0.09	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_4	0.05	0.05	0.03	0.0013	0.0013	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_5	1.2	1.2	1.2	0.01	0.01	0.00001	0.035	0.035	0.035
ZonaDetríticaMedia_1	0.01	0.01	0.01	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_2	0.3	0.3	0.2	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_3	0.02	0.02	0.009	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_4	0.14	0.14	0.13	0.03	0.03	0.001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_5	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.02	0.3	0.3	0.3
ZonaDetríticaMedia_6	0.5	0.5	0.4	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMuyBaja_1	0.1	0.1	0.08	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1
ZonaDetríticaMuyBaja_2	0.1	0.08	0.06	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1

El paquete “LPF” de MODFLOW se ejecuta usando “flop.py.modflow.ModflowLpf”. En este paquete, se establecerá el tipo de capa, las dos primeras capas serán definidas como libre y la tercera como confinada.

Para la implementación de los parámetros hidrogeológicos en FloPy se realizaron los siguientes pasos:

- Ingresar el código Python para la lectura del shapefile (zonificación de parámetros hidrogeológicos) creando una matriz que permita conocer la ubicación de las celdas atribuidas a cada zona en el shapefile.

- Código Python que permita extraer la información de los parámetros hidrogeológicos (hoja Excel).
- Asignar los valores de los parámetros a cada celda antes ubicada según la zona a la que corresponda. La figura 29 muestra la distribución espacial de estos parámetros.

5.5. Bombeos

En la sección 2.6, se han considerado tres tipos de demandas: agrícola, urbana e industrial.

El paquete “WEL” de MODFLOW se ejecuta usando “flopy.modflow.ModflowWel”. En este paquete, se establecerá la ubicación de los pozos en las celdas, capa de bombeo y el caudal de bombeo a lo largo de la simulación). Para la implementación de los pozos de bombeo en FloPy se realizaron los siguientes pasos:

- Ingresar el código Python para la lectura del shapefile (nube de puntos de los pozos de bombeo). Creando una matriz que permita conocer la ubicación de las celdas atribuidas a cada zona en el shapefile.
- Código Python que permita extraer la información del caudal de bombeo diario en el periodo de simulación del modelo (hoja Excel).
- Asignar los caudales de bombeo a cada celda antes ubicada, según a la celda (fila y columna) a la que corresponda en estado transitorio. La figura 30 muestra la distribución espacial de estos parámetros.

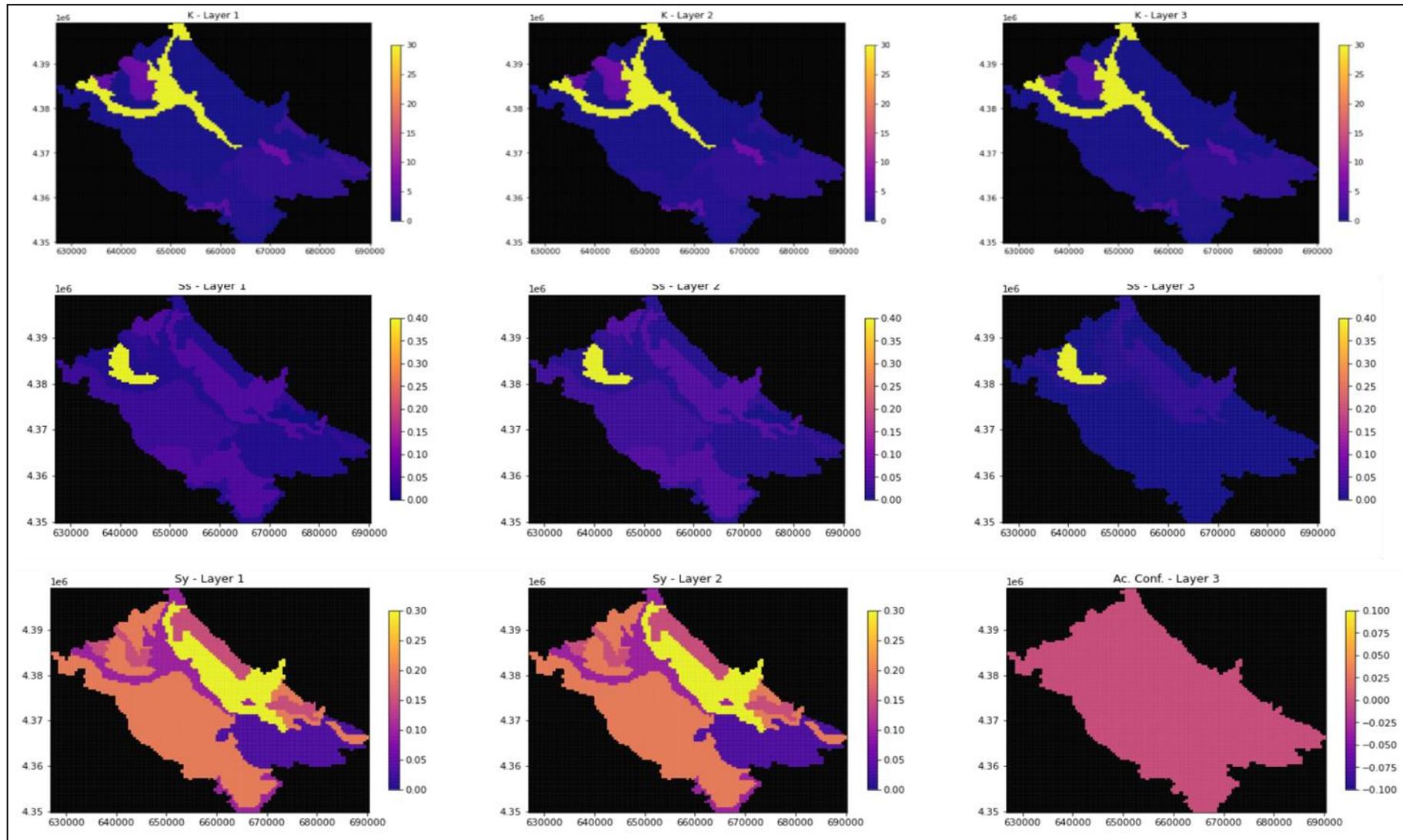


Figura 29: Parámetros hidrogeológicos en FloPy

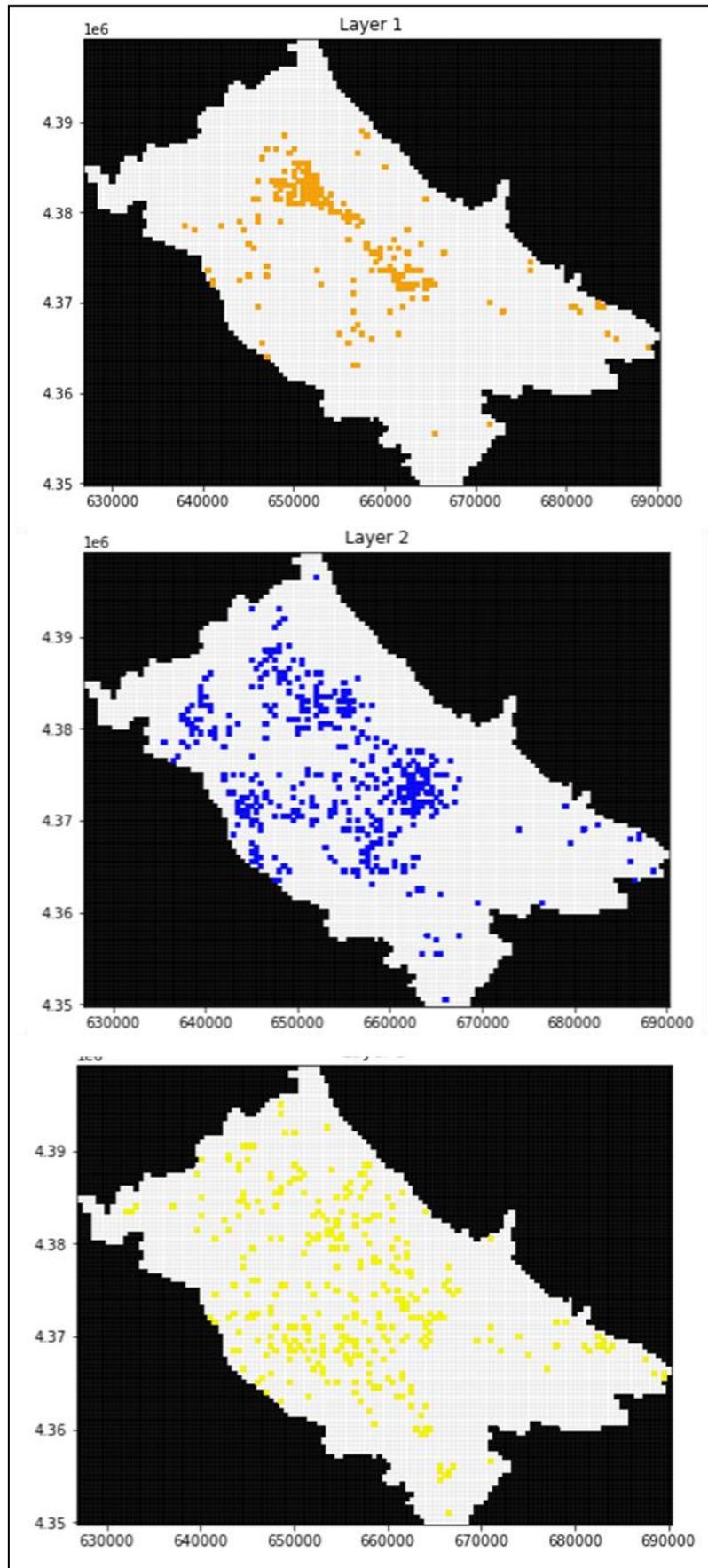


Figura 30: Pozos de bombeo por capas en FloPy

6. Calibración y análisis de resultados obtenidos

Una vez construido el modelo numérico se determina como objetivo comprobar si este modelo reproduce los datos registrados en campo. Siendo un desafío conseguir esto debido a la complejidad del sistema a pesar de contar con grandes avances en el conocimiento de la hidrología.

Se considera que una calibración ha terminado cuando luego de múltiples ensayos, existe un rango permisible de diferencia entre el valor observado y simulado.

En el área de estudio existen 10 piezómetros de observación disponibles en las masas de aguas subterráneas de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, que servirán de utilidad para la calibración del modelo.

El paquete “HOB” de MODFLOW se ejecuta usando “flopy.modflow.ModflowHob”. En este paquete, se establecerá la ubicación de los piezómetros en la celda que corresponda y el nivel piezométrico observado en un periodo establecido según el registro de campo. Para la implementación de los piezómetros de observación en FloPy se realizaron los siguientes pasos:

- Ingresar el código Python para la lectura del shapefile (10 piezómetros de observación). Creando una matriz que permita conocer la ubicación de las celdas atribuidas a cada piezómetro en el shapefile.
- Código Python que permita extraer la información del nivel piezométrico en el periodo de simulación del modelo (hoja Excel).
- Asignar los niveles piezométricos a cada celda antes ubicada, según la celda (fila y columna) a la que corresponda.

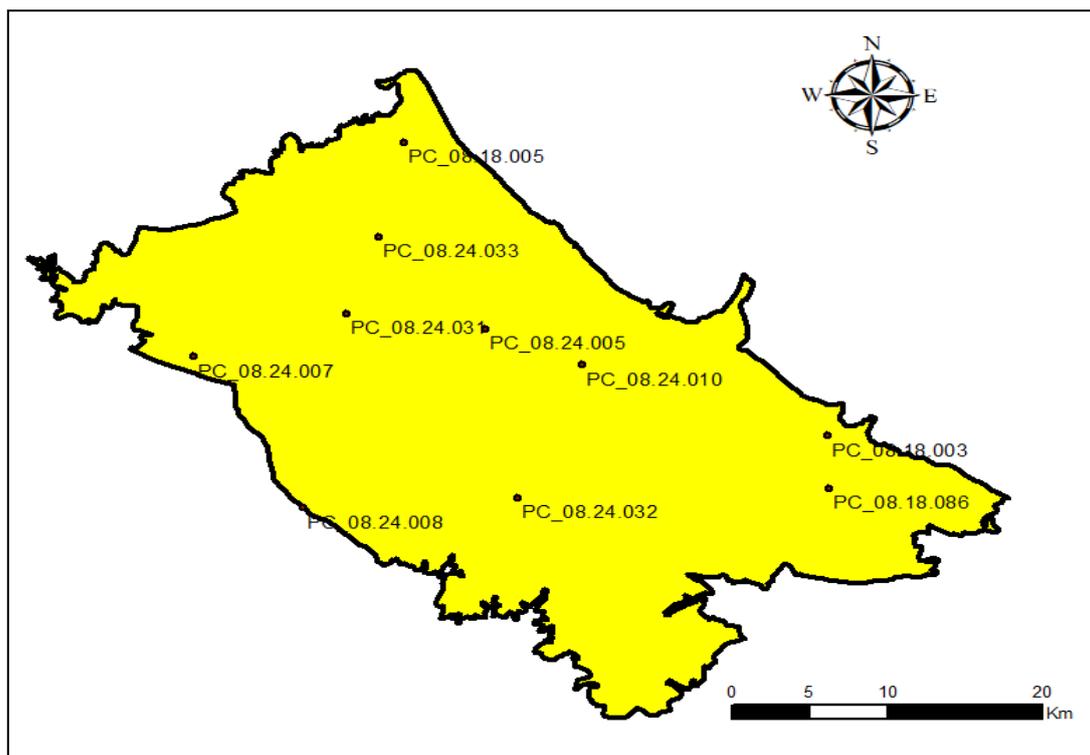


Figura 31: Ubicación de piezómetros observados en la calibración del modelo

Previo a la ejecución del modelo, se elige el algoritmo que usa MODFLOW con FloPy para realizar las simulaciones y resolver la ecuación del flujo.

Se utilizará el paquete “DE4”, ejecutándose en FloPy mediante flopy.modflow.ModflowDe4. El paquete DE4 (Direct Solver Package) usa los siguientes parámetros para su funcionamiento:

Tabla 2: Parámetros para el paquete de procesamiento DE4

Parámetro	Valor
Maximum number of iterations (ITMX)	5
Acceleration parameter (ACCL)	1
Head change closure criterion (HCLOSE)	1
Printout Interval (IPRD4)	1

6.1. Ejecución del modelo y resultados

Para un análisis profundo de los componentes del modelo se empleó el paquete flopy.utils.zonbud de FloPy, para determinar el balance global y el balance por zonas. Esta herramienta consiste en generar matrices con valor 1 a las celdas activas y 0 a las inactivas, realizando un balance celda por celda acorde al script de programación. Cabe resaltar la gran

flexibilidad del lenguaje de programación para realizar el balance y obtener resultados en cualquier celda de la malla que se desee evaluar.

Balance global

El balance global está representado por las entradas y salidas del sistema de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Tabla 03).

Tabla 3: Entradas y salidas del balance global

Entradas	Salidas
RECHARGE Infiltración de la precipitación y aportes de retornos de riego	WELLS Pozos de bombeo
HEAD DEP BOUNDS Transferencias laterales de masas de agua adyacentes	HEAD DEP BOUNDS Salida lateral hacia otras masas de agua adyacentes
RIVER LEAKAGE Interacción río-acuífero (río perdedor)	RIVER LEAKAGE Interacción río-acuífero (río ganador)

El procesamiento de datos suele ser un trabajo que demanda largas horas de gabinete, es por ello, se generó un script que contiene funciones y cuyo producto es una hoja Excel que resumen de forma anual todos los balances mensuales (432 periodos de tiempo).

En la figura 32 se observa el balance global de la simulación del modelo, siendo Delta S la variación de almacenamiento del acuífero.

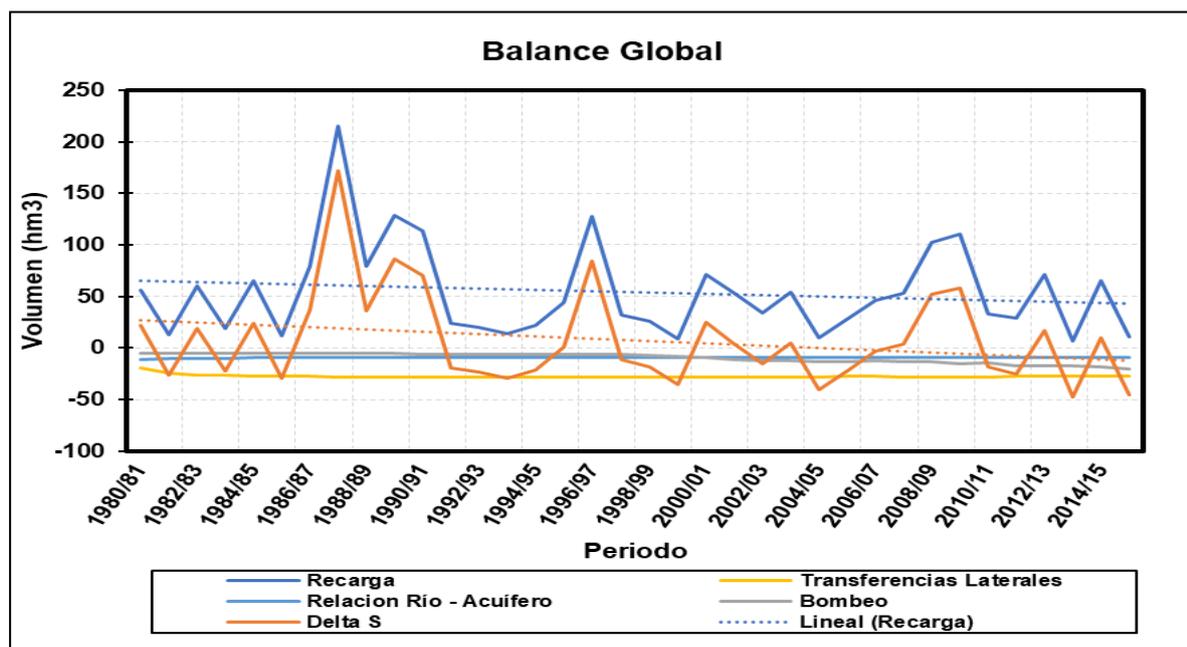


Figura 32: Balance global del sistema (hm³/año)

El promedio anual del balance se resume en la tabla 4.

Tabla 4: Promedio anual del balance del sistema

Descripción	Entrada (hm³)	Salida (hm³)	Delta (hm³)
Recarga	53.92	0	53.92
Otras Masas	15.62	43.04	-27.42
Río - Acuífero	1.87	11.16	-9.28
Bombeo	0	9.52	-9.52
TOTAL	71.41	63.72	7.70

De los resultados del balance del sistema, en el periodo 1980/81-2005/06, se observa que las reservas de la masa subterránea se han incrementado 7.70 hm³/año a lo largo de este tiempo. No obstante, en la figura 32, se observa que los últimos años la tendencia de almacenamiento ha sido negativa por el aumento de los volúmenes de bombeo y la disminución de las precipitaciones en las recargas.

La recarga es la principal fuente de ingreso agua al sistema que proviene de las precipitaciones y los retornos por riego. La evolución de la recarga muestra una tendencia negativa, pese a que la recarga media es de 53.92 hm³/año, con posible causa de los impactos climático en la zona de estudio, generando incertidumbre a un horizonte lejano.

Las salidas de agua son de 43.04 hm³/año producido por los límites laterales, 11.16 hm³/año por aporte a los cauces superficiales y 9.52 hm³/año por los pozos de extracción. La salida más significativa es por el límite de Buñol-Cheste, mientras que el límite Mira viene disminuyendo como aporte al sistema.

Balance por zonas

Separando el balance hidrogeológico en 6 zonas y utilizando el paquete flopy.utils.zonbud de FloPy, se ha realizado el análisis en cada zona. (tabla 5)

Tabla 5: Componentes del balance por zonas

Zona	Componentes
1	Contorno de Mira
2	Contorno con Buñol-Cheste
3	Rambla de la Torre
4	Río Madre
5	Río Magro
6	Río Buñol

Contorno con Mira

Al iniciar el año hidrológico 1980/81, el agua subterránea transferida lateralmente desde la masa de Mira a la de Requena-Utiel era de 25.8 hm³/año, descendiendo hasta el año 1986/87 y a partir de ese año hacia adelante, se estabiliza a los 14.6 hm³/año (figura 33). La transferencia desde la masa de Requena-Utiel hacia el contorno Mira, es de 8.2 hm³/año de manera constante en toda la escala temporal.

Debido a que las salidas del contorno de Mira presentan una linealidad, hace posible que las diferencias entre las entradas y salidas, se adapten la tendencia de las entradas. Por lo tanto, en el año hidrológico 1980/81 es 17.4 hm³/año, descendiendo hasta el año 1986/87 y a partir de ese año hacia adelante, estabilizándose a los 6.5 hm³/año.

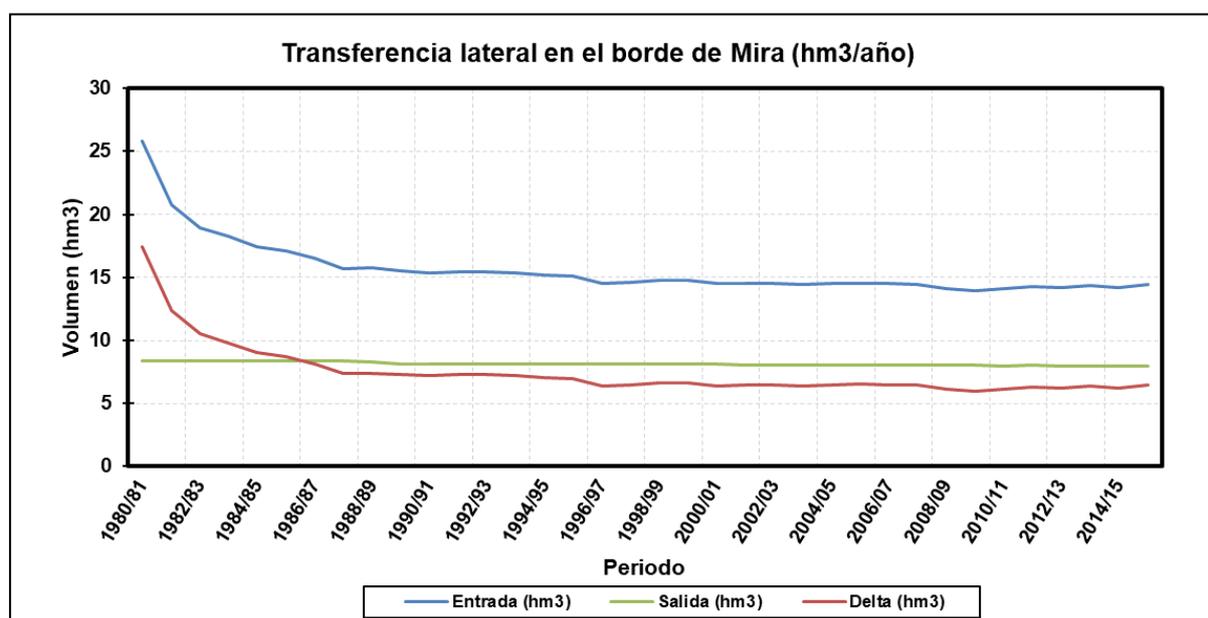


Figura 33: Balance hidrológico en el contorno con Mira (hm³/año)

Contorno con Buñol-Cheste

Se presenta únicamente una transferencia de agua del acuífero de Cabrillas-Malacara hacia el borde de Buñol-Cheste, con tendencia negativa constante, iniciando con 36 hm³/año hasta llegar a los 33 hm³/año (figura 34).

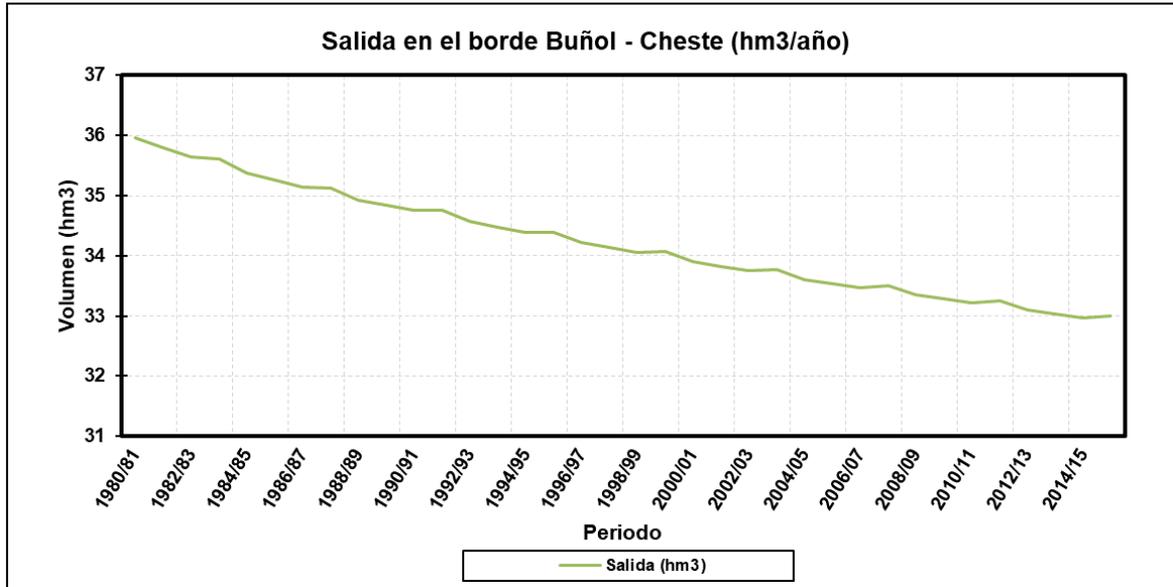


Figura 34: Balance hidrogeológico en el contorno con Buñol-Cheste (hm³/año)

Rambla de la Torre

En el año hidrológico 1980/81, la transferencia de agua subterránea de la rambla de la Torre al acuífero de Requena-Utiel, es de 1.27 hm³/año hasta llegar a un pico de 1.86 hm³/año en el año 1985/86, luego desciende hasta llegar a los 0.70 hm³/año. El sentido inverso del flujo muestra que el aporte del acuífero a la rambla de la Torre es de 0.67 hm³/año. reflejando que es un río perdedor por tener valores negativos en la diferencia de entradas y salidas (Figura 35).

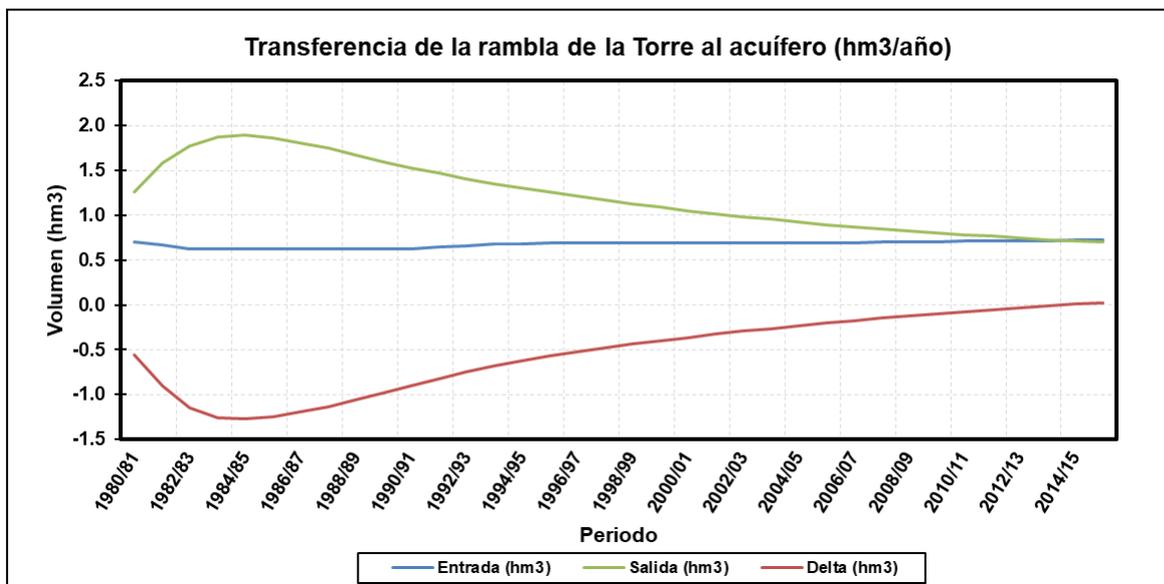


Figura 35: Balance hidrogeológico en la rambla de la Torre (hm³/año)

Río Madre

La transferencia de agua del acuífero al río Madre, en el inicio de la simulación es de 3.62 hm³/año y desciende de forma rápida hasta estabilizarse en 0.46 hm³/año. Y el aporte del río al acuífero se mantiene constante alrededor de 1 hm³/año. Por lo tanto, entre el año hidrológico 1980/81 a 1990/91, el río es ganador y en los años posteriores se convierte en un río perdedor con 0.72 hm³/año en el último año de simulación.

Río Magro

La transferencia de agua del acuífero al río Magro, en el primer año es de 3.82 hm³/año y se incrementa hasta los 6.5 hm³/año. El aporte del río al acuífero se mantiene frecuente durante todo el periodo simulado alrededor de 0.08 hm³/año. Por lo tanto, el río Magro es ganador (figura 37).

Río Buñol

El río Buñol sólo recibe ingresos de agua del acuífero, entre 3.80 y 3.60 hm³/año, lo que lo define como un río ganador, y descendiendo un 0.20 hm³/año en todo el periodo de simulación del modelo (figura 38).

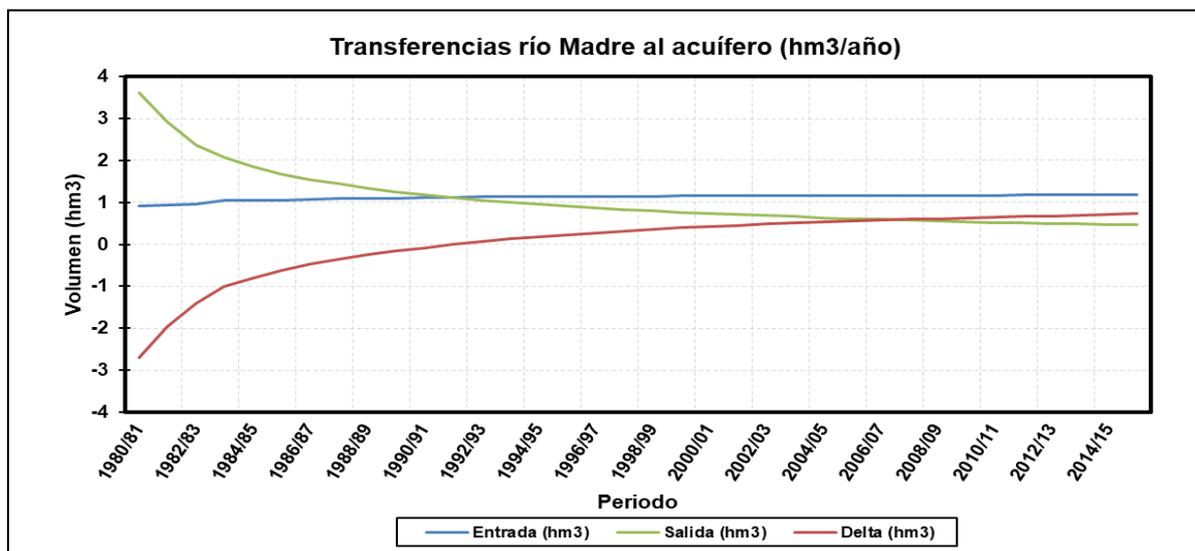


Figura 36: Balance hidrogeológico en el río Madre (hm³/año)

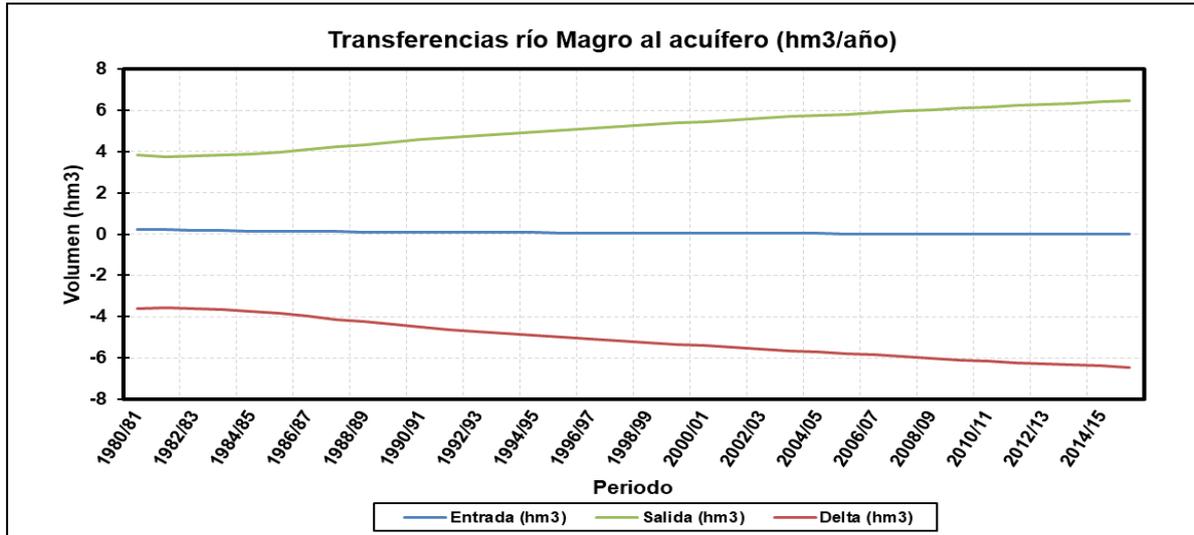


Figura 37: Balance hidrogeológico en el río Magro (hm³/año)

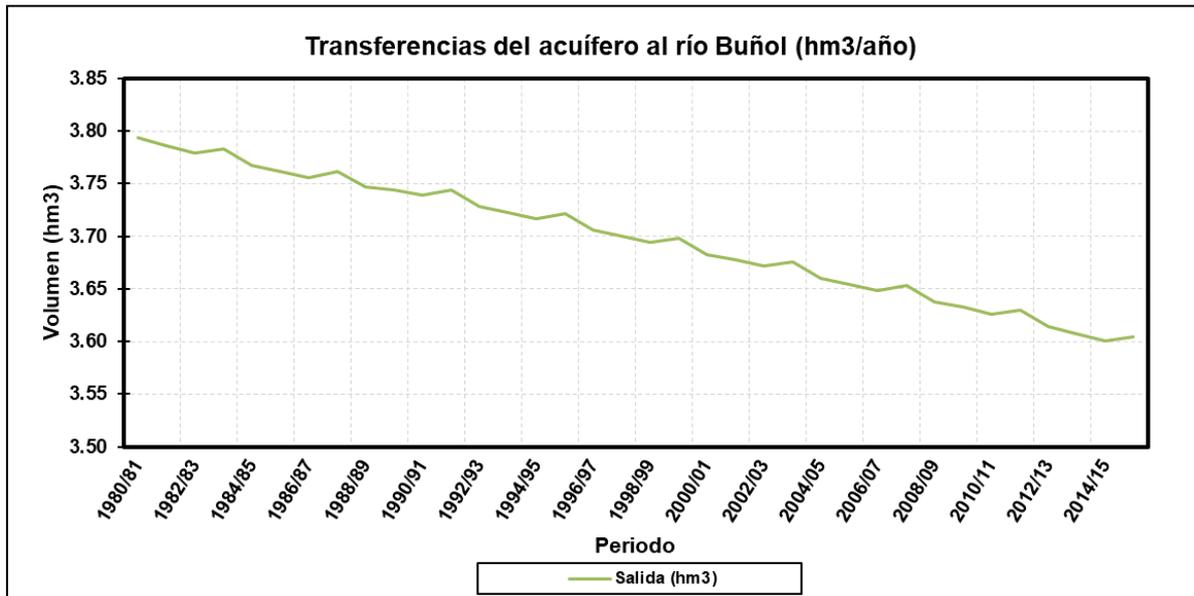


Figura 38: Balance hidrogeológico en el río Buñol (hm³/año)

Resumen del balance zonal

Los resultados del modelo se resumen en la tabla 6, mostrando las entradas, salidas y deltas promediados en el periodo de 1980/81 a 2015/16.

Tabla 6: Promedio anual del balance por zonas

Zona	Componentes del Balance	Entrada (hm³)	Salida (hm³)	Delta (hm³)	Tipología del río
	Recarga	53.92	0.00	53.92	
1	Borde Mira	15.62	8.15	7.47	
2	Borde Buñol-Cheste	0.00	34.23	-34.23	
3	Rambla de la Torre	0.68	1.21	-0.53	Ganador
4	Río Madre	1.12	1.08	0.04	Perdedor
5	Río Magro	0.07	5.17	-5.1	Ganador
6	Río Buñol	0.00	3.7	-3.7	Ganador
	Bombeos	0.00	9.52	-9.52	
	Total	71.41	63.06	8.35	

Niveles piezométricos

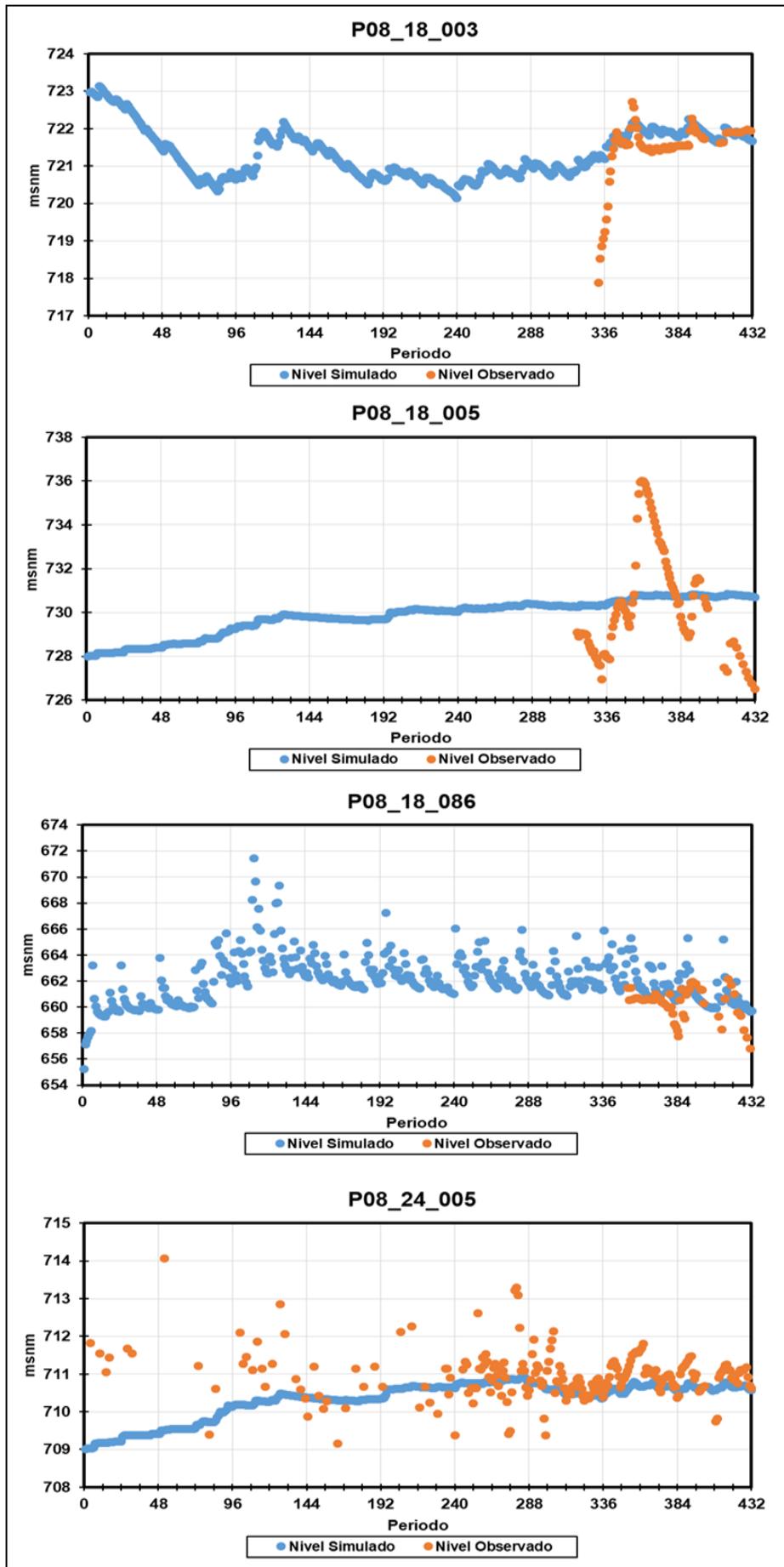
Se generó un script en Python para la extracción de los niveles piezométricos simulados en cada piezómetro y que sean manejables en una hoja Excel para su posterior ilustración. En la figura 39, se muestra la comparación de los valores piezométricos observados y simulados para su análisis.

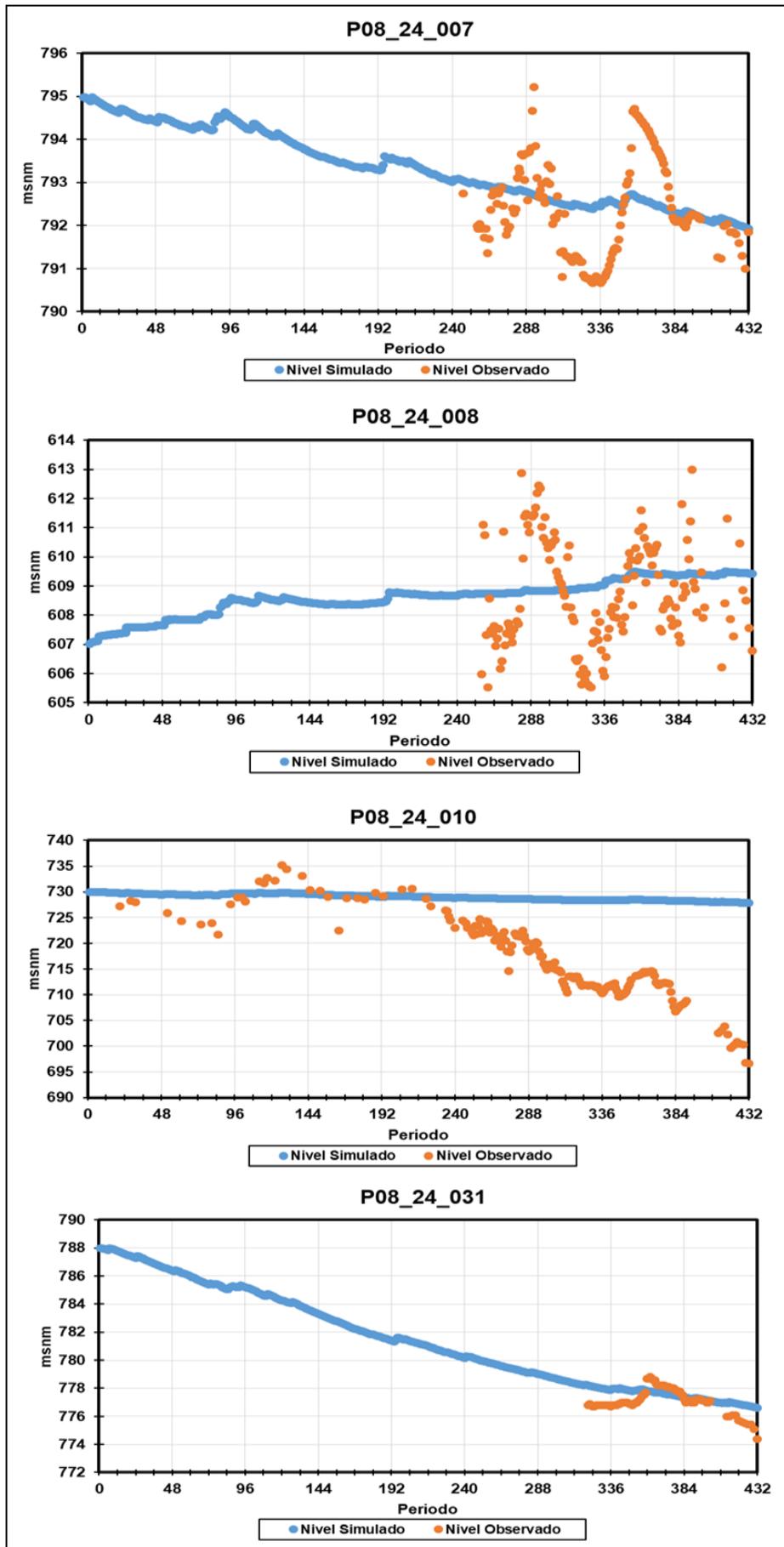
El comportamiento de los niveles piezométricos simulados en su mayoría tiene un gran acercamiento a los niveles observados, excepto los piezómetros 08.024.010 y 08.24.032 que presentan sesgos de 31.2 m y 21.3 m, respectivamente.

En los piezómetros 08.18.005, 08.24.005 y 08.24.008, los valores observados tienen una tendencia ascendente y los valores simulados una tendencia descendente en los últimos años del modelo simulado.

En el piezómetro 08.18.003, se observa que, en sus primeras lecturas observadas, el nivel de agua sube bruscamente y luego se estabiliza, se asume que esto es un error de lectura producto de algún fallo en el equipo de medición. Debido a que, los valores simulados presentan una buena relación con las posteriores lecturas, esto hace incurrir en la posibilidad del problema antes mencionado.

De forma general, se puede concluir que el mejor escudriñamiento de las condiciones de los acuífero y condiciones de borde ayudarían a mejorar el modelo, pero a pesar de ello, se tiene una buena aproximación al comportamiento de los acuíferos a lo largo del periodo de simulación.





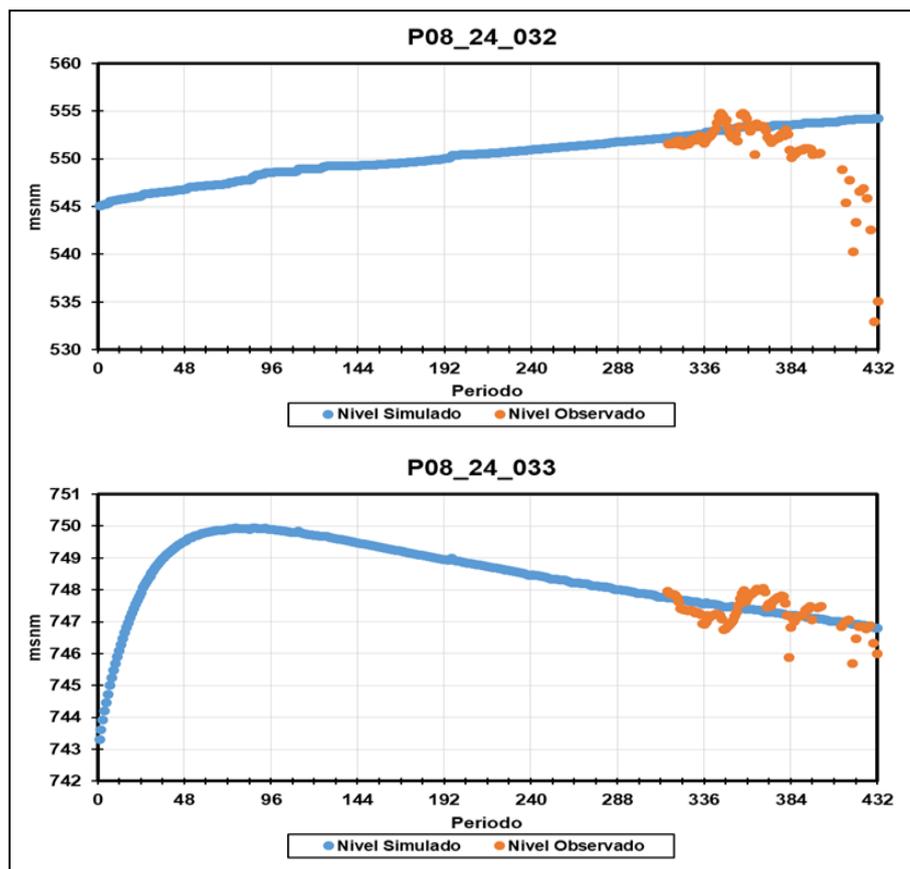


Figura 39: Valores de los piezómetros observados y simulados.

En la figura 40, se muestra el comportamiento de las curvas hidroisohipsas en sus 3 capas y en el periodo inicial, intermedio y final de la simulación del modelo, permitiendo conocer los sentidos impuestos por la conformación de las condiciones de borde y las direcciones del flujo (figura 41). En las figuras 42 y 43, se muestran secciones transversales del nivel de agua en el modelo.

Los scripts generados para la simulación del modelo pueden verse en los anejos. También están disponibles para análisis y consultas de usuarios interesado en este lenguaje de programación, en las siguientes direcciones web: <https://github.com/ajcorales/Numeric-Model-of-Requena-Utiel-and-Cabrillas-Malacara>.

Modelación matemática del flujo de agua subterránea de los acuíferos requena-utiel y cabrillas-malacara

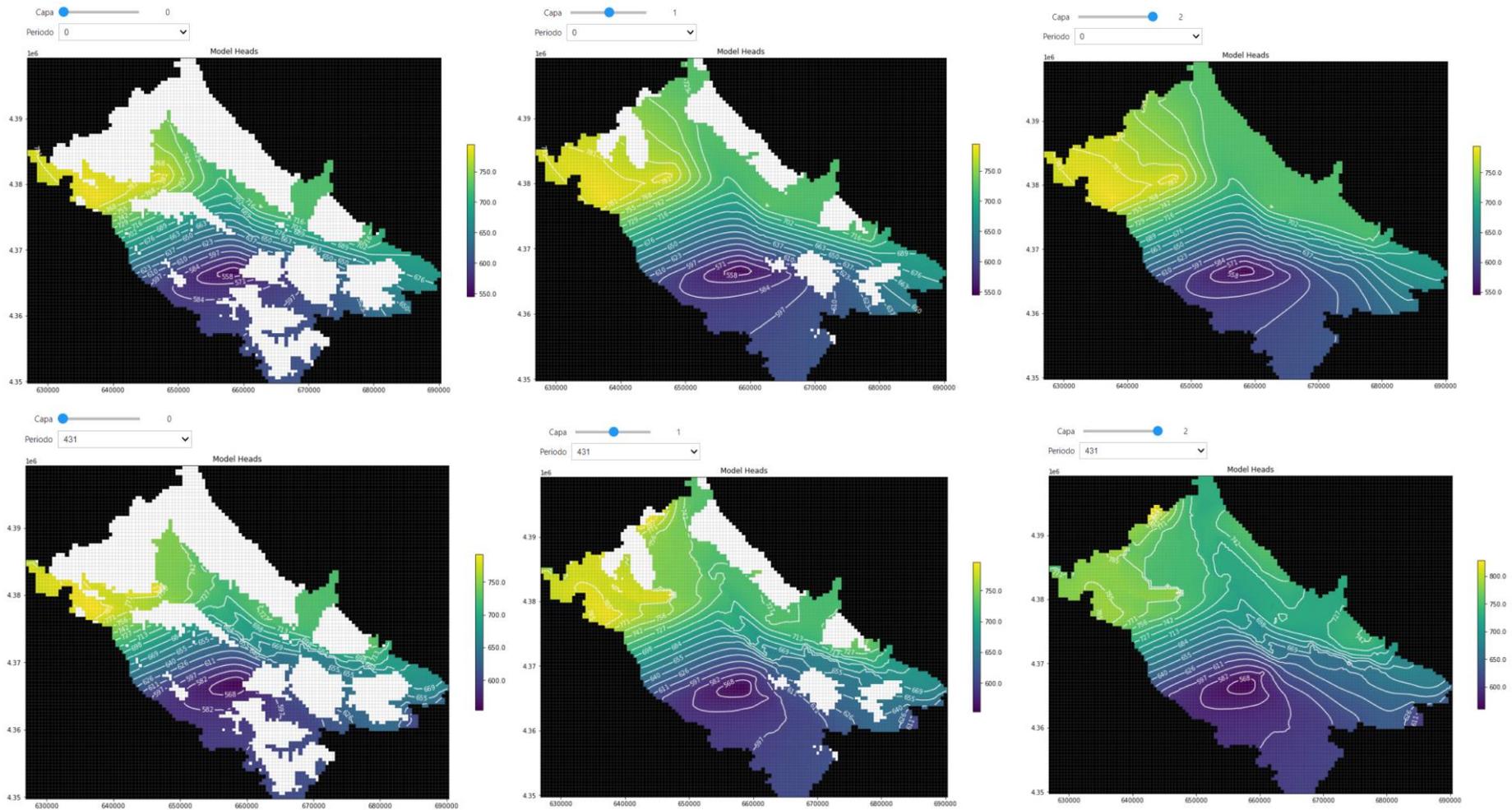


Figura 40: Curvas hidroisohipsas en FloPy

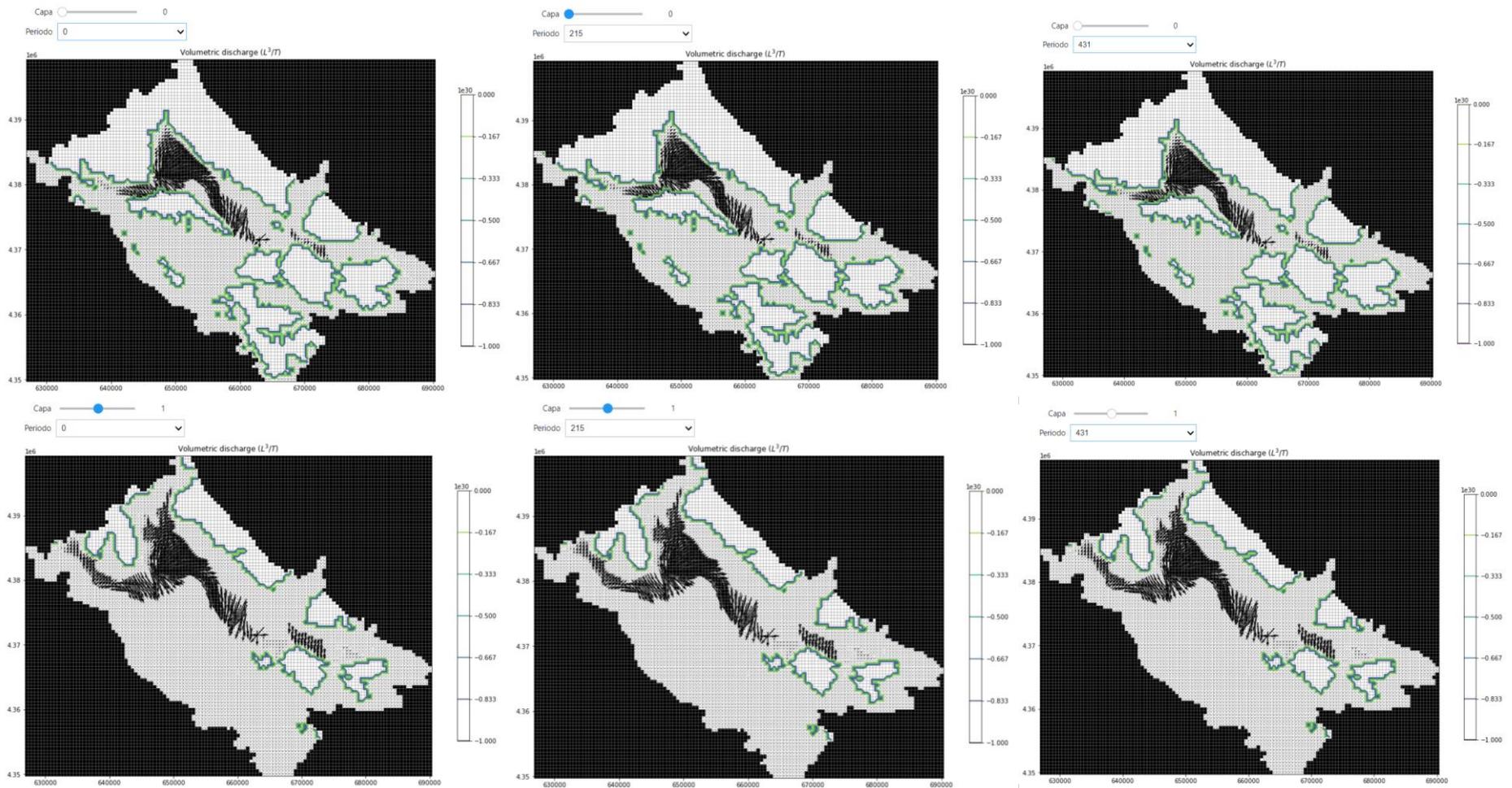


Figura 41: Direcciones del flujo en FloPy

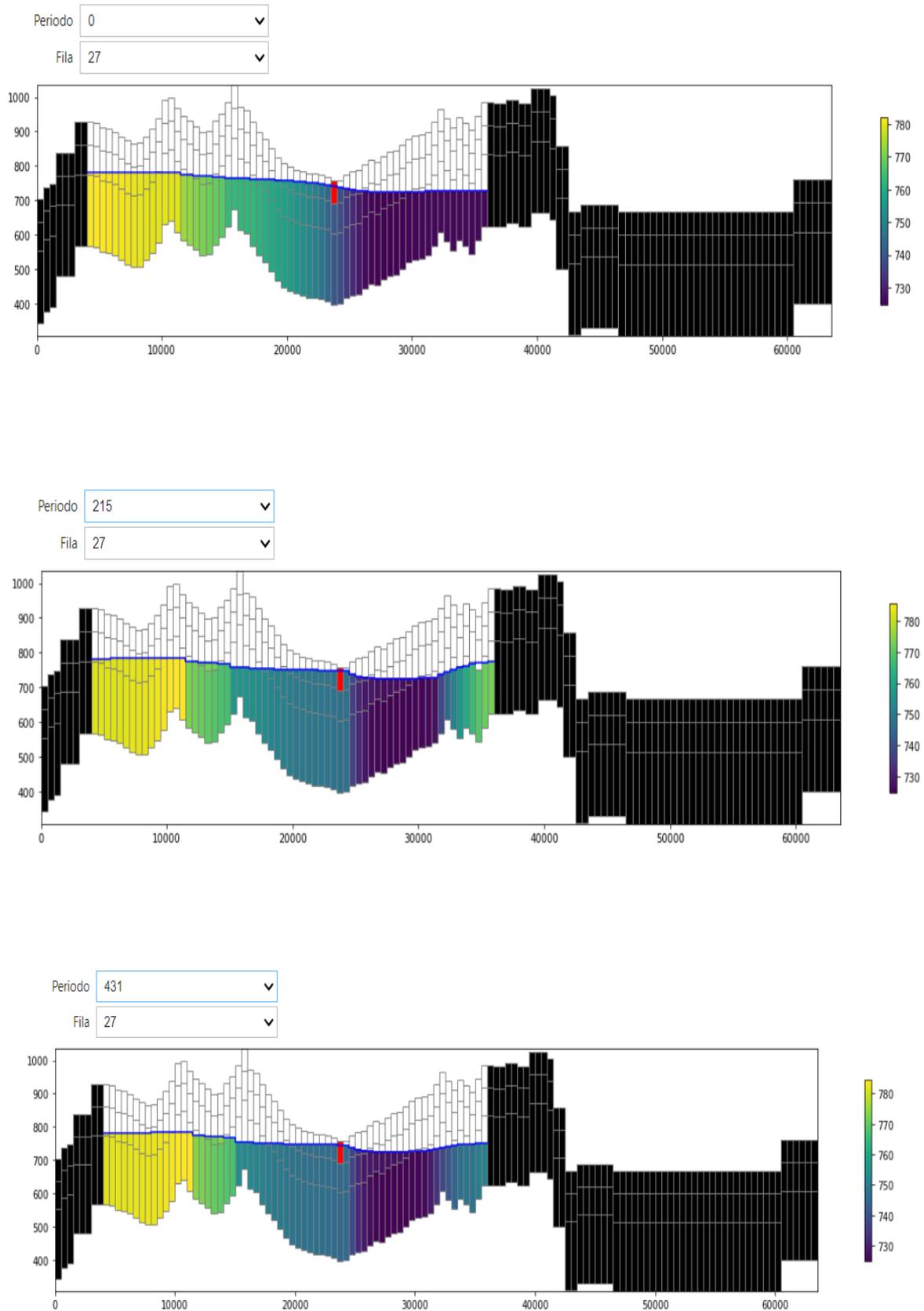


Figura 42: Secciones transversales del nivel piezométrico en la dirección “X”

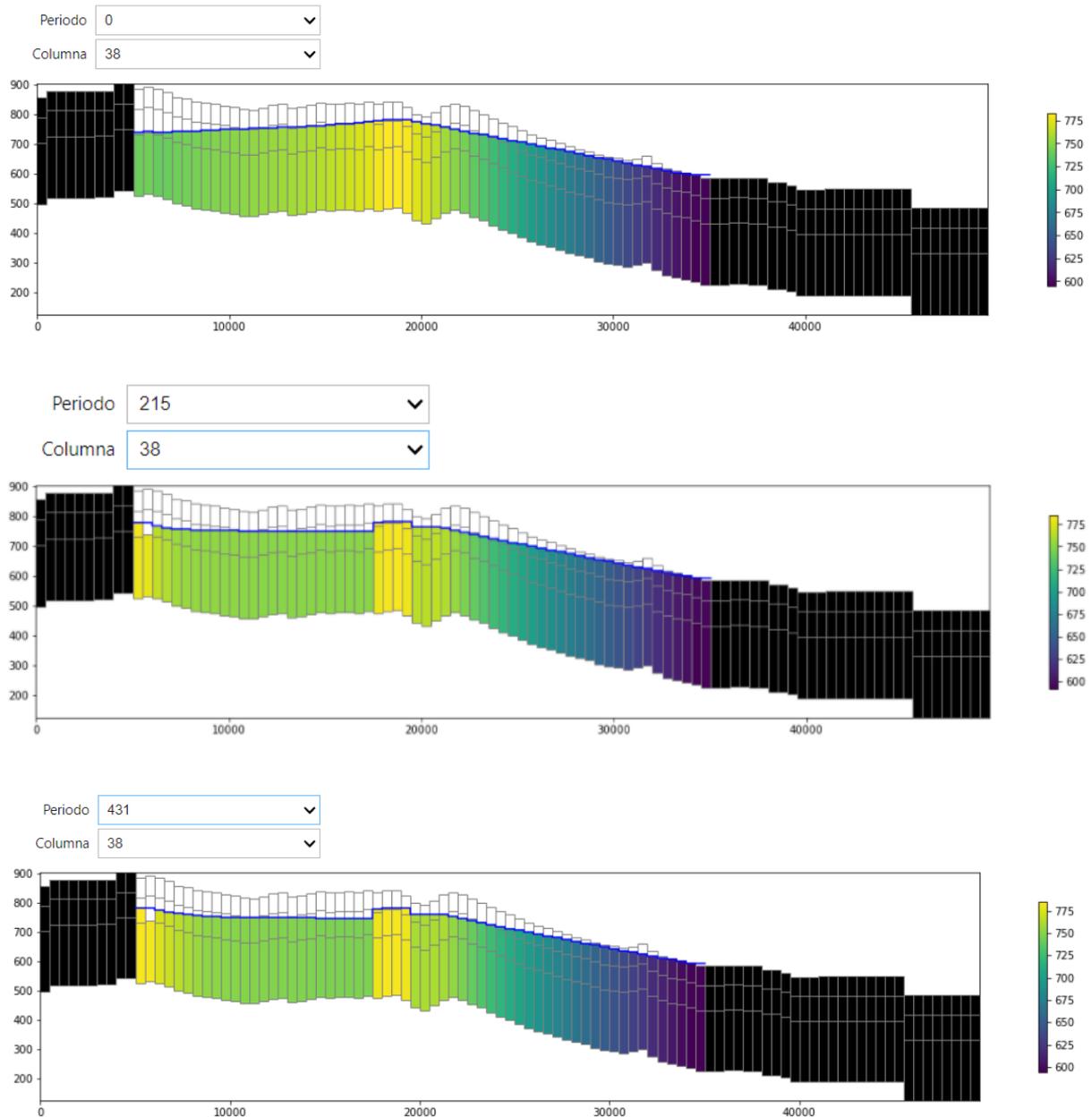


Figura 43: Secciones transversales del nivel piezométrico en la dirección “Y”

6.2. Pruebas de bondad de ajuste

Para evaluar la eficacia de ajuste de los valores observados y la precisión con los valores simulados, se deberán aplicar estadísticos de calibración para conocer las incertidumbres resultantes del modelo y establecer errores mínimos aceptables. Los resultados de los valores simulados son comparados con los valores observados en un plano de ejes X e Y, donde las ordenadas (X) representa a los valores observados y las abscisas (Y) representa a los valores simulados. Por lo tanto, se debe observar la dispersión de estos valores y la distancia que existe

a una línea de valor central, indicando que, cuanto menor sea la distancia existirá menor error en el modelo.

Una vez obtenido los valores simulados de los niveles piezométricos de cada pozo de observación se genera una grafica X e Y (Figura 44). Observándose una baja diferencia entre los valores simulados y observados, excepto el pozo 08.24.032 y 04.24.010 con residuos en valor absoluto de 21.3 m y 31.2 m respectivamente, y puede ser ocasionado por la poca información piezométrica en esos pozos de observación, dificultando una correcta conceptualización del modelo.

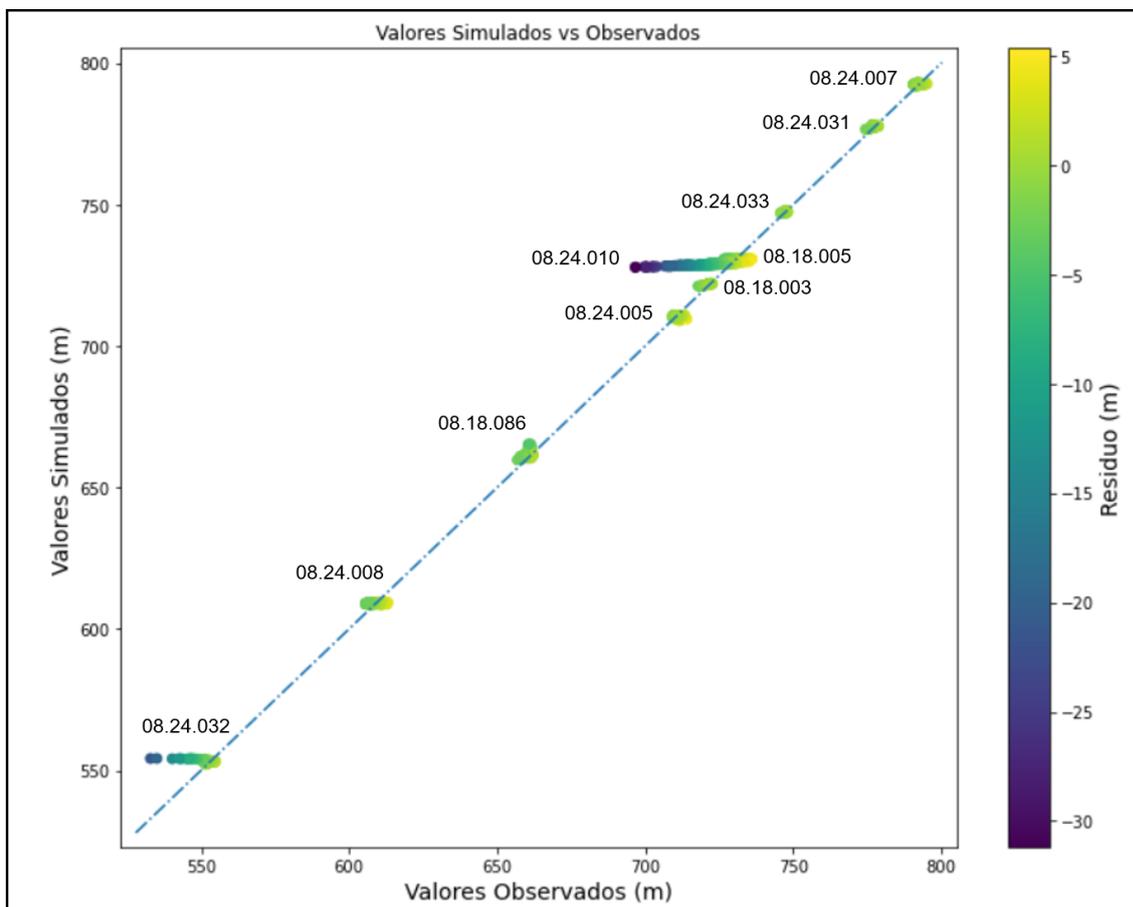


Figura 44: Análisis estadístico de los valores observados y simulados de los niveles piezométricos

Analizando el histograma de la distribución de residuos en intervalos de 2m, se aprecia que el 82% de los valores se encuentran en el intervalo de -4 a 4 m de residuo. Por lo tanto, el mayor número de residuos se aproximan al valor observado del modelo.

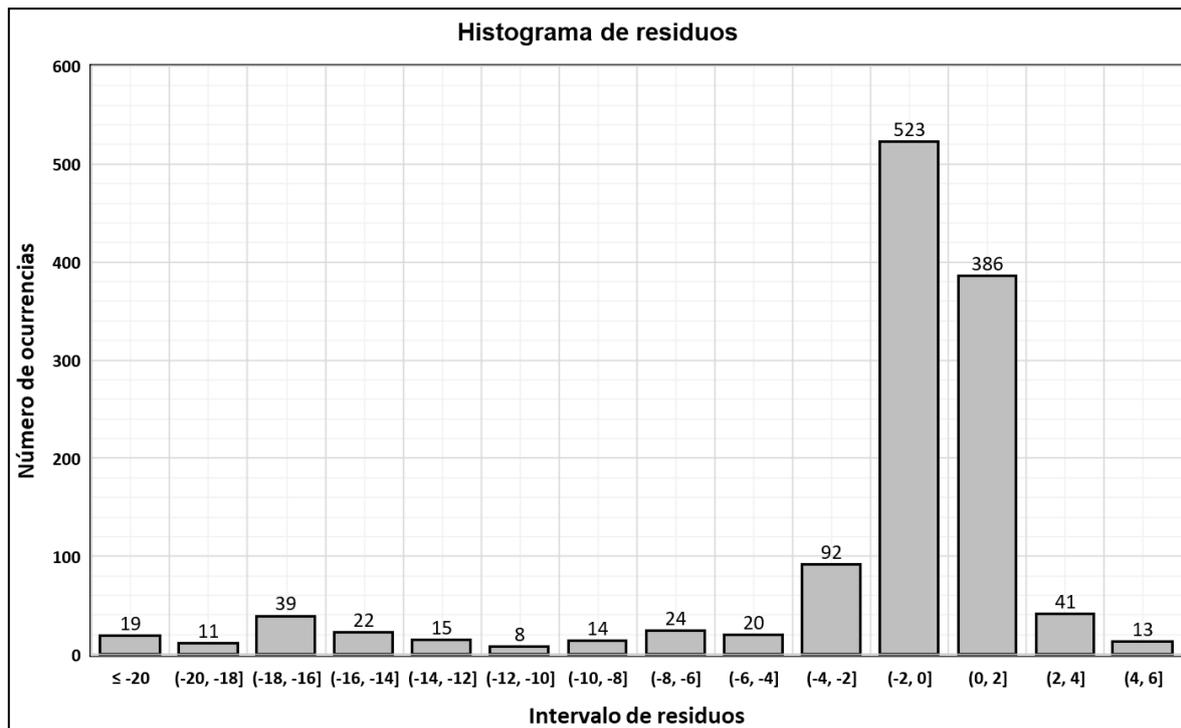


Figura 45: Frecuencia relativa de los residuos

A continuación, se presentan 4 indicadores estadísticos para corroborar que los resultados del modelo son buenos, pese a obtener resultados dispersos.

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): Índice que estima la desviación de los valores simulados en comparación con los observados. Un valor 0 indica un ajuste perfecto, no puede ser negativo. Un RMSE más bajo indica un mejor ajuste a los valores observados.
- Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE): Se normaliza el RMSE.
- Eficiencia de Nash-Sutcliffe: Es uno de los estadísticos más usados, si es igual a 1 significa que la simulación es perfecta.
- Coeficiente de determinación (R^2): Es el cuadrado del coeficiente de correlación. Un valor R^2 alto representa un modelo adecuado y un valor R^2 bajo es una simulación que no se ajusta a los datos.

En la tabla 7 se detallan los indicadores de eficiencia del modelo, las fórmulas, valores de referencia y los resultados obtenidos de la calibración del modelo. Se obtuvieron buenos resultados concluyéndose que se tiene una buena calibración en general y que el modelo reproduce la realidad de forma aceptable.

Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste del modelo

Indicador de eficiencia	Fórmula	Valores de referencia		Resultado
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$	Perfecto	0	5.677
NRMSE	$NRMSE = 100 \times \frac{1}{h_{obs}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$	Excelente Bueno Aceptable Pobre	< 10% 10 – 20% 20 – 30% >30%	2.165%
Coefficiente de Nash-Sutcliffe	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \overline{h_{obs}})^2}$	Excelente Muy bueno Bueno Satisfactorio Insuficiente	>0.8 0.6 – 0.8 0.4 – 0.6 0.2 – 0.4 <0.2	0.993
Coefficiente de determinación	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n ((h_{obs,i} - \overline{h_{obs}}) \times (h_{sim,i} - \overline{h_{sim}}))}{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \overline{h_{obs}})^2 \times \sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - \overline{h_{sim}})^2} \right)^2$	Perfecto	1	0.994

Donde h_{obs} y h_{sim} corresponden a los valores observados y simulados, $\overline{h_{obs}}$ y $\overline{h_{sim}}$ corresponden a la media de los valores observados y simulados.

7. Aplicación del modelo

La finalidad de un modelo calibrado es predecir el futuro de un sistema en base a hipótesis, que permitan mostrar resultados del comportamiento de sus componentes y proporcionen herramientas para la toma de decisiones a corto, medio o largo plazo.

Para las simulaciones de escenarios se ha tenido como punto de partida el modelo calibrado de octubre de 1980 a septiembre de 2016 (36 años). Los escenarios se desarrollan en el periodo octubre de 2016 a septiembre de 2027 (11 años), bajo condiciones que se detallan más adelante y que quieren imitar el posible efecto del cambio climático.

7.1. Escenario 1

El escenario 1 consiste en el modelo calibrado del periodo 1980/81-2015/16.

7.2. Escenario 2

Se desea conocer la respuesta del modelo, en el escenario 2, bajo las siguientes condiciones:

- Los bombeos para cubrir las siguientes demandas:

- Los bombeos agrícolas se prolongan repitiendo los últimos 11 años de la serie original.
- Los bombeos urbanos se prolongan repitiendo los últimos 11 años de la serie original.
- Los bombeos industriales se prolongan repitiendo los últimos 11 años de la serie original.
- La recarga permanece igual. Se extiende la serie repitiendo los últimos 11 años de la serie original.
- Reducir los retornos de riego 1% cada año a partir de 2016/2017, (figura 46).
- Los contornos se configuran extendiendo las series repitiendo los últimos 11 años de cada piezómetro.
- En los objetos de los ríos se extiende su configuración en el tiempo 11 años manteniendo todos los parámetros.

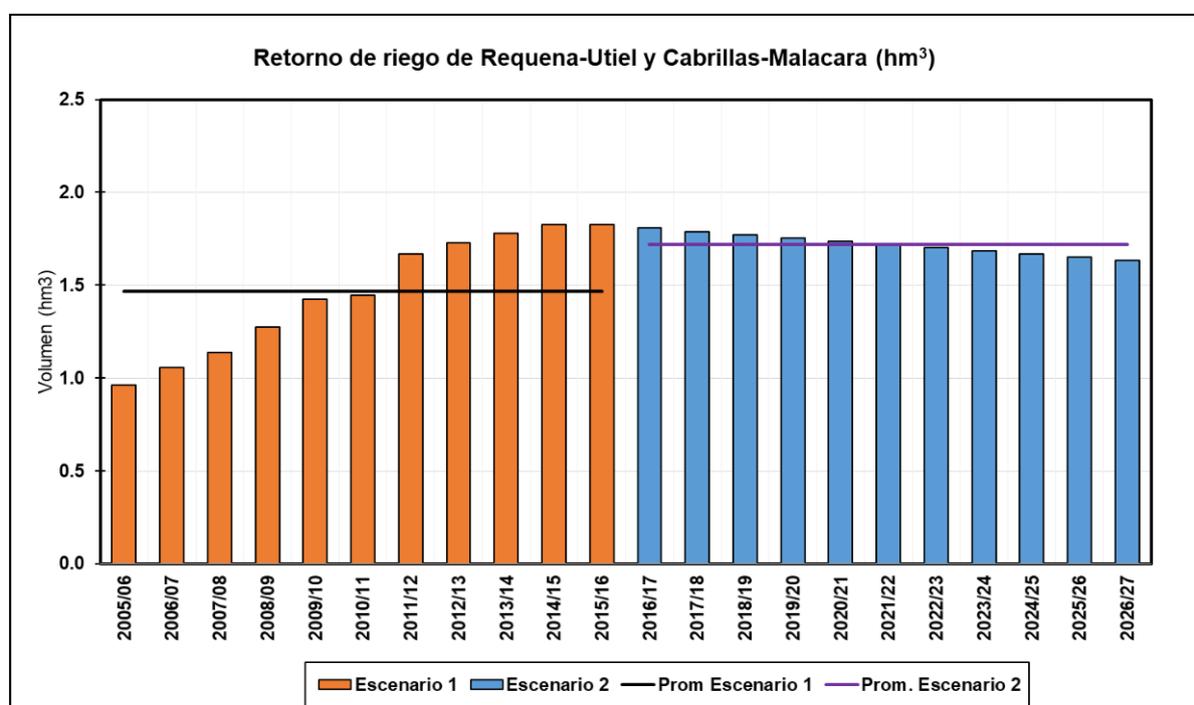


Figura 46: Reducción de retornos de riego en el escenario 2

7.3. Escenario 3

Se desea conocer la respuesta del modelo, en el escenario 3, bajo las siguientes condiciones:

- Todo igual al escenario 2.
- Reducir la recarga por infiltración de la precipitación un 12%, se copian los últimos 11 años y se reduce un 12% la serie. (figura 47)

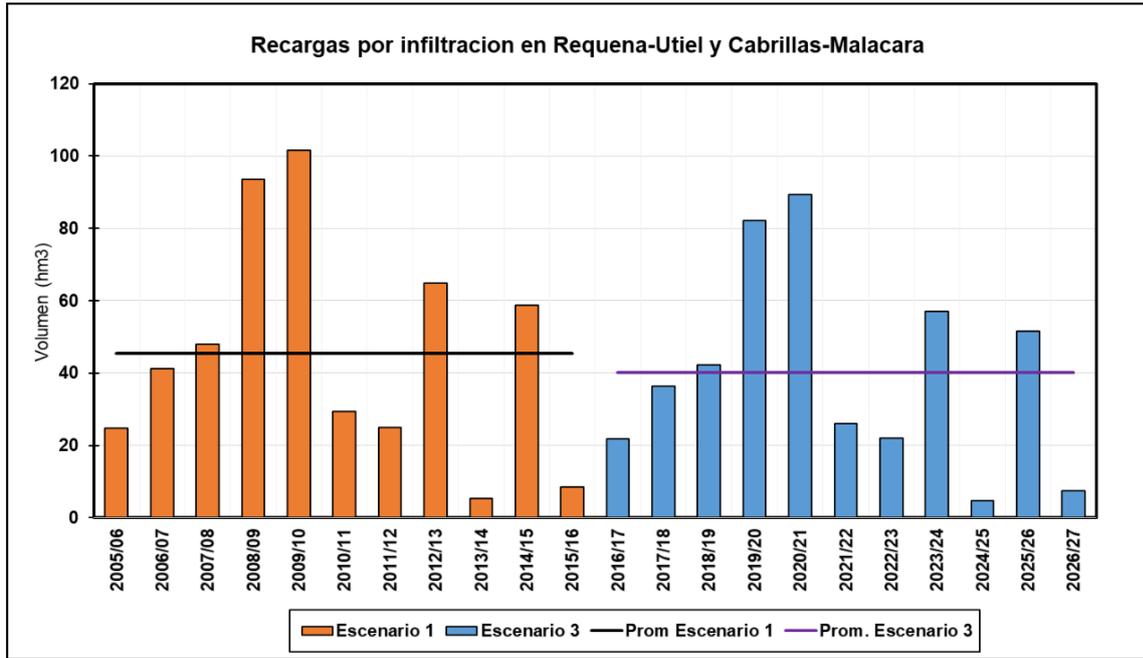


Figura 47: Reducción de recargas por infiltración en el escenario 3

7.4. Escenario 4

Se desea conocer la respuesta del modelo, en el escenario 4, bajo las siguientes condiciones:

- Todo igual al escenario 2.
- Reducir la recarga por infiltración de la precipitación un 20%, se copian los últimos 11 años y se reduce un 20% la serie (figura 48).

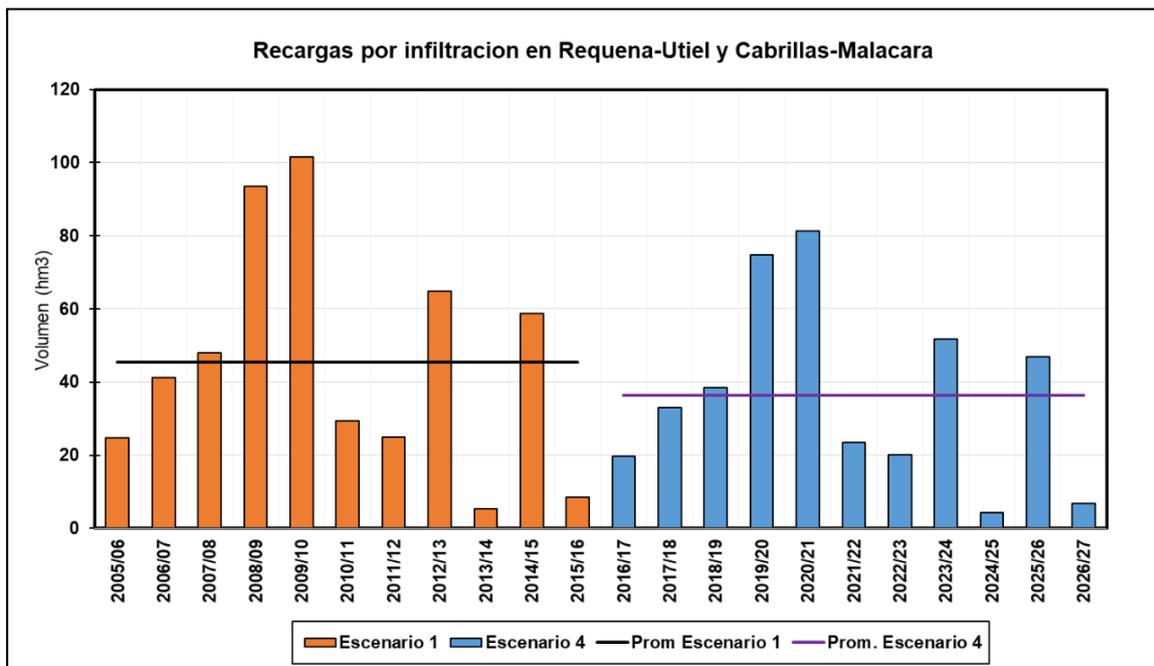


Figura 48: Reducción de recargas por infiltración en el escenario 4

7.5. Análisis del balance del sistema en los diferentes escenarios

En la Tabla 8 se presenta el balance medio de los diferentes escenarios para el periodo 2016/17-2026/27. Como es notorio, las simulaciones influenciadas por el cambio climático reducirían las entradas al sistema del modelo.

Cada año es necesario satisfacer la demanda de agua para el sector agrícola, que proviene de los pozos de extracción. Por lo tanto, en el escenario más drástico, el sistema perdería 10.46 hm³ anuales.

Las simulaciones realizadas en los diferentes escenarios representan hipótesis del comportamiento de las masas de agua subterráneas de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, causado por el efecto del cambio climático proyectados al periodo 2026/27. Por lo tanto, en el futuro, se podrían crear políticas más estrictas en la gestión de los recursos hídricos de la zona y mantener un buen estado de las masas de agua de Requena-Utiel.

Tabla 8: Promedio anual del balance global

Escenario	Componentes del Balance	Entradas	Salidas	Almacenamiento
		hm ³	hm ³	hm ³
Escenario 1 (1980/81 a 2015/16)	Recarga	53.92		53.92
	Otras masas	15.62	43.04	-27.42
	Río - acuífero	1.87	11.16	-9.28
	Bombeo		9.52	-9.52
	Total	71.42	63.72	7.70
Escenario 2 (2016/17 a 2026/27)	Recarga	50.89		50.89
	Otras masas	14.25	40.94	-26.69
	Río - acuífero	1.95	11.36	-9.41
	Bombeo		15.53	-15.53
	Total	67.10	67.84	-0.74
Escenario 3 (2016/17 a 2026/27)	Recarga	44.99		44.99
	Otras masas	14.30	40.93	-26.63
	Río - acuífero	1.95	11.35	-9.40
	Bombeo		15.53	-15.53
	Total	61.24	67.82	-6.58
Escenario 4 (2016/17 a 2026/27)	Recarga	41.06		41.06
	Otras masas	14.33	40.92	-26.60
	Río - acuífero	1.95	11.35	-9.39
	Bombeo		15.53	-15.53
	Total	57.34	67.80	-10.46

En el periodo 2016/17 - 2026/27, se observa una disminución del delta de almacenamiento del acuífero directamente afectada por la disminución de la recarga, según cada escenario (Figura 49).

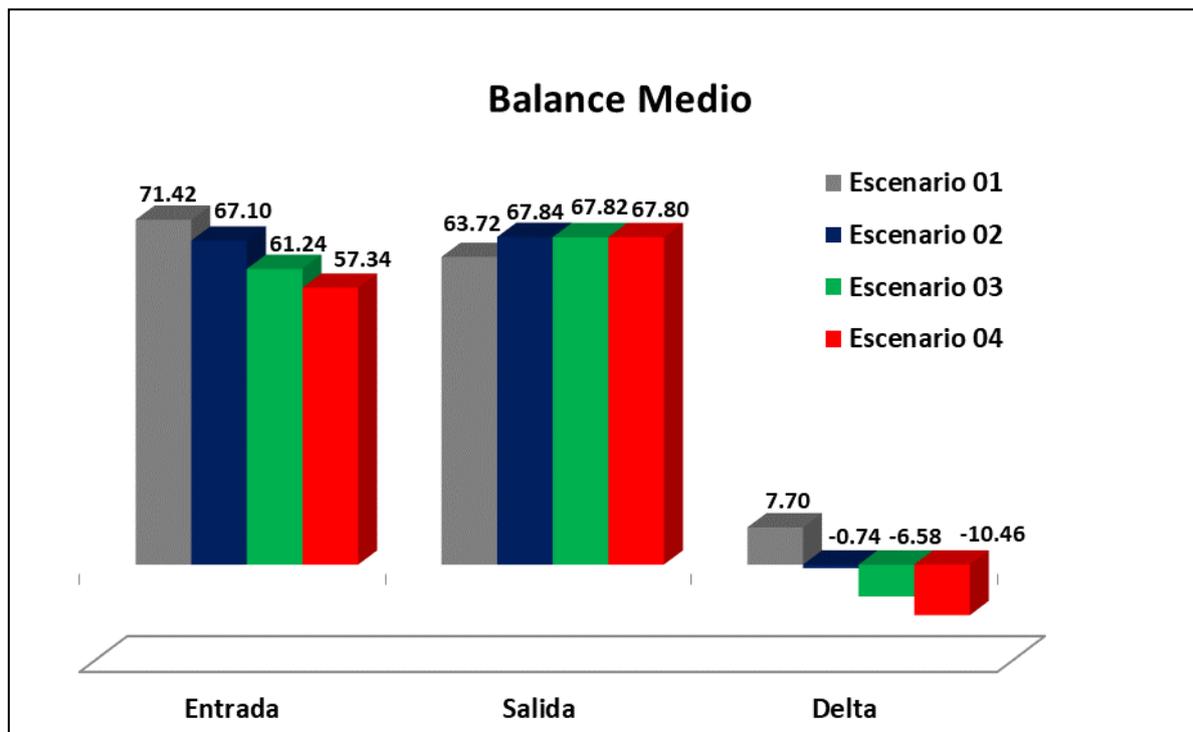


Figura 49: Balance medio del sistema en los diferentes escenarios simulados

7.6. Análisis del balance por zonas en los diferentes escenarios

En los bordes de La Mira y Buñol-Cheste, continúa la tendencia en el aumento de las entradas y salidas, debido a la disminución de la recarga en los diferentes escenarios.

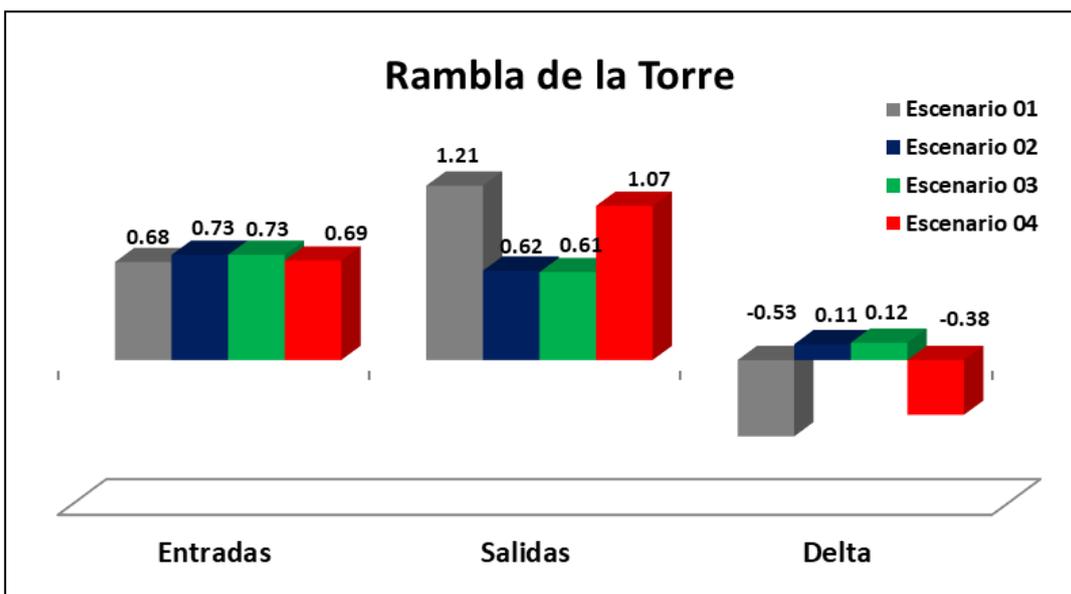
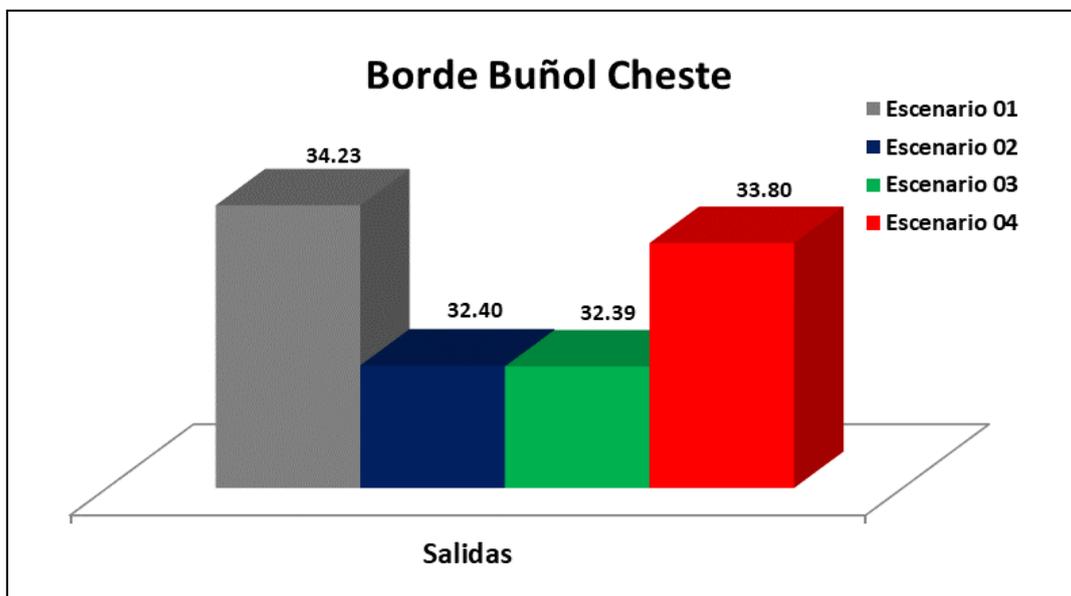
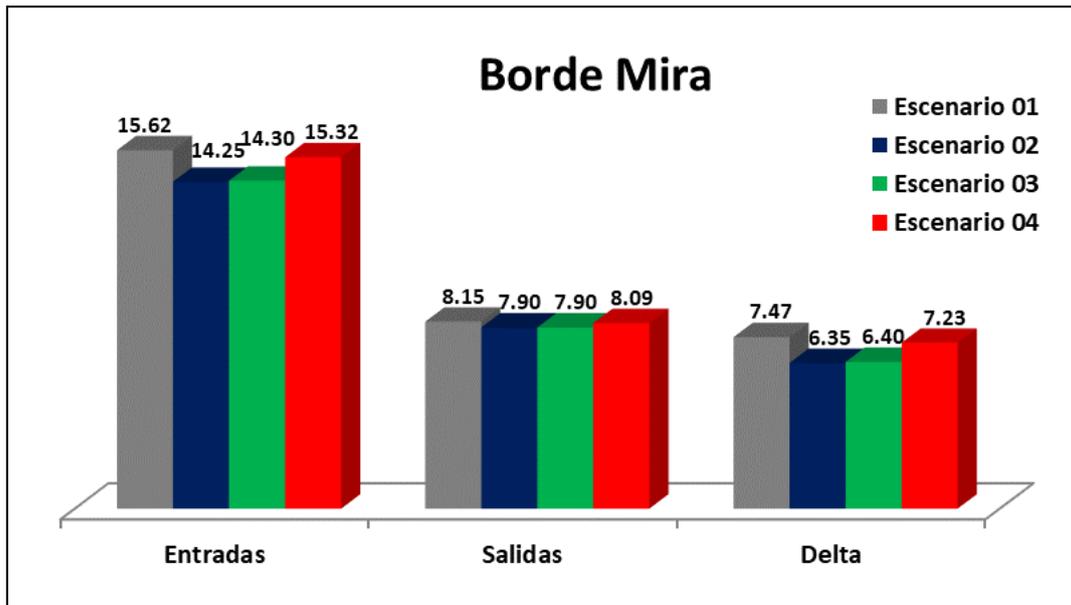
En la rambla de la Torre, en los escenarios 2 y 3, continúa siendo perdedor, salvo, en el escenario 04 se observa el cambio a ganador. En el río Magro, en todos los escenarios continúa la tendencia de ser un río perdedor.

En el río Madre continúa la tendencia a ser un río perdedor, pero en el escenario 4 se observa una disminución notoria en el volumen, esto indicaría que puede convertirse en un río ganador a largo plazo.

El río Buñol, en todos los escenarios, continúa la tendencia de un río perdedor. Todos los resultados se muestran en la tabla 9 y se representan en la figura 50.

Tabla 9: Resumen de resultados de escenarios

Escenarios	Zonas	Componentes del Balance	Entradas	Salidas	Delta	Tipología del río
			hm3	hm3	hm3	
Escenario 1 (1980/81 a 2015/16)		Recarga	53.92		53.92	
	1	Borde Mira	15.62	8.15	7.47	
	2	Borde Buñol Cheste	0.00	34.23	-34.23	Ganador
	3	Rambla de la Torre	0.68	1.21	-0.53	Perdedor
	4	Río Madre	1.12	1.08	0.04	Ganador
	5	Río Magro	0.07	5.17	-5.10	Ganador
	6	Río Buñol	0.00	3.70	-3.70	
		Bombeos		9.52	-9.52	
		Total	71.41	63.06	8.35	
Escenario 2 (2016/17 a 2026/27)		Recarga	50.89		50.89	
	1	Borde Mira	14.25	7.90	6.35	
	2	Borde Buñol Cheste	0.00	32.40	-32.40	
	3	Rambla de la Torre	0.73	0.62	0.11	Perdedor
	4	Río Madre	1.20	0.41	0.79	Perdedor
	5	Río Magro	0.02	6.78	-6.76	Ganador
	6	Río Buñol	0.00	3.56	-3.56	Ganador
		Bombeos		15.53	-15.53	
		Total	67.09	67.20	-0.11	
Escenario 3 (2016/17 a 2026/27)		Recarga	44.99		44.99	
	1	Borde Mira	14.30	7.9	6.40	
	2	Borde Buñol Cheste	0.00	32.39	-32.39	
	3	Rambla de la Torre	0.73	0.61	0.12	Perdedor
	4	Río Madre	1.20	0.41	0.79	Perdedor
	5	Río Magro	0.02	6.77	-6.75	Ganador
	6	Río Buñol	0.00	3.56	-3.56	Ganador
		Bombeos		15.53	-15.53	
		Total	61.24	67.17	-5.93	
Escenario 4 (2016/17 a 2026/27)		Recarga	41.06		41.06	
	1	Borde Mira	15.32	8.09	7.23	
	2	Borde Buñol Cheste	0.00	33.80	-33.80	
	3	Rambla de la Torre	0.69	1.07	-0.38	Ganador
	4	Río Madre	1.14	0.92	0.22	Perdedor
	5	Río Magro	0.06	5.54	-5.48	Ganador
	6	Río Buñol	0.00	3.67	-3.67	Ganador
		Bombeos		15.53	-15.53	
		Total	58.27	68.62	-10.35	



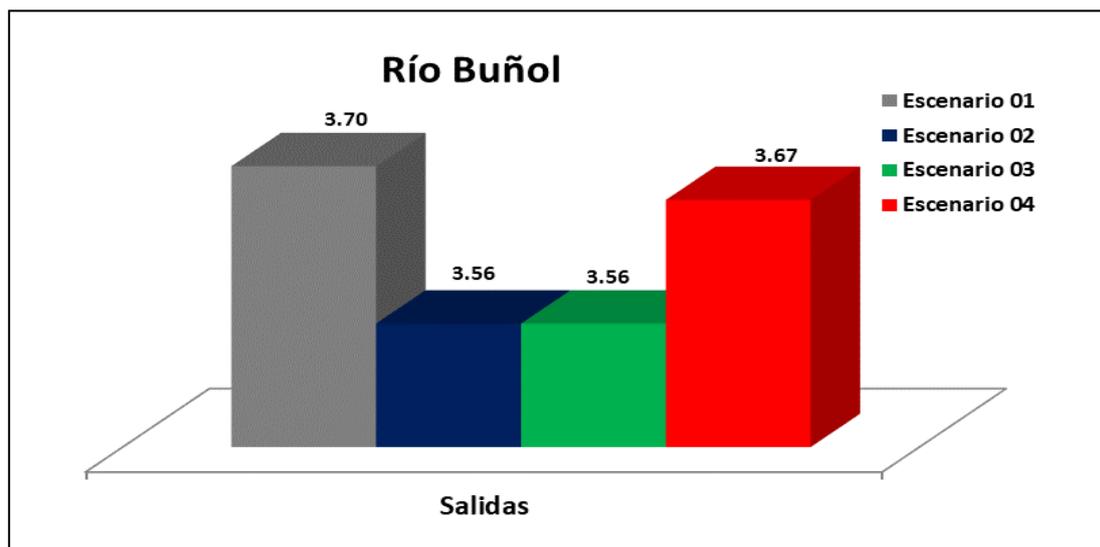
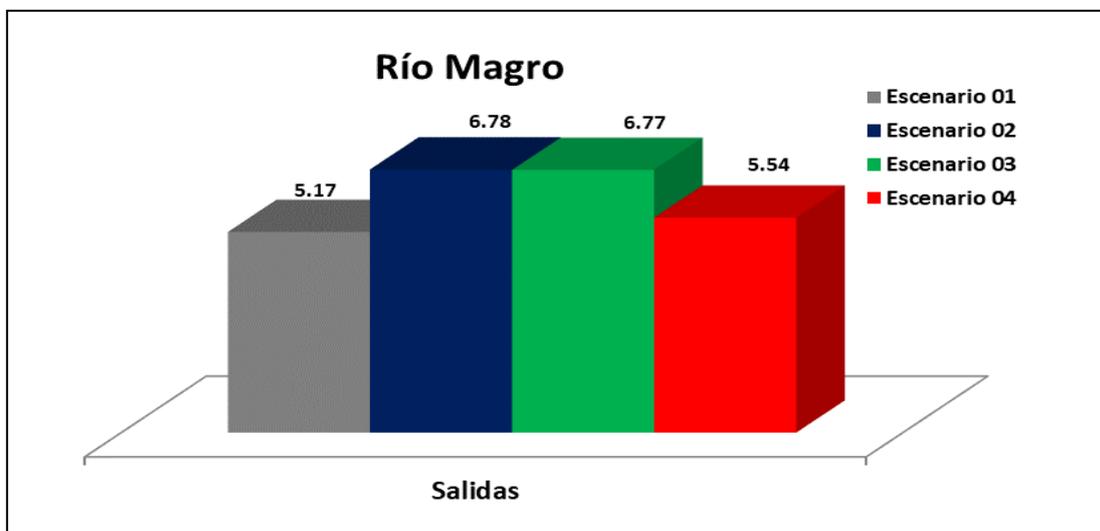
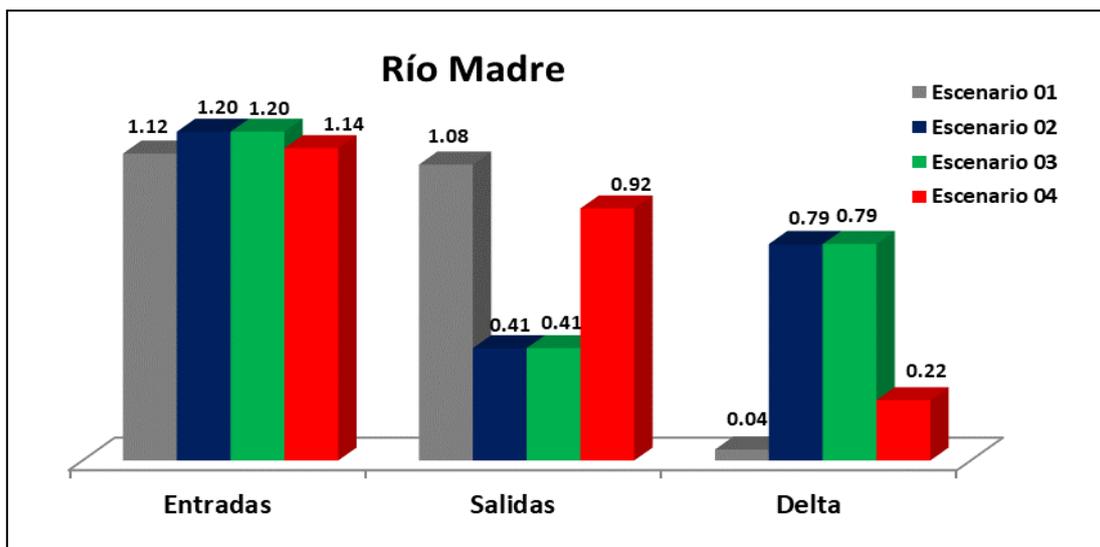


Figura 50: Balance medio por zonas para el periodo 2016/17-2026/27 en los diferentes escenarios

7.7. Evolución piezométrica en los diferentes escenarios simulados:

La diferencia de los niveles piezométricos simulados en septiembre 2016 y los niveles simulados en los distintos escenarios a septiembre 2027 se muestran en la figura 51.

Los piezómetros 08.18.003, 08.18.005, 08.24.005, 08.24.008 y 08.24.032 muestran un incremento en sus niveles piezométricos, siendo los más significativos los piezómetros 08.18.003 y 08.24.032 con valores promedio de 0.9 y 1.9 m respectivamente.

Asimismo, los piezómetros 08.18.086, 08.24.007, 08.24.010, 08.24.031, 08.24.033 muestran una disminución en sus niveles piezométricos, siendo lo más significativos los piezómetros 08.18.086 y 08.24.031, ambos con valores promedio de 1.3 metros. Y se sitúan en la masa de agua subterránea de Requena-Utiel y en ella se ubican la gran mayoría de pozos de bombeo destinadas al abastecimiento urbano y a usos agrícolas.

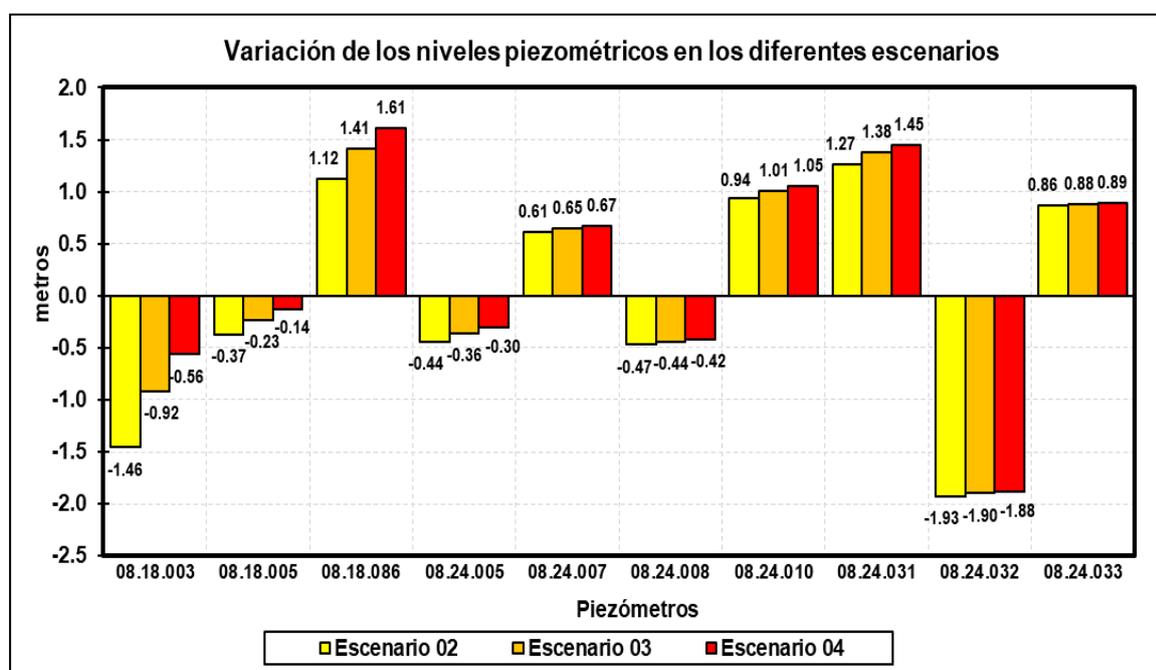
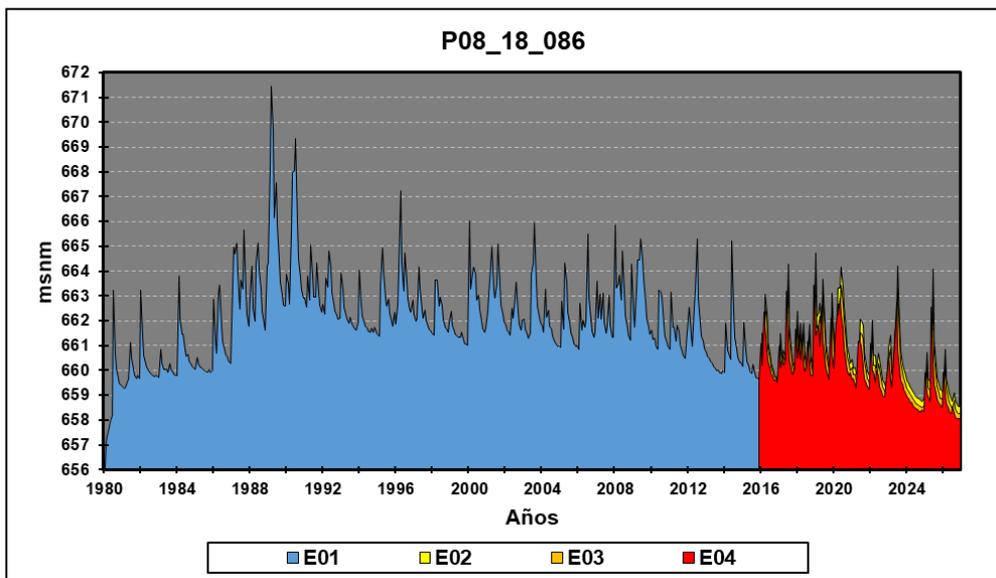
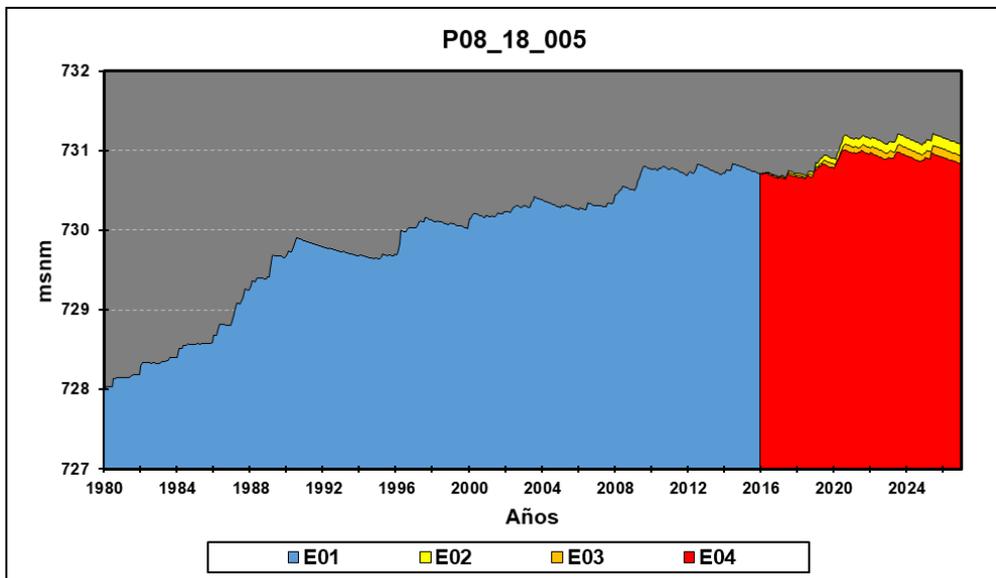
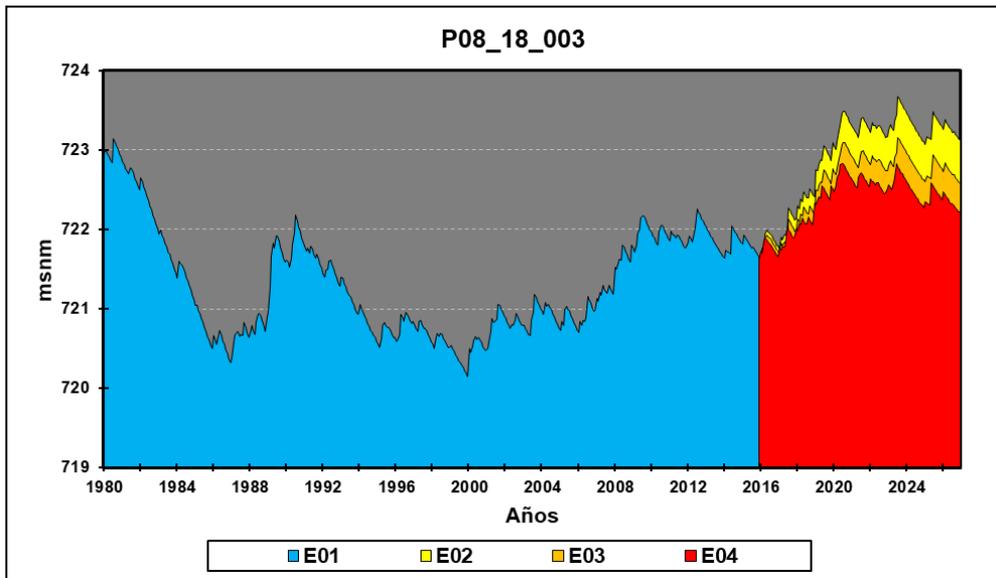
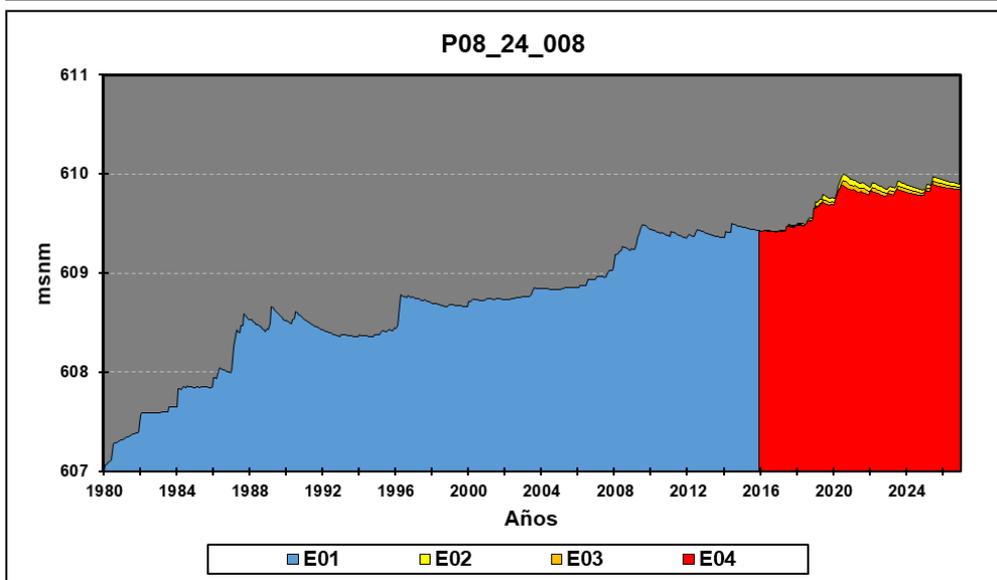
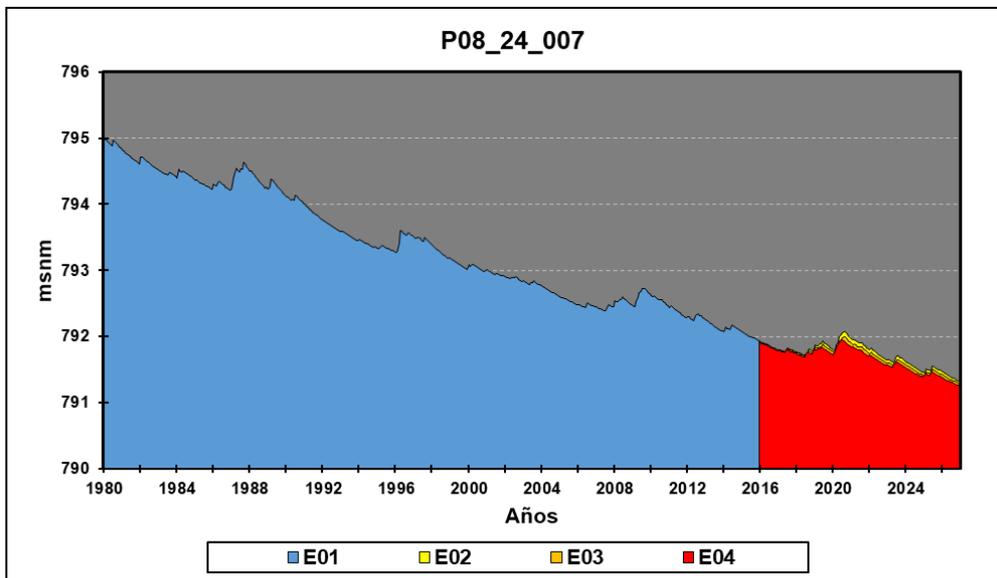
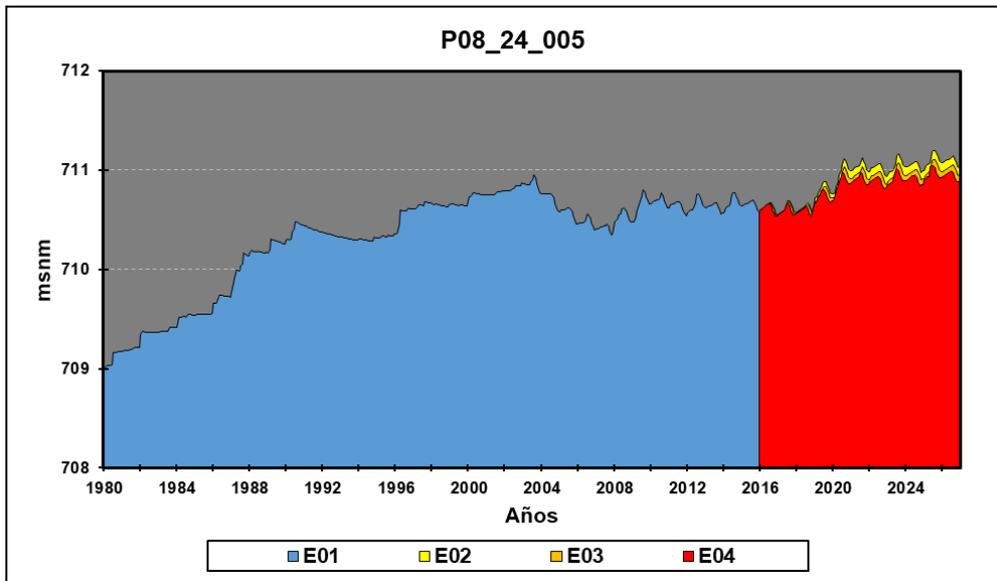
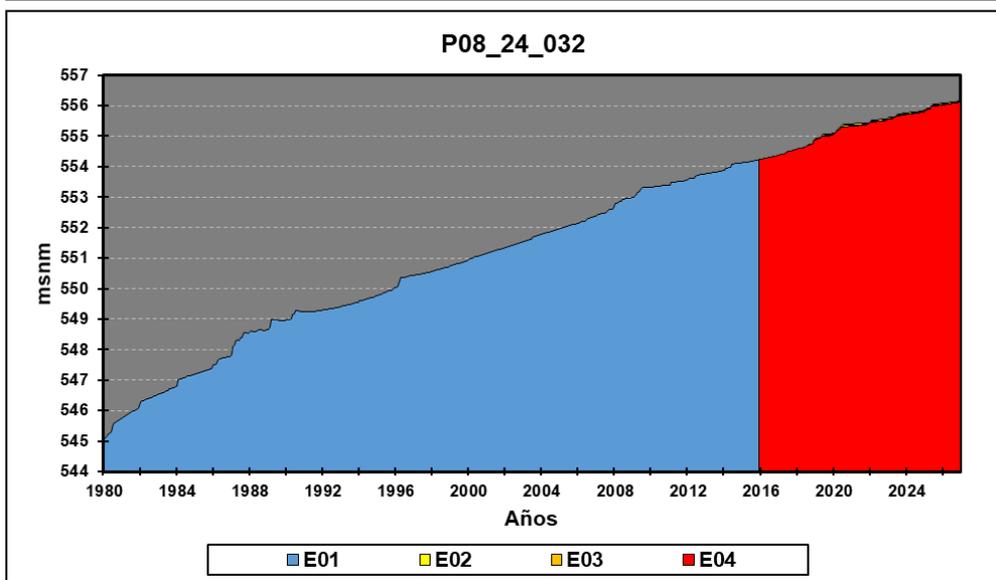
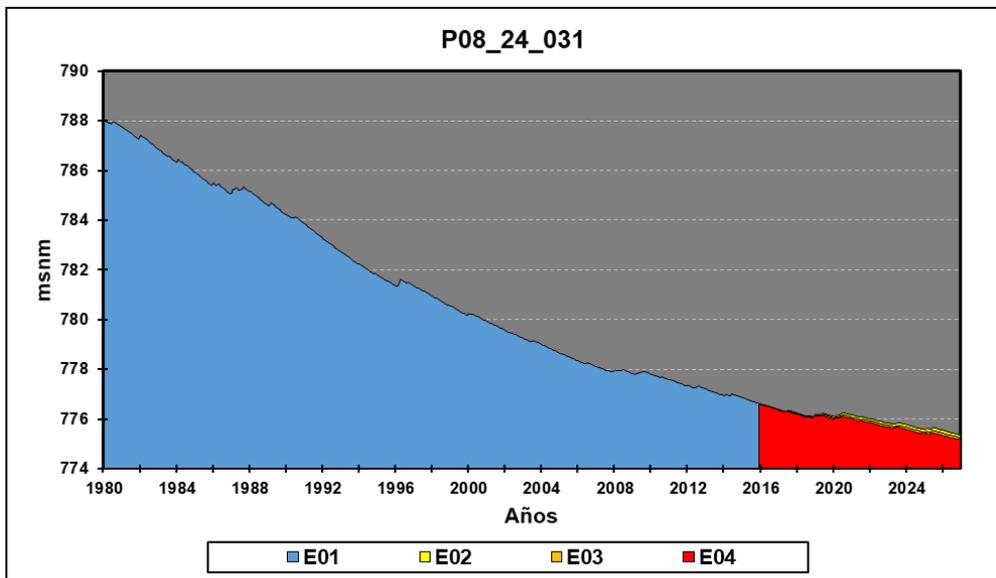
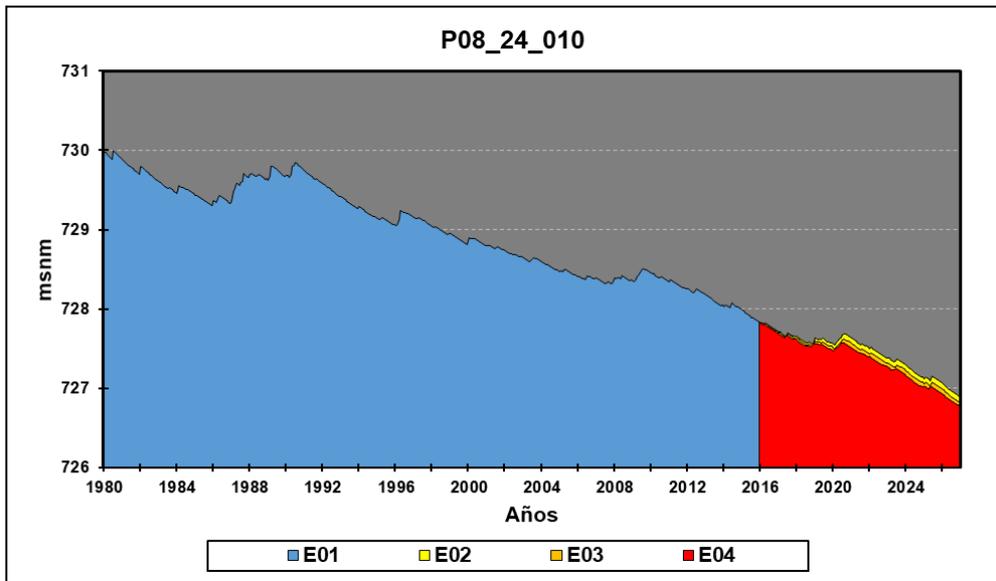


Figura 51: Variación de los niveles piezométricos en los diferentes escenarios

En la Figura 52 se muestra la evolución del nivel piezométrico en los diferentes escenarios anteriormente detallados.







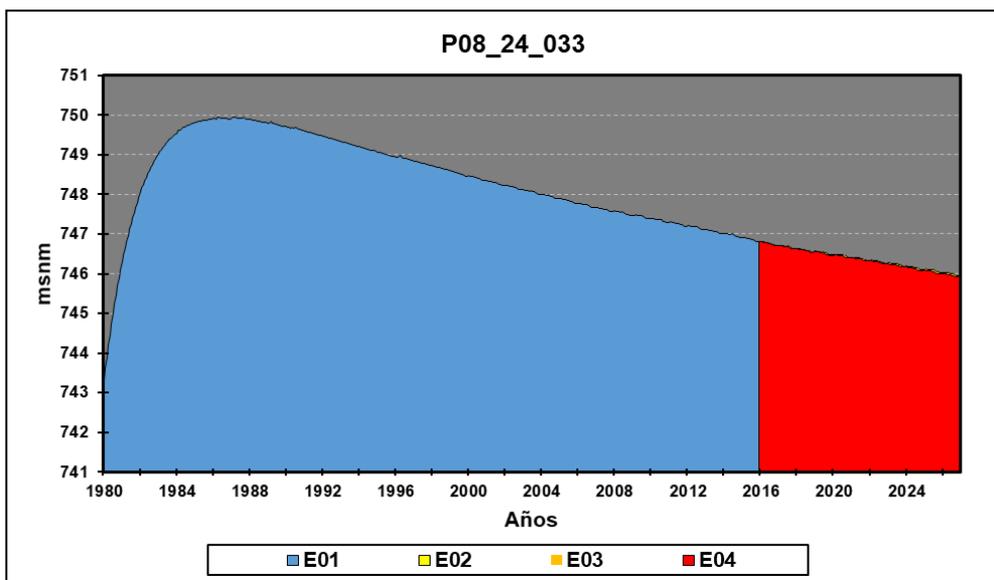


Figura 52: Evolución de los niveles piezométricos en los diferentes escenarios

8. Recomendaciones y prospectiva

Este modelo fue construido utilizando los últimos datos disponibles. Sin embargo, están desactualizados y pueden afectar la creación del modelo conceptual y matemático, se mencionan algunos puntos que pueden abordarse en los futuros modelos para aumentar la precisión.

La discretización vertical del modelo se realizó a partir de datos del modelo del año 2001. Desde entonces se viene profundizando y mejorando el modelo para un mejor análisis de la delimitación de la masa de Requena-Utiel. Por lo tanto, para mejorar el modelo, es necesario actualizar la litología del lugar de estudio, generando nuevas zonificaciones del sistema.

Solo se tiene información de la estación de aforo cercano al río Magro en Requena. En toda la zona se requiere de más información de los aportes de cauces superficiales para conocer la interacción entre el río y acuífero de todo el sistema exhaustivamente.

En áreas problemáticas como Requena-Utiel, es necesario aumentar el número de pozos de observación para controlar mejor el nivel piezométrico.

Por último, para ahorrar el uso del agua, es necesario fomentar buenas prácticas en el uso de este recurso tan vital para el crecimiento socioeconómico, a través de programas gubernamentales y difusión a los regantes y población en general.

9. Conclusiones

La finalidad de este trabajo ha sido elaborar un modelo matemático de flujo de agua subterránea de las masas de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara que permita realizar balances de agua de forma rápida, obtener información de la interacción entre el río y los acuíferos, relación entre dominios, flujos entre unidades hidrogeológicas y otros. Además, el modelo es de utilidad para pronosticar el futuro, realizando simulaciones en diferentes escenarios con horizonte en el año 2026/27.

Este modelo numérico fue desarrollado con el código MODFLOW empleando Python como lenguaje de programación a través de la plataforma Jupyter Lab. Esta herramienta disponible de acceso libre ha permitido la creación del modelo de forma sencilla, reduciendo los tiempos de ejecución del software de 2 horas a 10 minutos, en comparación con la interfaz gráfica de usuario ModelMuse. Sin embargo, el verdadero desafío es controlar la fiabilidad y calidad de los datos abastecen al modelo.

A pesar de todas las investigaciones y análisis realizados hasta la fecha, todavía hay mucha incertidumbre y poco conocimiento sobre la realidad. Hoy por hoy, el criterio y la experiencia del modelador son cruciales para reducir las brechas y tener menor incertidumbre en la búsqueda de un modelo que pueda reproducir lo más cercano a la realidad.

Las conclusiones más relevantes de los resultados del modelo se citan a continuación:

- El modelo realizado en el periodo 1980/81-2015/16, experimenta un incremento en la explotación del agua subterránea que impacta en todo el sistema, causado por el aumento de áreas de producción agrícola. Esto afecta al sistema y reduce los niveles de flujo que el acuífero aporta hacia los canales superficiales de la zona. En segundo lugar, hay pequeños cambios climáticos a lo largo del tiempo que afectan de forma negativa al volumen almacenado en el acuífero, siendo el incremento de la temperatura y el descenso de las precipitaciones. Todo ello confirma el inadecuado estado cuantitativo de la masa de agua subterránea de Requena-Utiel, declarado en el plan hidrológico 2015-2021.
- El pozo de observación 08.24.010 presenta problemas de piezometría con una disminución de 35 m entre los años 1998 y 2016, debido a localizarse en los alrededores más poblados de los municipios de Requena y de Utiel. Por otro lado, en zonas donde no existe una gran acumulación de pozos de extracción no se observan disminuciones significativas en las alturas piezométricas.

- Las predicciones se realizaron para simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios de reducción de la recarga por infiltración y retornos de riego, con horizonte al año hidrológico 2026/27. Es fundamental mencionar que los escenarios son sencillos por asumirse reducciones porcentuales en la recarga y retorno para el periodo 2016/17-2026/27, tomando como referencia los últimos 11 años de la serie original (periodo 2005/06-2015/16). En todos los escenarios, el acuífero pierde agua almacenada con un máximo de 10,46 hm³/año y un mínimo de 0.74 hm³/año (tabla 8).

Se considera la condición inicial del modelo como un dato de entrada muy importante, por ser la condición inicial de los niveles piezométricos y debe estar fundamentado en la realidad del sistema en lo posible.

El código MODFLOW utilizando Python permite realizar simulaciones predictivas en tiempos de ejecución muy cortos y obtener los resúmenes de los resultados de forma rápida, debido a su sencillez y fácil interacción con los datos de ingreso del modelo, permite al usuario una gran flexibilidad al momento de manipular los códigos y scripts programados.

Los indicadores estadísticos para el análisis de bondad de ajuste del modelo miden la relación de los niveles piezométricos observados y simulados. Se han realizado diferentes índices para validar los resultados del modelo. En todos estos muestran un buen ajuste de bondad.

10. Bibliografía

- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, 54(5), 733–739. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>
- Bakker, Mark. (2014). Python Scripting: The Return to Programming. In *Groundwater* (Vol. 52, Issue 6, pp. 821–822). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gwat.12269>
- Bakker, Mark, & Kelson, V. A. (2009). Writing Analytic Element Programs in Python. *Ground Water*, 47(6), 828–834. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00583.x>
- Bassanezi, R. C., & Biembengut, M. S. (1997). Modelación matemática: Una antigua forma de investigación un nuevo metodo de enseñanza. *Revista de Didáctica de Las Matemáticas, Números(Nº 32)*, 13–25. <http://www.sinewton.org/numeros/numeros/32/Articulo02.pdf>
- CEPAL, C. E. para A. L. (1983). *Ordenamiento de recursos hídricos y modelos matemáticos en américa latina y el caribe*.
- CHJ, C. H. del J. (2001). *Redacción del Plan de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 08.24 Requena-Utiel*.
- CHJ, C. H. del J. (2016). *PLAN DE EXPLOTACIÓN DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA REQUENA-UTIEL*. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/PlanExplotacion/Documents/PlanExplotacion_RequenaUtiel_33_web.pdf
- Coperacion Española Conocimiento/Intercoonecta. (2021). *Modelación Matemática de Acuíferos*. <https://intercoonecta.aacid.es/programación-de-actividades/modelaci-n-matem-tica-de-acu-feros>
- DGIRH, D. G. I. del R. H. (2018). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*. http://www.andi.com.co/Uploads/Guía_modelación_Final_aguasuperficialcontinental.pdf
- Döll, P., & Fiedler, K. (2008). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 863–885. <https://doi.org/10.5194/HESS-12-863-2008>
- Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G., & Scanlon, B. R. (2012). Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 59–60, 143–156. <https://doi.org/10.1016/J.JOG.2011.05.001>
- Fernández Torroba, M. A. (2004). *Estudio y modelización de la contaminación del acuífero*

del río Najerilla: aplicación de la microextracción en fase sólida para la determinación de los contaminantes - Dialnet [Universidad de la rioja].

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=105>

Fernández Urizar, I. (2017). *Modelación Matemática Del Flujo De Agua Subterránea Del Acuífero De Requena-Utiel. Estudio Del Plan De Explotación De La Masa De Agua*.
http://oa.upm.es/9319/2/TESIS_MASTER_MARGARITA_LOZANO_R.pdf

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (Cathy Brenn/Kim McNeily (ed.)).
<http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/textbook-project/>

Güntner, A., Stuck, J., Werth, S., Döll, P., Verzano, K., & Merz, B. (2007). A global analysis of temporal and spatial variations in continental water storage. *Water Resources Research*, 43(5), 5416. <https://doi.org/10.1029/2006WR005247>

Hughes, A., Mansour, M., Ward, R., Kieboom, N., Allen, S., Seccombe, D., Charlton, M., & Prudhomme, C. (2021). The impact of climate change on groundwater recharge: National-scale assessment for the British mainland. *Journal of Hydrology*, 598, 126336. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126336>

IGME-DGA. (2009). *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*.
<https://www.acuadema.com/wp-content/uploads/2016/09/PHT-1B-Memoria-DocAux02.pdf>

IGME. (2011). *INFORME SOBRE LA CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN*. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/Documentos-iniciales/Referencia_bibliografica/IGME-DGA,2011_MEMORIA_y_FICHAS_car_basica_jucar.pdf

IHOBE, S. A. (2006). *Guía técnica para la aplicación de modelos informáticos para el transporte y el flujo de contaminantes en el agua subterránea*.
https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/contaminantes_aguasubterránea/es_doc/adjuntos/contaminantes_agua_subterránea.pdf

Konikow, L. F. (2003). Uso de Modelos Numéricos para Simular el Flujo y el Transporte Subterráneo. In Instituto Geológico y Minero de España (Ed.), *Isotópos Ambientales en el Ciclo Hidrológico : Principios Y Aplicaciones* (p. 596). http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_publication_hydroCycle_es.html

Lucía Brito-Vallina, M., Alemán-Romero, I., Fraga-Guerra, E., Luís Para-García, J., & Arias-De Tapia, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los

- ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129–139.
- Mcdonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model United*.
- Mercé Gallo, A. (2015). *Estudio de alternativas de gestión de agua subterránea en la cuenca del río Magro* [Universitat Politècnica de València].
<https://riunet.upv.es/handle/10251/54940>
- Pérez, F., Granger, B. E., & Hunter, J. D. (2011). Python: An ecosystem for scientific computing. *Computing in Science and Engineering*, 13(2), 13–21.
<https://doi.org/10.1109/MCSE.2010.119>
- Pérez Martín, M. Á. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad de agua, integrado en sistema de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la directiva marco del agua*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=240367&info=resumen&idioma=SPA>
- Pérez Membrives, M. Á. (2019). *Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)* [Univertitat Politecnica de Valencia].
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/128980/01_Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sahuquillo, A., Custodio, E., & Ramón Llamas, M. (2008). *La gestión de las aguas subterráneas*.
- Silva Hidalgo, Hu., Alarcón Herrera, M. T., & Matín-Dominguez, I. R. (2006). (PDF) Modelacion matematica para el manejo integrado de los recursos hidricos en cuencas hidrologicas. Estado actual y tendencias. *3er Congreso CIMAV*, 4.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4417.1767>