



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Flujo de agua subterránea en la masa de Jumilla-Yecla-Castellar (Alicante-Murcia, España). Revisión y propuesta de un nuevo modelo matemático.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Salazar Pretell, Fiorela Solange

Tutor/a: Cassiraga, Eduardo Fabián

Cotutor/a externo: TANCO BALLESTEROS, LAURA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

Flujo de agua subterránea en la masa de Jumilla-Yecla-Castellar (Alicante-Murcia, España). Revisión y propuesta de un nuevo modelo matemático.

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

IORELA SOLANGE SALAZAR PRETELL

Tutor:

EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es:

LAURA TANGO BALLESTEROS

JUNIO, 2023



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: Flujo de agua subterránea en la masa de Jumilla-Yecla-Castellar (Alicante-Murcia, España). Revisión y propuesta de un nuevo modelo matemático.

Título del TFM en inglés: Groundwater Flow In The Jumilla-Yecla-Castellar Mass (Alicante-Murcia, Spain). Review And Proposal Of A New Mathematical Model.

Título del TFM en Valenciano: Flux D'aigua Subterrània En La Massa De Jumella-Iecla-Castellar (Alacant-Múrcia, Espanya). Revisió I Proposta D'un Nou Model Matemàtic.

Alumno: FIORELA SOLANGE SALAZAR PRETELL.

Tutor: EDUARDO CASSIRAGA

Cotutor/es: LAURA TANCO BALLESTERO

Fecha de Lectura: JUNIO, 2023

Resumen

En español

Los planes hidrológicos actualmente vigentes, delimitan sus masas de agua subterránea dentro de su propia demarcación, y por tanto no puede hablarse de que existan masas de agua subterránea compartidas. Sin embargo, la realidad física de los acuíferos demuestra que existen masas en demarcaciones contiguas con acuíferos que están conectados entre sí. La coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca exige la determinación de los límites de estos acuíferos compartidos entre ámbitos territoriales de dos o más planes, y la asignación de los recursos hídricos de cada uno de los acuíferos compartidos entre demarcaciones afectadas.

El objetivo de este trabajo de fin de máster, es la definición, caracterización y asignación de los recursos hídricos de la masa de agua subterránea denominada Jumilla-Yecla-Castellar (integrada por las masas de agua subterránea 070.023 Jumilla-Yecla de la DHS y 080.173 Sierra de Catellar de la DHJ) que se encuentran conectadas hidrogeológicamente entre los ámbitos de planificación contiguos del Segura y Júcar, respectivamente. Los resultados que se obtengan se podrían incluir en los diferentes planes hidrológicos afectados de forma coherente y justificada.

Para ello se propone estudiar las dos masas afectadas y establecer la demarcación de la masa conjunta. Se utilizará como fuente de información los planes hidrológicos de ambas demarcaciones, los informes disponibles en el IGME en relación a esta zona y todo lo que se pueda obtener de las Oficinas de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Júcar y del Segura. Dado que existen 2 modelos anteriores (IGME-DPA, 2009 e IGME, 2021) se realizará una revisión de los mismos y se buscarán mejoras a incluir en el nuevo modelo.

Se recopilará toda la información geológica e hidrológica relevante de la zona con el fin de diseñar un modelo de flujo de agua subterránea de la zona. El modelo se construirá utilizando la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984). La zona de estudio es geológicamente compleja y por ello se prestará especial atención a la caracterización de las unidades hidrogeológicas de la misma.

No se ha identificado ningún tramo de río relacionado hidráulicamente con las formaciones acuíferas con las que pueda existir transferencia de recursos. La alimentación de la masa procede exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia caída sobre sus afloramientos permeables. Dicha recarga será estimada con el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005 y Pérez-Martín et al., 2014). La única salida natural de la masa son una serie de manantiales en los extremos NE y SO de la masa, los cuales se secan en régimen alterado. Dicha surgencia será considerada en el modelo como un dren. En régimen alterado, las salidas la constituyen los bombeos. Se prestará una atención especial a la caracterización de las extracciones en una y otra demarcación. Para la calibración del modelo se dispone de 8 piezómetros más o menos distribuidos en la masa. No existen medidas de caudal de los manantiales.

Con el modelo calibrado se procederá a evaluar el reparto de recursos según demarcación. Esto supone realizar un balance hídrico tanto en régimen estacionario como en régimen de explotación del sistema.

Palabras clave: Recursos hídricos, Hidrogeología, modelación matemática de acuíferos, MODFLOW, ModelMuse

En valenciano

Els plans hidrològics actualment vigents, delimiten les seues masses d'aigua subterrània dins de la seua pròpia demarcació, i per tant no pot parlar-se que existisquen masses d'aigua subterrània compartides. No obstant això, la realitat física dels aqüífers demostra que existeixen masses en demarcacions contigües amb aqüífers que estan connectats entre si. La coordinació dels Plans Hidrològics de conca exigeix la determinació dels límits d'aquests aqüífers compartits

entre àmbits territorials de dos o més plans, i l'assignació dels recursos hídrics de cadascun dels aquífers compartits entre demarcacions afectades.

L'objectiu d'aquest treball de fi de màster, és la definició, caracterització i assignació dels recursos hídrics de la massa d'aigua subterrània denominada Jumella-lecla-Castellar (integrada per les masses d'aigua subterrània 070.023 Jumella-lecla de la *DHS i 080.173 Sierra de *Catellar de la *DHJ) que es troben connectades *hidrogeològicament entre els àmbits de planificació contigus del Segura i Xúquer, respectivament. Els resultats que s'obtinguen es podrien incloure en els diferents plans hidrològics afectats de manera coherent i justificada.

Per a això es proposa estudiar les dues masses afectades i establir la demarcació de la massa conjunta. S'utilitzarà com a font d'informació els plans hidrològics de totes dues demarcacions, els informes disponibles en el *IGME en relació a aquesta zona i tot el que es puga obtindre de les Oficines de Planificació Hidrològica de la Confederació Hidrogràfica del Xúquer i del Segura. Atés que existeixen 2 models anteriors (*IGME-*DPA, 2009 i *IGME, 2021) es realitzarà una revisió dels mateixos i es buscaran millores a incloure en el nou model.

Es recopilarà tota la informació geològica i hidrològica rellevant de la zona amb la finalitat de dissenyar un model de flux d'aigua subterrània de la zona. El model es construirà utilitzant la interfície gràfica d'usuari *ModelMuse (Winston, 2009) i el codi *MODFLOW (McDonald i *Harbaugh, 1984). La zona d'estudi és geològicament complexa i per això es prestarà especial atenció a la caracterització de les unitats hidrogeològiques d'aquesta.

No s'ha identificat cap tram de riu relacionat hidràulicament amb les formacions aquíferes amb les quals puga existir transferència de recursos. L'alimentació de la massa procedeix exclusivament de la infiltració de l'aigua de pluja caiguda sobre els seus afloraments permeables. Aquesta recàrrega serà estimada amb el model *PATRICAL (Pérez-Martín, 2005 i Pérez-Martín et al., 2014). L'única eixida natural de la massa són una sèrie de brolladors en els extrems *NE i SOTA de la massa, els quals s'assequen en règim alterat. Aquesta *surgència serà considerada en el model com un *dren. En règim alterat, les eixides la constitueixen els bombaments. Es prestarà una atenció especial a la caracterització de les extraccions en una i una altra demarcació. Per al calibratge del model es disposa de 8 piezòmetres més o menys distribuïts en la massa. No existeixen mesures de cabal dels brolladors.

Amb el model calibrat es procedirà a avaluar el repartiment de recursos segons demarcació. Això suposa realitzar un balanç hídric tant en règim estacionari com en règim d'explotació del sistema.

En inglés

The hydrological plans currently in force delimit their groundwater masses within their own demarcation, and therefore it cannot be said that there are shared groundwater masses. However, the physical reality of the aquifers shows that there are masses in contiguous demarcations with aquifers that are connected to each other. The coordination of the Basin Management Plans requires the determination of the limits of these shared aquifers between territorial areas of two or more plans, and the allocation of water resources for each of the shared aquifers between affected demarcations.

The objective of this master's thesis is the definition, characterization and allocation of the water resources of the groundwater mass called Jumilla-Yecla-Castellar (integrated by the groundwater masses 070.023 Jumilla-Yecla of the DHS and 080.173 Sierra de Catellar of the DHJ) that are hydrogeologically connected between the contiguous planning areas of Segura and Júcar, respectively. The results obtained could be included in the different river basin management plans affected in a coherent and justified manner.

For this, it is proposed to study the two affected masses and establish the demarcation of the joint mass. The hydrological plans of both demarcations, the reports available in the IGME in relation to this area and everything that can be obtained from the Hydrological Planning Offices of the Júcar and Segura Hydrographic Confederation will be used as a source of information. Since there are 2 previous models (IGME-DPA, 2009 and IGME, 2021), a review of them will be carried out and improvements to be included in the new model will be sought.

All the relevant geological and hydrological information of the area will be collected in order to design a groundwater flow model of the area. The model will be built using the ModelMuse graphical user interface (Winston, 2009) and the MODFLOW code (McDonald and Harbaugh, 1984). The study area is geologically complex and therefore special attention will be paid to the characterization of its hydrogeological units.

No section of the river hydraulically related to the aquifer formations with which there may be a transfer of resources has been identified. The feeding of the mass comes exclusively from the infiltration of the rainwater fallen on its permeable outcrops. Said recharge will be estimated with

the PATRICAL model (Pérez-Martín, 2005 and Pérez-Martín et al., 2014). The only natural outlet for the mass is a series of springs at the NE and SW ends of the mass, which dry up under altered regimes. Said upwelling will be considered in the model as a drain. In altered regime, the outputs are the pumping. Special attention will be paid to the characterization of the extractions in both demarcations. For the calibration of the model there are 8 piezometers more or less distributed in the mass. There are no flow measurements of the springs.

With the calibrated model, the distribution of resources according to demarcation will be evaluated. This means carrying out a water balance both in the stationary regime and in the exploitation regime of the system.

Palabras clave español: Recursos hídricos, Hidrogeología, modelación matemática de acuíferos, MODFLOW, ModelMuse.

Palabras clave valenciano: Recursos hídrics, Hidrogeologia, modelatge matemàtic d'aqüífers, MODFLOW, ModelMuse.

Palabras clave ingles: Water resources, Hydrogeology, mathematical modeling of aquifers, MODFLOW, ModelMuse.

AGRADECIMIENTOS

"Con cariño y gratitud, quiero agradecer a mis amados padres, German y Gladys, por impulsar mi formación académica, moral y motivarme siempre a superarme. Asimismo, agradezco a mi tutor, Eduardo Cassiraga, por su tiempo, guía y dedicación en la elaboración de este trabajo. También valoro los triunfos y los momentos difíciles que he enfrentado, ya que me han enseñado a apreciar cada día lo que tengo."

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Antecedentes	2
2. Modelo conceptual	4
2.1 Localización del área de estudio	4
2.2 El contexto hidrológico	5
2.3 El contexto hidrogeológico	5
2.3.1 Límites del sistema	5
2.3.2 Unidades hidrogeológicas	7
2.3.3 Contexto geológico	12
2.4 Recarga	18
2.5.1. Recarga por precipitación	18
2.5.2. Recarga por retornos de riego	20
2.5 Extracciones de agua subterránea	23
2.6 Manantiales	25
2.7 Modelo hidrogeológico conceptual	26
3. Construcción del modelo - Código utilizado	27
4. Implementación del modelo	28
4.1 Discretización horizontal	28
4.2 Discretización vertical	29
4.3 Discretización temporal	30
4.4 Condición inicial	31
4.5 Asignación preliminar de parámetros hidráulicos	32
4.6 Condiciones de contorno	33
4.6.1 Paquete de Barrera	34
4.6.2 Paquete de recarga	34
4.6.3 Paquete de pozos	35
4.6.4 Paquete de drenes	35
4.6.5 Paquete de observación de alturas piezométricas	35
4.7 Método de Solución	36
5. Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo	36
5.1 La calibración en régimen no influenciado	37
5.2 La calibración en régimen influenciado	37

5.2.1	Análisis piezométrico	38
5.2.2	Análisis de la bondad de ajuste del modelo	45
5.2.3	Balances de masa del sistema.....	47
6.	Conclusiones	53
7.	Líneas futuras	54
8.	Referencias Bibliográficas.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla-Castellar (IGME, 2021)....	4
Figura 2. Topografía y límites de la masa de agua subterránea de Jumilla-Yecla-Castellar-Fuente: elaboración propia.	5
Figura 3: Mapa de unidades hidrogeológicas cercanas a la zona modelada (07.05)- Fuente: CHS, 1998.....	6
Figura 4: mapa de masa de agua subterránea cercanas a la zona modelada (070.023)-Fuente: DHS,1998	6
Figura 5: Ubicación de los cortes transversales en el acuífero -Fuente: elaboración propia con datos de IGME-2006.....	9
Figura 6: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Castellar -Fuente: IGME-2006.....	9
Figura 7: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Yecla -Fuente: IGME-2006	10
Figura 8: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Jumilla -Fuente: IGME-2006	10
Figura 9: Dominio y malla 3D implementada en VMODFLOW. Fuente: IGME-2009	12
Figura 10:MACH de Jumilla-Yecla-Castellar en el Marco de las Cordilleras Béticas-Fuente:Mod. Fernandez y Gil, 1989.....	13
Figura 11:Columna litoestratigráfica de la masa de agua subterránea de Jumilla-Yecla-Castellar, Fuente: DHS,2021.	14
Figura 12: Dominios hidrogeológicos – capa 1; Fuente: elaboración propia.....	16
Figura 13: Corte hidrogeológico esquemático ilustrando cómo la zona del entorno de Yecla (en círculo rojo discontinuo), puede quedar aislada debido a movimientos estructurales. De la misma manera, la zona de la Olla del Moñigal presenta una situación similar (extraído de IGME-DPA 2006).....	16
Figura 14: Contexto geotectónico del área del entorno del acuífero Jumilla-Villena. En rojo, localización de fallas direccionales que permitirían aislar hidráulicamente zonas del acuífero; Fuente Doblas et al.1991).....	17
Figura 15:Ubicación de la falla en el acuífero en la zona de Yecla -Fuente: elaboración propia .	17
Figura 16. Evolucion anual de la recarga total en el modelo Fuente: elaboración propia	18
Figura 17: Sectores de recarga por infiltración de precipitación según las zonas utilizadas en PATRICAL. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 18: Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia según modelo PATRICAL. Fuente: elaboración propia	19
Figura 19: Comparación de la recarga de precipitación propuesta con modelos previos del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia.....	20
Figura 20: Sectores de recarga por retornos de riego de las unidades de demanda agrícola. Fuente: elaboración propia	21
Figura 21: Evolución anual de la recarga anual por retornos de riego. Fuente: elaboración propia	22
Figura 22: Comparación de la Recarga de Retornos de Riego propuesta con modelos previos del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia	22
Figura 23: Ubicación de los pozos de bombeo Fuente: elaboración propia.....	23
Figura 24: Comparación de los bombeos en los modelos IGME-DPA (2009) e IGME (2021). Fuente: elaboración propia.	24

Figura 25: Comparación de los bombes en la zona de la DHJ de los modelos IGME-DPA (2009) e IGME (2021) con los datos proporcionados por la DHJ. Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 26: Evolución anual de las extracciones de agua subterránea en el nuevo modelo. Fuente: elaboración propia.	25
Figura 27: Localización de los manantiales documentados en la zona modelada. Fuente: elaboración propia.	26
Figura 28: Dominio y vista en planta de la malla generada. Fuente: elaboración propia.	29
Figura 29: Discretización vertical del modelo de Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia.....	30
Figura 30: Alturas piezométricas iniciales. Fuente: elaboración propia a partir de IGME (2009). 31	
Figura 31: Localización de los piezómetros de control. Fuente: elaboración propia.	38
Figura 32: Calibración del piezómetro PA12252. Fuente: elaboración propia.	39
Figura 33: Calibración del piezómetro PAI2T0004. Fuente: elaboración propia.	40
Figura 34: Calibración del piezómetro PA7576. Fuente: elaboración propia.	40
Figura 35: Calibración del piezómetro PA12246. Fuente: elaboración propia.	41
Figura 36: Calibración del piezómetro PA7576. Fuente: elaboración propia.	41
Figura 37: Calibración del piezómetro 08.035. 003.. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 38: Calibración del piezómetro 08.035. 006. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 39: Calibración del piezómetro 08.035.054. Fuente: elaboración propia.	43
Figura 40: Mapa de isopiezas para la capa 1 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 41: Mapa de isopiezas para la capa 2 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 42: Mapa de isopiezas para la capa 3 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.	45
Figura 43: Mapa con la localización de los piezómetros de control y con los residuos. Fuente: elaboración propia.	45
Figura 44: Alturas piezométricas observadas versus las simuladas en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	46
Figura 45: Histograma de residuos para todas las observaciones. Fuente: elaboración propia. . 46	
Figura 46: Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	49
Figura 47: Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	49
Figura 48: Evolución temporal de las entradas y salidas totales el acuífero en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 49: Áreas correspondientes a cada demarcación en el modelo global. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 50: Evolución de las transferencias de flujo entre DHJ y DHS. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	51
Figura 51: Evolución temporal de las entradas y salidas totales al acuífero en la Demarcación hidrográfica del Segura. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	52
Figura 52: Evolución temporal de las entradas y salidas totales al acuífero en la Demarcación hidrográfica del Júcar Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Limite Hidrogeológicos de la masa-Fuente: elaboración propia.....	7
Tabla 2: Columna litológica tipo; Fuente: Caracterización de masas de agua subterránea DHS-2015.....	15
Tabla 3: Características de la superficies de riego ubicadas en la masa de Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia	21
Tabla 4: Datos en relación con la discretización horizontal del modelo de la masa Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia.	28
Tabla 5 : Parámetros hidráulicos calibrados en el modelo IGME (2009). Fuente: extraído de IGME (2009).	32
Tabla 6 : Parámetros hidráulicos calibrados en el modelo IGME (2021). Fuente: extraído de IGME (2021).	32
<i>Tabla 7 : Rango de parámetros hidráulicos. Fuente: elaboración propia con datos de Custodio, E. et al. (1983), Freeze, R.A., et al. (1979).....</i>	<i>33</i>
Tabla 8: Parámetros de configuración de los manantiales. Fuente: elaboración propia.	35
<i>Tabla 9 : Resultados de la calibración: Dominios hidrogeológicas. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10 : Resultados de la calibración: Falla hidrológica. Fuente: elaboración propia</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 11 : Indicadores del análisis de la bondad de la calibración del modelo en régimen influenciado. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 12 : Indicadores estadístico RMSE por zonas. Fuente: elaboración propia</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 13 : Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 14 : Resumen del balance de masa parcial por demarcaciones en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>51</i>

1. Introducción

El agua en los acuíferos es un recurso vital en todo el mundo, por ello uno de los objetivos de desarrollo sostenible que buscamos conseguir es asegurar la disponibilidad y gestión del agua para todas las personas.

Una de las herramientas habituales para gestionar el agua subterránea son los modelos matemáticos. Estos modelos nos ayudan a predecir cómo se comportará el acuífero en diferentes situaciones y a tomar decisiones informadas.

El acuífero Jumilla-Yecla-Castellar, ubicado en el sureste de España, es una fuente importante de agua subterránea en la región. Ha sido explotado durante muchos años para abastecer las necesidades de agua de la población y los sistemas agrícolas. Sin embargo, debido al aumento de la demanda, el acuífero ha sido explotado intensamente desde la primera mitad del siglo XX. Como resultado, los niveles de agua subterránea han disminuido significativamente y también su capacidad de recarga natural.

Para lograr una gestión sostenible y eficiente del acuífero, es importante que las demarcaciones hidrográficas del Júcar y Segura trabajen juntas para alcanzar un buen estado cuantitativo del acuífero. Esto implica discutir estrategias para reducir la extracción de agua y aumentar la recarga natural del acuífero. También es importante considerar las posibles interacciones entre los flujo de agua subterránea de las demarcaciones hidrográficas del Júcar y del Segura.

Para ayudar en la gestión sostenible del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar, se utilizará un modelo matemático de flujo. Este modelo será desarrollado utilizando la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, 2009) y el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984). El modelo permitirá una mejor comprensión del funcionamiento hidrogeológico del acuífero y proporcionará información útil para tomar decisiones sobre la gestión del agua en la región.

1.1. Objetivos

El propósito de este trabajo de fin de máster es realizar un análisis detallado de los recursos hídricos presentes en la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla-Castellar (integrada por las masas de agua subterránea 070.023 Jumilla-Yecla de la DHS y 080.173 Sierra de Castellar de la DHJ), la cual se encuentra conectada hidrogeológicamente entre los ámbitos de planificación contiguos del Segura y Júcar.

Para ello, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- ✓ Elaborar un modelo conceptual para definir y caracterizar el funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta la información disponible y los modelos previos existentes, como los realizados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación de Alicante en 2009 y 2021 (IGME-DPA, 2009 e IGME, 2021).
- ✓ En base al modelo conceptual establecido, implementar un modelo numérico de flujo con el código MODFLOW y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse, que permita reproducir el comportamiento del sistema hidrogeológico. Este modelo se utilizará para entender cómo se mueve y se distribuye el agua en la masa subterránea, lo que permitirá realizar una asignación más precisa de los recursos hídricos disponibles en ambas demarcaciones hidrográficas.
- ✓ Calibrar el modelo numérico para obtener una reproducción precisa de las variables de estado del sistema (alturas piezométricas y flujos), y analizar cómo responde el sistema a las acciones exteriores correspondientes. La calibración permitirá ajustar el modelo para que se asemeje lo más posible a la realidad.

Con estos objetivos se espera obtener una mejor comprensión de la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla-Castellar, lo que será de gran utilidad para tomar decisiones y planificar su gestión adecuadamente.

1.2. Antecedentes

A continuación, se citan las principales investigaciones realizadas en la zona que han servido de base para este trabajo fin de máster.

En 1982, el estudio de Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante, realizado por la Diputación Provincial de Alicante (DPA) y el Instituto Geológico de España (IGME) define el sistema acuífero Jumilla-Villena con sus límites (DPA-IGME, 1982).

En el año 1989 la Confederación Hidrográfica del Júcar (DHJ) elaboró el trabajo denominado “Estudio de actualización de la explotación, inventario de puntos de agua y propuesta de ordenación de las extracciones del acuífero Jumilla–Villena”, en el que se actualizan los límites del acuífero y sus características hidrogeológicas (DHJ, 1989).

En 2006, aparece el trabajo “Estudio del funcionamiento hidrogeológico y simulación numérica del flujo subterráneo en los acuíferos carbonatados de Solana y Jumilla-Villena (Alicante y Murcia)”, realizado por el IGME-DPA en el que el borde meridional de la masa es prolongado algo más al sur respecto al considerado en trabajos anteriores, y, también, mediante el software VISUAL BALAN (Samper y García Vera, 1992) se estima la recarga del acuífero y los descensos de los niveles piezométricos a través del tiempo (IGME-DPA, 2006).

Más recientemente, en los planes hidrológicos de las respectivas demarcaciones se recogen las principales características de las masas de agua subterránea delimitadas en cada demarcación: 080.173 Sierra del Castellar (DHJ) (DHJ,2013) y 070.023 Jumilla-Yecla (DHS) (DHJ; 2009, 2015 y 2021).

En el 2009, el proyecto “Determinación de las reservas útiles de embalses subterráneos en el acuífero jumilla-Villena (Alicante y Murcia)” realizado bajo convenio entre el IGME y la DPA, se tratan de estimar las reservas totales y útiles en el acuífero actualizando datos hasta el 2007. Se emplearon técnicas de modelización numérica con el código MODFLOW (Harbaugh, 2000) para permitir una mejor predicción (IGME-DPA, 2009).

En el 2011 se publica el trabajo “Adaptación del modelo numérico de simulación del flujo en los embalses subterráneos de Jumilla-Villena y Vega Baja al sistema de información hidrológica. Determinación de las reservas útiles dinámicas y garantías de suministro. Acuífero de Jumilla-Villena” realizado por la DPA, en el cual se realiza una actualización de las series de recarga, la recalibración del modelo y su inclusión en el sistema de información hidrológica provincial con el objetivo de facilitar su gestión y, consecuentemente, regular las demandas de los usuarios del acuífero (DPA, 2011).

En el 2015, aparece un estudio de la explotación de aguas subterráneas en dos masas de agua de la demarcación del Segura, realizado por Alberto Gil Tomás. En su trabajo final de grado da a conocer el estado cuantitativo de las masas de agua y su régimen de explotación realizando un análisis con un modelo de simulación que proporciona una representación gráfica de la evolución de los niveles piezométricos de la masa de agua subterránea a lo largo del tiempo (Gil Tomás, 2015).

En el 2021, se lleva a cabo el estudio “Encomienda de gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el inventario de recursos hídricos subterráneos y con la caracterización de acuíferos con continuidad hidrogeológica entre demarcaciones hidrográficas. Jumilla-Yecla-

Castellar” elaborado por el IGME con la colaboración de la empresa Aljibe Consultores. Se aplican tres metodologías diferentes para el cálculo de la recarga: el método APLIS (Andreo et al., 2004), el software VISUAL BALAN (Samper et al. 1992) y el software RENATA (DPA-IGME, 2012). Además, se propone un modelo conceptual, de flujo subterráneo y una posible distribución de recursos entre demarcaciones (IGME, 2021).

2. Modelo conceptual

En este capítulo se describe el modelo conceptual propuesto, incluyendo una descripción sobre la zona del acuífero y las interacciones del sistema con otras masas de agua subterránea. Se detallan características hidrogeológicas importantes que permiten caracterizar el funcionamiento del sistema. Este modelo conceptual sirve como base para la construcción del modelo matemático de flujo en el estudio.

2.1 Localización del área de estudio

El acuífero Jumilla-Yecla-Castellar (Figura 1) se compone de dos masas de agua subterránea: Jumilla-Yecla en la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) y Sierra de Castellar en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ). En total, abarca una superficie de 345,56 km², con 259,47 km² en la DHS y 86,09 km² en la DHJ. Este acuífero se extiende en parte de los municipios de Yecla y Jumilla en la provincia de Murcia, y Villena en la provincia de Alicante, siendo Jumilla el único núcleo poblacional importante dentro de su área. Estas masas de agua se identifican con los códigos 070.023 y 080-173, respectivamente.



Figura 1. Localización de la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla-Castellar (IGME, 2021).

El acuífero tiene una topografía suave (Figura 2), con la altitud máxima de 1.063 m.s.n.m. en la Sierra del Buey, y la altitud mínima de 483 m.s.n.m. en el borde oriental cerca de El Zaricejo. Predominan las cotas inferiores a 600 m.s.n.m., especialmente en su parte central, según datos del IGME-2021.

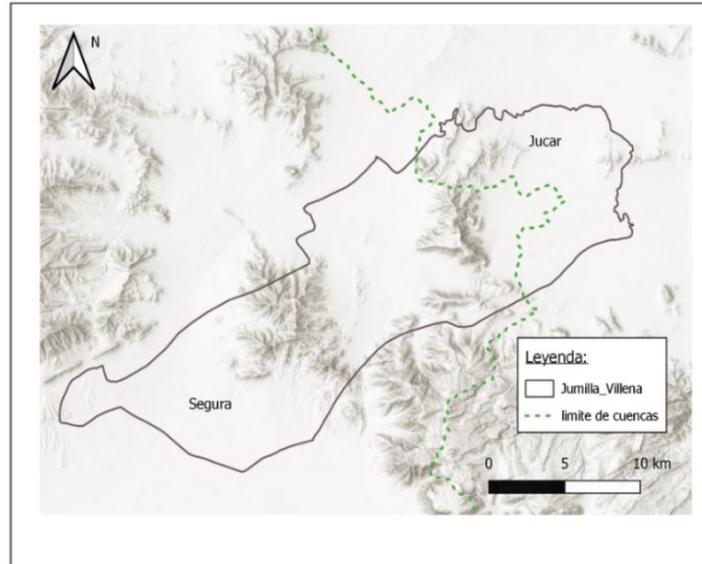


Figura 2. Topografía y límites de la masa de agua subterránea de Jumilla-Yecla-Castellar-Fuente: elaboración propia.

2.2 El contexto hidrológico

La descripción hidrogeológica del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar no muestra ríos de flujo constante, pero se identifican algunas ramblas y arroyos que pueden llevar agua durante períodos de intensas precipitaciones, como las ramblas de Jumilla y del judío, donde se encuentran los embalses del Morrón y del judío, ubicados fuera de los límites del acuífero y aguas abajo del núcleo urbano de Jumilla. Además, se registran fuentes naturales como El Chopo, situada a 499 m.s.n.m., y tres manantiales en el extremo suroccidental de la masa de agua subterránea Jumilla-Yecla-Castellar, con altitudes entre 560 y 620 m.s.n.m. Sin embargo, en la actualidad, todos estos manantiales se encuentran secos.

2.3 El contexto hidrogeológico

2.3.1 Límites del sistema

El acuífero Jumilla-Yecla-Castellar (07.05) está delimitado por diferentes unidades hidrogeológicas, como Clingla (07.35) y Serral Salinas (07.10), que presentan propiedades hidrogeológicas similares, como se muestra en la Figura 3

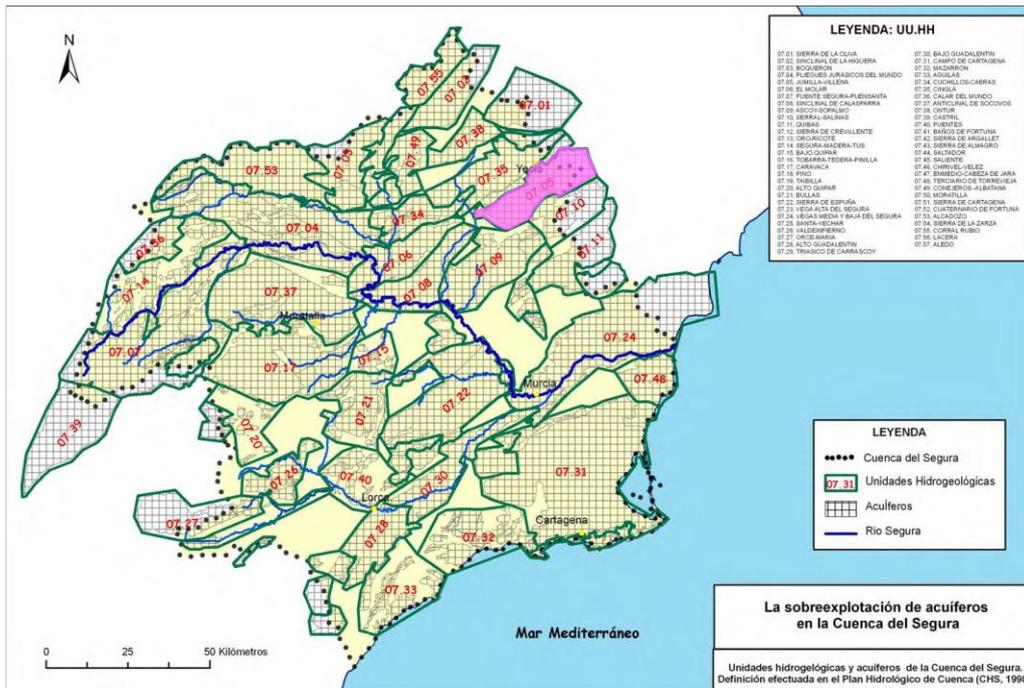


Figura 3: Mapa de unidades hidrogeológicas cercanas a la zona modelada (07.05)- Fuente: CHS, 1998.

Otra forma de delimitar el acuífero Jumilla-Yecla-Castellar (070.023) es a través de las masas de agua subterránea Clingla (070.12), Serral Salinas (070.027) y Serral Lacera (080.172) como se muestra en las Figura 4, que representan unidades con características hidrogeológicas similares.

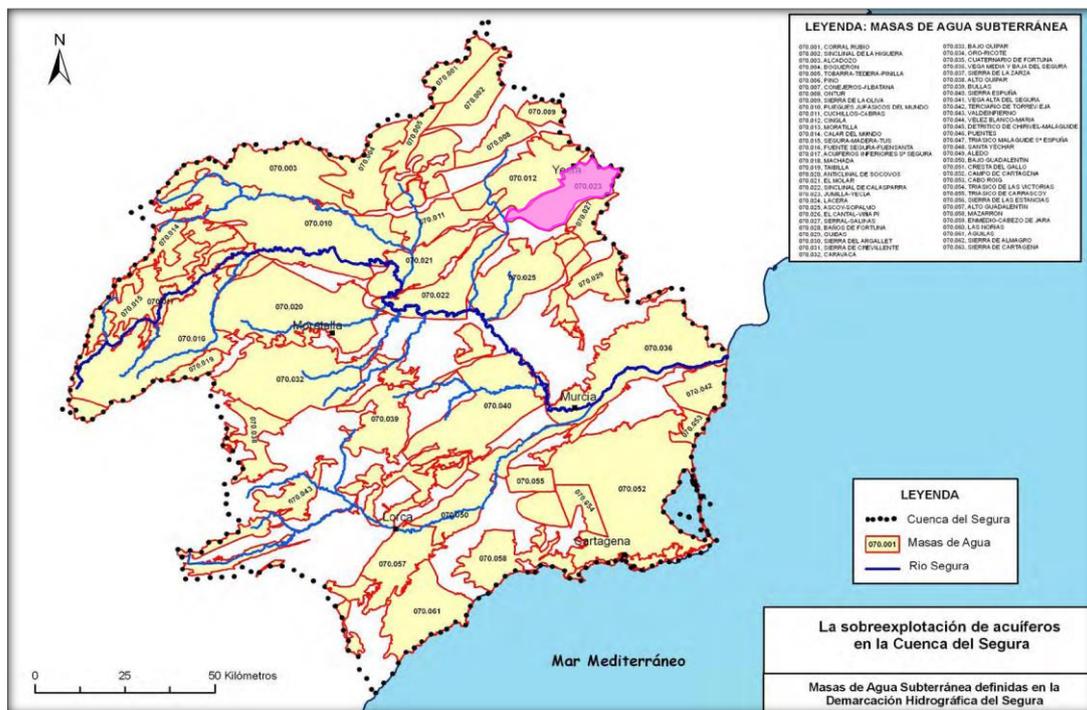


Figura 4: mapa de masa de agua subterránea cercanas a la zona modelada (070.023)-Fuente: DHS,1998

Desde una perspectiva geológica, el Prebético externo muestra una serie de pliegues en dirección NE-SO, con un espesor creciente hacia el sureste, lo que da lugar a la configuración actual de la red de drenaje compuesta por ramblas y cauces de pequeña entidad. El límite noroeste de la masa de agua subterránea está definido por el Trías de Jumilla-Yecla y por la facies Utrillas de la sierra del Buey, con contribución de algunas fallas normales en dirección NE-SO. Hacia el sureste, el límite está marcado por los materiales impermeables del Cretácico inferior, mientras que el Trías de Villena-Sax y el de Jumilla-Diapiro de La Rosa cierran el acuífero por el noreste y noroeste, respectivamente. Por último, la base impermeable del acuífero está formada por las margas, arcillas y yesos abigarradas del Trías Keuper.

Es importante destacar que, según el modelo y los estudios realizados, se considera que todos los límites del acuífero Cretácico superior son impermeables, lo que implica que no hay intercambio de agua entre este acuífero y otros acuíferos adyacentes a continuación en la Tabla 1 mostramos una descripción más detallada.

Limite	Tipo	Flujo	Naturaleza
Norte	Cerrado	Nulo	Convencional, es el límite de la demarcación hidrográfica del Júcar
Sur	Cerrado	Nulo	Cuenta con materiales de baja permeabilidad, con afloramientos Keuper de los diapiros salinos de la Rosa y Morrón
Suroeste	Cerrado	Nulo	Cuenta con materiales de baja permeabilidad, con afloramientos Keuper de los diapiros salinos de la Rosa y Morrón
Noroeste	Cerrado	Nulo	Impermeable, por afloramiento constituido por arenas, arcillas y margas de la Facies Utrilla, limita con las masas de agua subterránea Cingla y Moratilla

Tabla 1: Limite Hidrogeológicos de la masa-Fuente: elaboración propia

2.3.2 Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con el Reglamento de la Administración Pública del Agua y la Planificación Hidrológica, una unidad hidrogeológica se refiere a uno o varios acuíferos que se agrupan con el fin de administrar el agua de manera racional y eficiente. Estas unidades están interconectadas de tal manera que sus entradas, salidas y balance deben estudiarse en conjunto, si bien esta agrupación es subjetiva y depende de la escala y objetivos del trabajo (Sánchez, 2009). Para determinar estas

unidades, se utilizan mapas geológicos, datos geofísicos, informes de sondeos, columnas litológicas y estudios hidrogeológicos previos.

Actualmente, esta masa de agua subterránea ha sido declarada como sobreexplotada desde el 31 de julio de 1987, debido principalmente a la transformación de las áreas de secano en áreas de regadío entre 1950 y 1980, lo que ha llevado a una disminución promedio de los niveles del acuífero de 2-3 metros por año. A pesar de esta situación, se han seguido extrayendo reservas de agua subterránea sin una gestión adecuada del acuífero, lo cual debe realizarse de manera conjunta entre los dos organismos de demarcación (Demarcaciones hidrográficas del Júcar y Segura).

2.3.2.1. *Formaciones hidrogeológicas*

En el área de estudio se identificaron cuatro unidades litoestratigráficas que corresponden a diferentes periodos geológicos (de abajo hacia arriba):

1. Triásico: se compone por materiales de baja permeabilidad, principalmente yesos y arcillas, que se consideran una base impermeable.
2. Jurásico: está constituida por calizas y dolomías del Jurásico. Sin embargo, debido a que se encuentra a gran profundidad debajo del acuitardo, es poco conocida y de difícil acceso.
3. Base del Cretácico Inferior: está compuesto por areniscas y arcillas, y se considera menos permeable, actuando como un acuitardo.
4. Cretácico Superior y parte del Inferior: es la formación hidrogeológica principal del acuífero, compuesta principalmente por calizas y dolomías en la zona del Cretácico Superior, mientras que el Cretácico Inferior está formado por areniscas y arcillas, que actúan como elementos de separación con la formación geológica inferior (Jurásico). Estos materiales tienen baja permeabilidad y actúan como barreras impermeables para el flujo del agua, limitando su movimiento en el acuífero.

A continuación, se muestran la ubicación de los cortes en el acuífero (Figura 5).

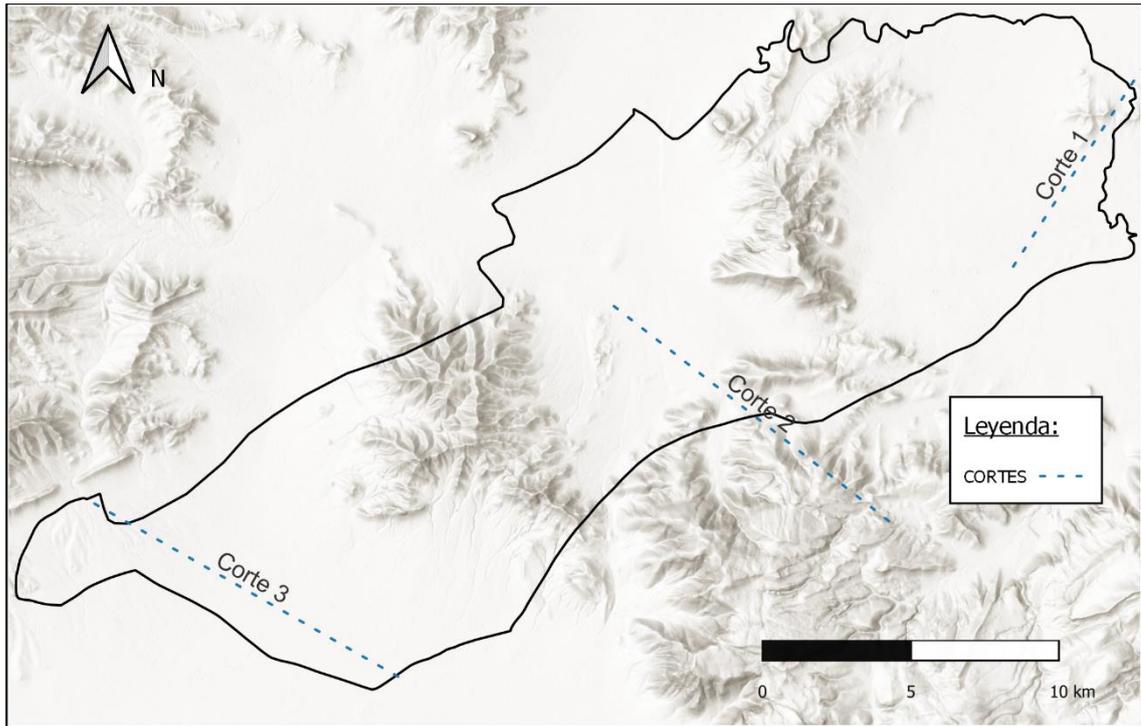


Figura 5: Ubicación de los cortes transversales en el acuífero -Fuente: elaboración propia con datos de IGME-2006

y los cortes geológicos del acuífero en las zonas de Jumilla, Yecla y Castellar. (Figura 6, Figura 7, Figura 8).

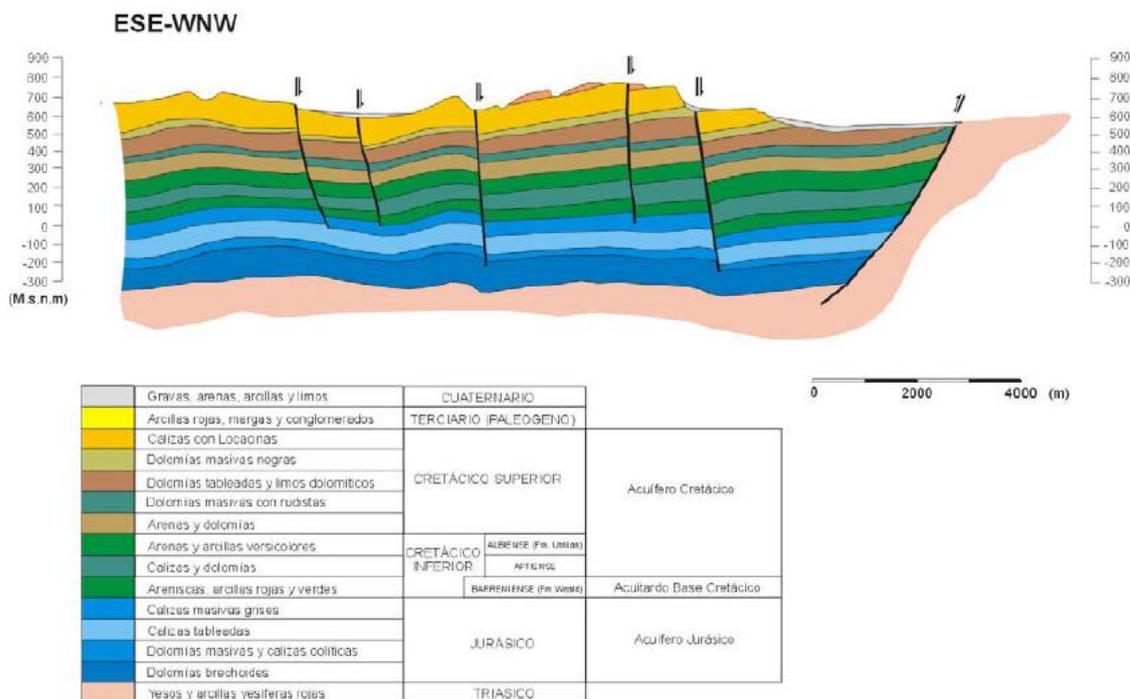


Figura 6: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Castellar -Fuente: IGME-2006

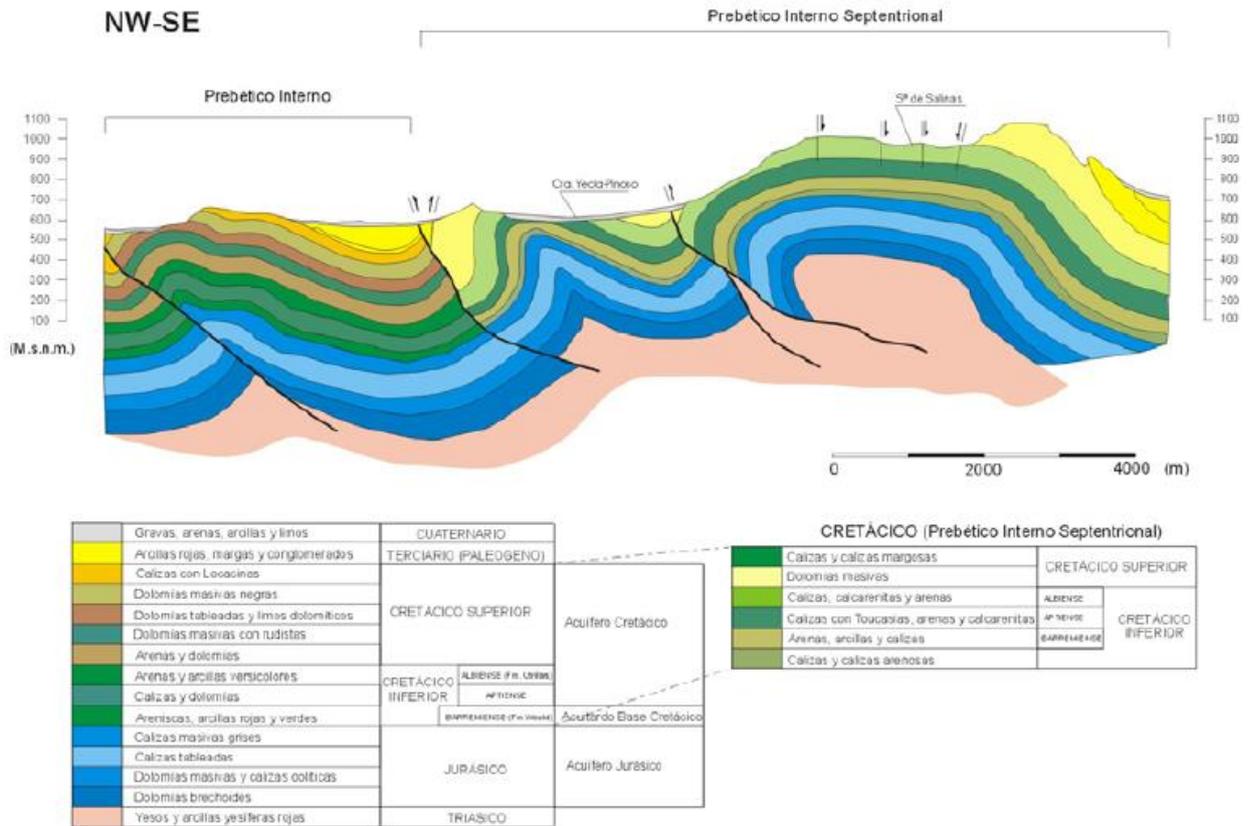


Figura 7: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Yecla -Fuente: IGME-2006

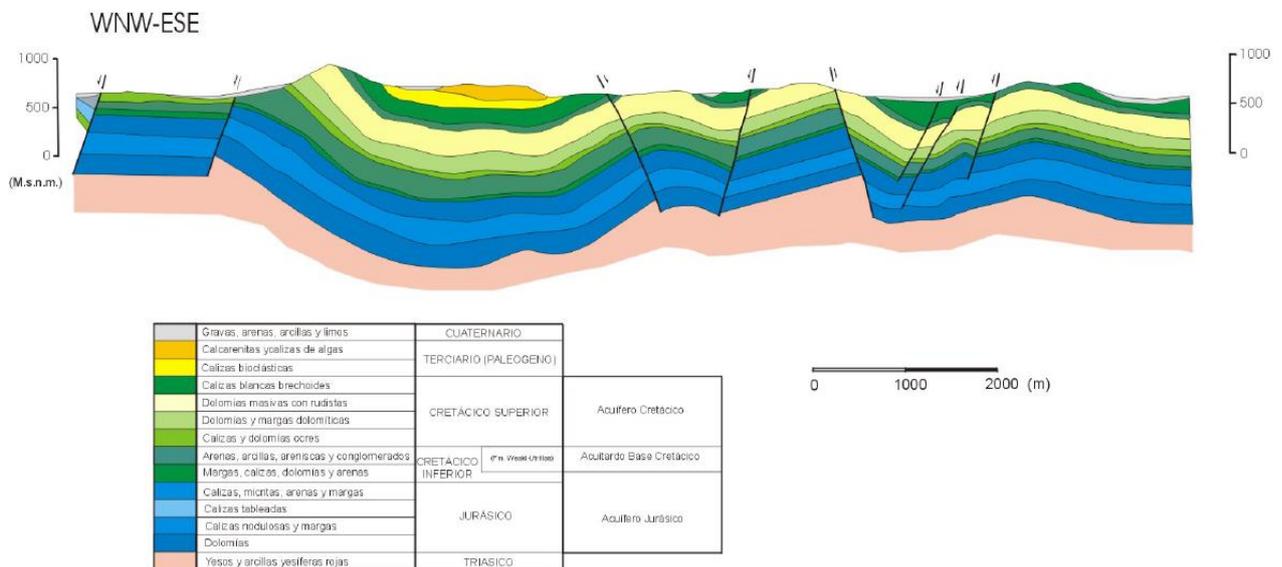


Figura 8: Cortes hidrogeológicos del acuífero-zona Jumilla -Fuente: IGME-2006

Según IMGE (2009), se considera que el acuífero está compuesto por 3 capas de medio poroso consideradas isotropas y homogéneas en toda su extensión. De esta manera, no se tiene en cuenta las heterogeneidades dentro de cada una de ellas, realizando una aproximación de medio poroso en lugar de utilizar aproximaciones más complejas.

No existen observaciones de niveles en el acuífero Jurásico, lo que dificulta evaluar con certeza la influencia del tramo poco permeable del Cretácico Inferior, conocido como acuitardo, en el modelo hidrogeológico. A pesar de esta limitación, se ha observado que existe una conexión hidráulica entre el acuífero Cretácico y el Jurásico, lo que permite una conexión vertical entre ambos, aunque la falta de datos del Jurásico dificulta un análisis detallado de esta relación.

En resumen, el modelo conceptual está compuesto por tres capas que representan inicialmente a los dos acuíferos: el Cretácico Superior, que forma la capa más superficial y actúa como acuífero libre, y el Jurásico, que representa la capa más profunda y se trata como un acuífero confinado (capas 1 y 3 respectivamente). También se incluye el acuitardo que los separa, correspondiente a la Base del Cretácico Inferior, compuesta por materiales poco permeables (capa 2).

Por tanto, en este estudio, siguiendo a IGME (2009), se identifican y describen tres capas principales en el subsuelo:

1. La capa superior, que corresponde a un acuífero libre (capa 1) compuesto principalmente por calcitas y dolomitas del Cretácico Superior. Esta capa del acuífero es la que actualmente se están explotando como fuente de agua subterránea, aunque con algunas limitaciones técnicas. Se ha observado históricamente un descenso promedio de los niveles piezométricos de aproximadamente 2.5 metros por año, debido a un desequilibrio entre las extracciones y las recargas de agua. Sin embargo, se destaca que aún existe una falta de datos confiables sobre las extracciones de agua subterránea de este acuífero.
2. La capa intermedia se trata como un acuitardo o formación confinante (capa 2), correspondiente a la base del Cretácico Inferior, compuesta principalmente por areniscas y arcillas. Esta capa separa el acuífero Cretácico Superior, de carácter libre, del Jurásico de comportamiento cautivo o confinado.
3. La capa más profunda corresponde a un acuífero confinado (capa 3) compuesto por materiales de edad Jurásica, principalmente calcitas y dolomitas.

En este trabajo, al igual que en IGME (2009), se utilizó un conjunto de mapas de líneas isohipsas para definir la posición en profundidad del techo del Cretácico Superior y la base del Cretácico Inferior. Estos mapas se crearon a partir de la interpretación de datos geofísicos, específicamente perfiles eléctricos verticales y sondeos mecánicos (ITGE, 1992).

Para construir el modelo tridimensional, se importaron los perfiles geo-eléctricos y los mapas de isohipsas fueron directamente interpolados. La estructura tridimensional del modelo y las capas que lo conforman se ilustran en la Figura 9. En ella se pueden observar las tres capas que representan los acuíferos Cretácico (capa 1) y Jurásico (capa 3), separados por una formación acuitarda correspondiente a la base del Cretácico Inferior (capa 2), así como la topografía interpolada a lo largo de la malla.

Es importante tener en cuenta que la escala vertical en la figura está exagerada 5 veces y que el dominio representado en la figura es más amplio que los límites tradicionales utilizados en otros estudios.

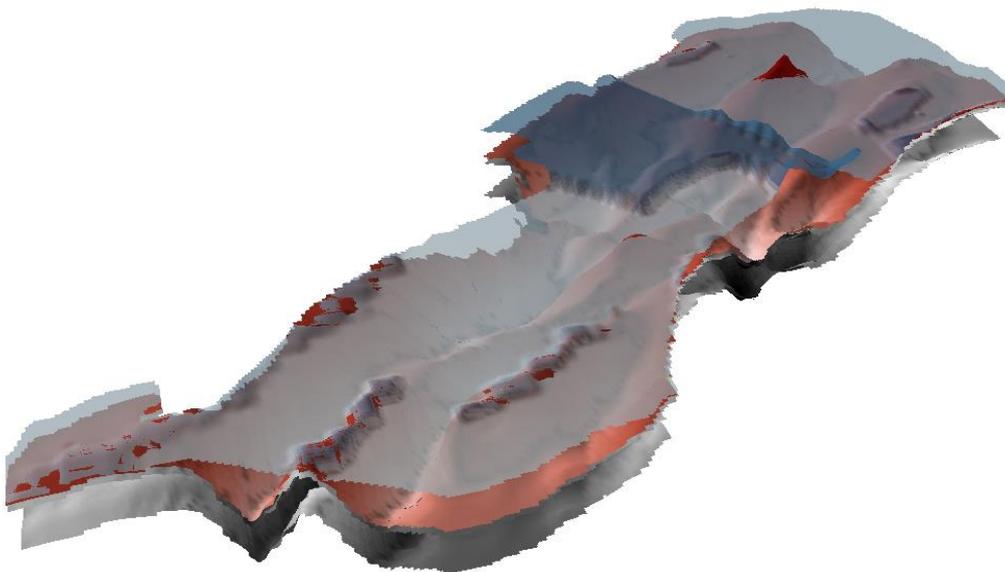


Figura 9: Dominio y malla 3D implementada en VMODFLOW. Fuente: IGME-2009

2.3.3 Contexto geológico

Desde el punto de vista geológico, de acuerdo con IGME (2006), la zona de estudio se encuentra en la región de la zona Prebética de las Cordilleras Béticas, que limita al noroeste con el Macizo Ibérico Central. Estas cordilleras se formaron durante el Cretácico y parte del Terciario en el margen continental del sureste del Sistema Ibérico, como resultado de la Orogenia Alpina. Las

Cordilleras Béticas se extienden desde Gibraltar hasta cabo de la Nao, y se prolongan hacia las islas Baleares (Figura 10).

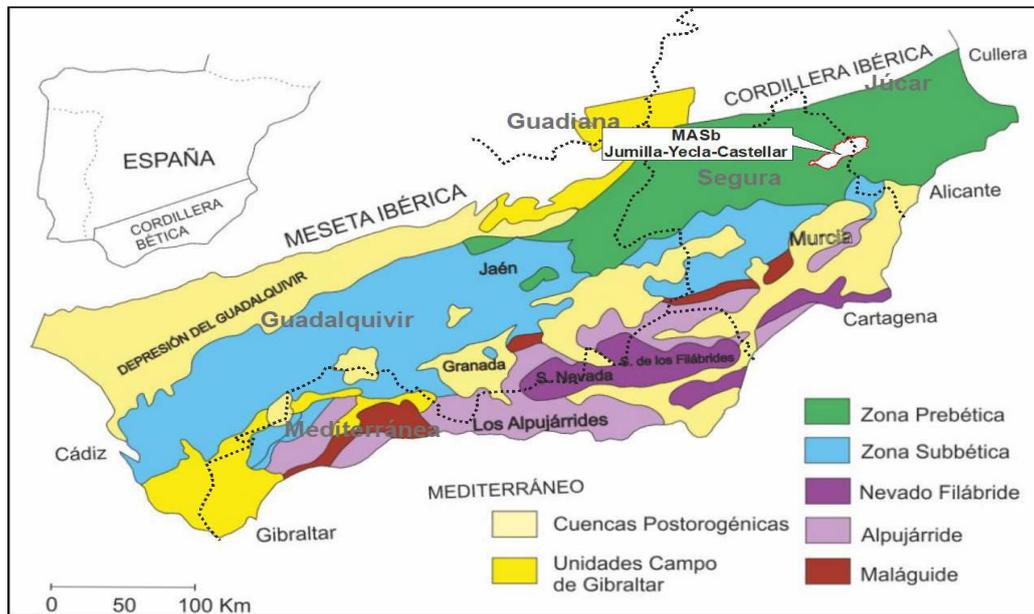


Figura 10: MACH de Jumilla-Yecla-Castellar en el Marco de las Cordilleras Béticas-Fuente: Mod. Fernandez y Gil, 1989.

De acuerdo con el IMGE-2021, la base de la serie litoestratigráfica está compuesta por un grupo de margas, arcillas y yesos con colores variados característicos del Trías Keuper. Sin embargo, su espesor es desconocido debido a su escasa exposición en superficie y a la influencia tectónica de los afloramientos. Por encima de esta formación se encuentran las zonas carbonatadas del Jurásico, que en el Lías están asociadas con dolomías altamente fracturadas y en el Malm con calizas nodulosas que contienen Ammonites, y que hacia el techo se convierten en calizas de grano fino y areniscas.

El Cretácico inferior, según IMGE (2021), comienza con areniscas y arcillas rojas y verdes de la formación Weald, sobre las cuales se deposita un paquete carbonatado que continúa con facies de arenas y arcillas de colores variables de la formación Utrillas, aunque éstas últimas tienen poca continuidad lateral. Por otro lado, el Cretácico superior está compuesto por un tramo basal de dolomías, sobre el cual se encuentra un paquete dolomítico arcilloso que se convierte en calizo hacia el techo. La potencia media de estos materiales, que presentan alta porosidad y fracturación, es de alrededor de 550 metros.

El Terciario muestra una laguna estratigráfica en el Paleógeno y comienza con un conjunto de margas arenosas, biocalcaremitas y margas del Mioceno inferior. Sobre estos materiales se

deposita un complejo margoso de aproximadamente 40 a 50 metros de espesor, seguido por un segundo tramo también margoso (facies Tap) del Plioceno, que en conjunto puede alcanzar hasta 100 metros.

Finalmente, en la parte superior de la columna litoestratigráfica se encuentran sedimentos cuaternarios de conglomerados, arenas y arcillas, que están bien representados en superficie, pero tienen poca continuidad vertical. Esta descripción se encuentra representada en la Figura 11.

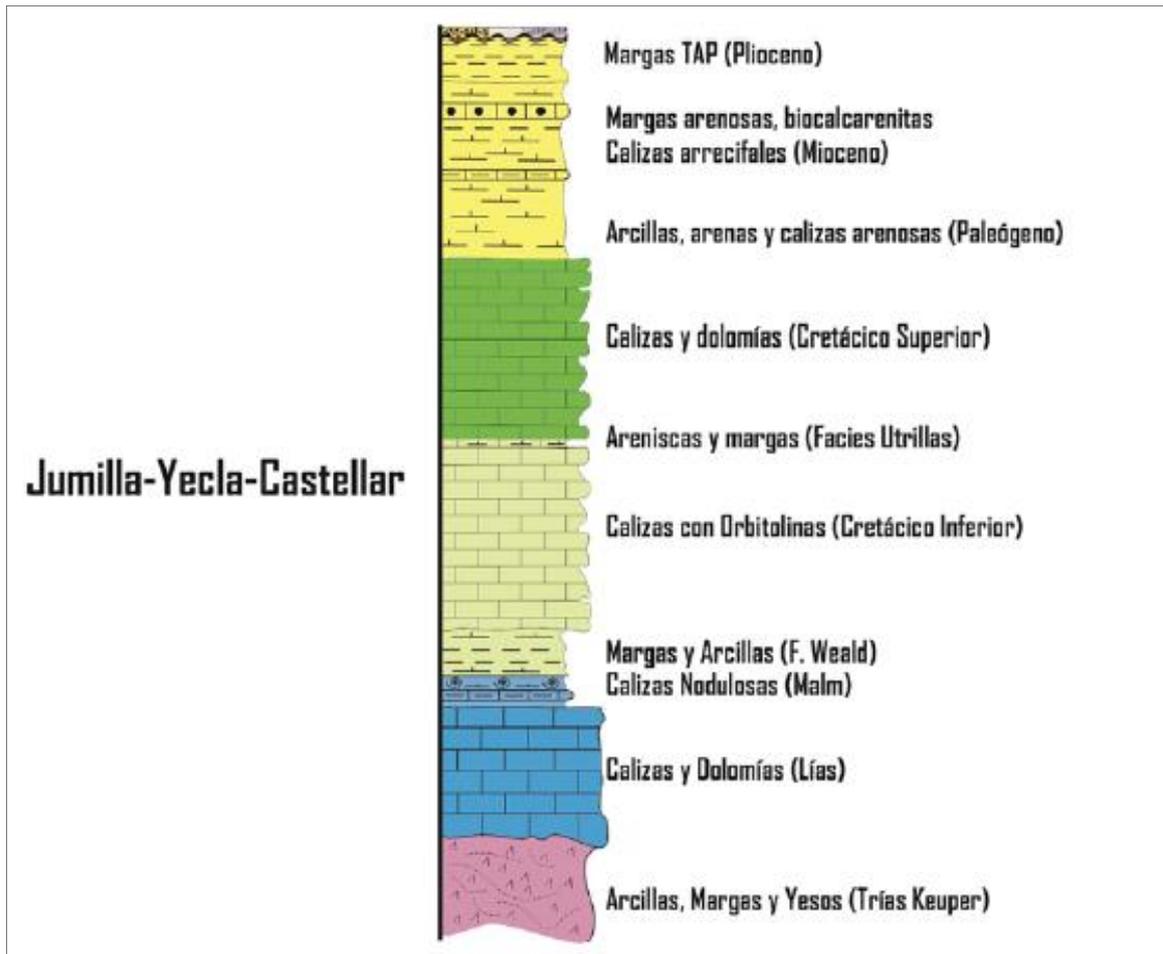


Figura 11: Columna litoestratigráfica de la masa de agua subterránea de Jumilla-Yecla-Castellar, Fuente: DHS, 2021.

El acuífero está compuesto principalmente por dolomías y calizas del Cretácico superior, mientras que las formaciones de margas y margocalizas del Cretácico inferior actúan como una capa impermeable en la base. En la Tabla 2 se describe la columna litológica típica del acuífero, que incluye información sobre la litología, extensión, espesor y edad geológica de los materiales presentes.

Litología	Extensión afloramiento km ²	Rango de espesor (m) Valor mayor del rango	Edad geológica
Yesos y arcillas (impermeable de base)	0.8		Triásico
Dolomías, calizas y margas	0	300	Jurásico
Areniscas y arcillas rojas y verdes (nivel acuitardo, FM Weald)	0		Barremiense
Calizas y dolomías	1		Aptiense
Areniscas, arcillas y margas en facies de Utrillas	2.2		Albiense
Dolomías	59.6	90	Cretácico superior
Arcillas dolomíticas	59.6	100	Senoniense (Cretácico superior)
Calizas y dolomías	59.6	360	Eoceno inferior
Calcarenitas	2.2	50	Mioceno inferior
Conglomerados, gravas y arcillas	196.4	100	Mioceno inferior

Tabla 2: Columna litológica tipo; Fuente: Caracterización de masas de agua subterránea DHS-2015

2.3.2.1. Dominios hidrogeológicos

Los dominios hidrogeológicos son áreas que comparten características geológicas y comportamiento hidrogeológico similares, como ya se ha explicado más arriba, en este modelo se han definido 3 unidades hidrogeológicas:

1. Un acuífero de carácter libre (capa1) formado por los materiales del Cretácico Superior y parte del Inferior.
2. Uno confinante o acuitardo (capa 2), formado por base del Cretácico Inferior. Dichos materiales separarían el acuífero Cretácico Superior.
3. Un acuífero de carácter confinado (capa 3) compuesto por materiales de edad Jurásica (capa 3).

El acuífero libre (capa1) se ha dividido en tres dominios hidrogeológicos diferentes los cuales son Jumilla, Yecla y Castellar; esta zonificación se propuso en IGME (2009) en base a los mapas de isohipsas que mostraban una serie de fallas transversales que afectaban al entorno de Yecla como ya se ha comentado. Por lo tanto, los dominios hidrogeológicos de la capa 1 (acuífero libre) quedaron definidos en 3 zonas: Jumilla Yecla y Castellar, donde Yecla se queda aislada hidráulicamente como se muestra en la Figura 12.

En la capa 2 (Acuitardo) se considera un solo dominio hidrogeológicos y de la misma manera en la capa 3 (acuífero confinado).

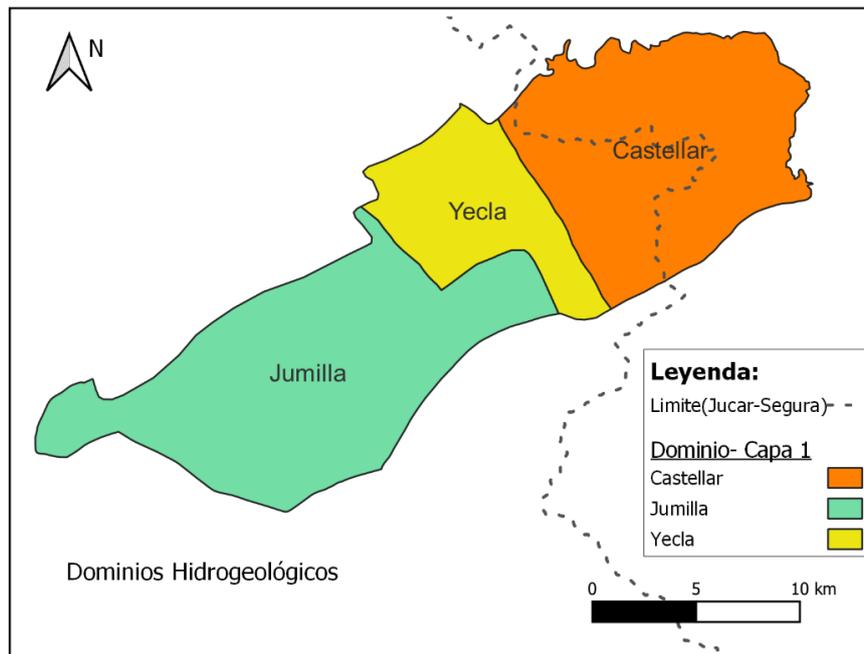


Figura 12: Dominios hidrogeológicos – capa 1; Fuente: elaboración propia

2.3.2.2. Falla geológica

El modelo desarrollado por el IGME (IGME, 2009) muestra la presencia de una serie de fallas transversales que afectan el entorno de Yecla, basado en los mapas de isohipsas utilizados para representar la tridimensionalidad del acuífero. La Figura 13 muestra un corte hidrogeológico esquemático en dirección NNW-SSE que atraviesa esta zona. En este corte se ilustra cómo dicha área podría quedar hidráulicamente aislada del resto debido a movimientos tectónicos (fallas direccionales con componente vertical) y por la base del Cretácico Inferior de más baja permeabilidad que actuaría como barrera hidráulica.

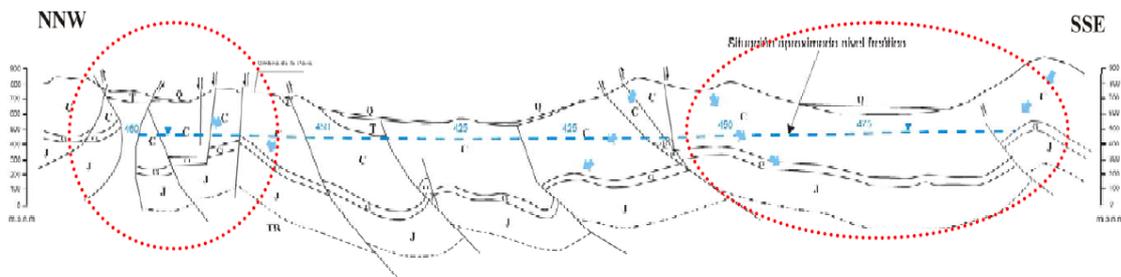


Figura 13: Corte hidrogeológico esquemático ilustrando cómo la zona del entorno de Yecla (en círculo rojo discontinuo), puede quedar aislada debido a movimientos estructurales. De la misma manera, la zona de la Olla del Moñigal presenta una situación similar (extraído de IGME-DPA 2006).

Además, en la Figura 14 se muestra el contexto geotectónico del área del entorno del acuífero Jumilla-Villena, en donde se puede observar y confirmar la presencia de numerosas fallas direccionales que permitirían el aislamiento hidráulico de diferentes zonas del acuífero.

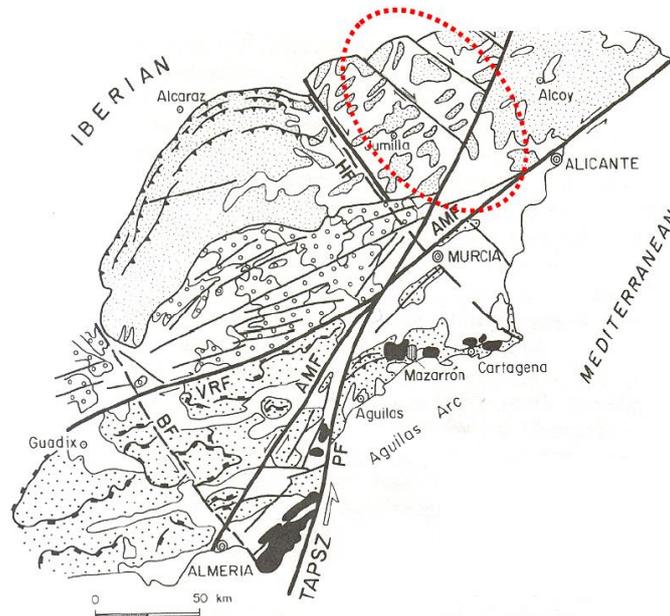


Figura 14: Contexto geotectónico del área del entorno del acuífero Jumilla-Villena. En rojo, localización de fallas direccionales que permitirían aislar hidráulicamente zonas del acuífero; Fuente Doblas et al.1991)

Es por lo que se ha decidido incluir dicha falla que aísla la zona de Yecla en el modelo como lo podemos apreciar en la Figura 15

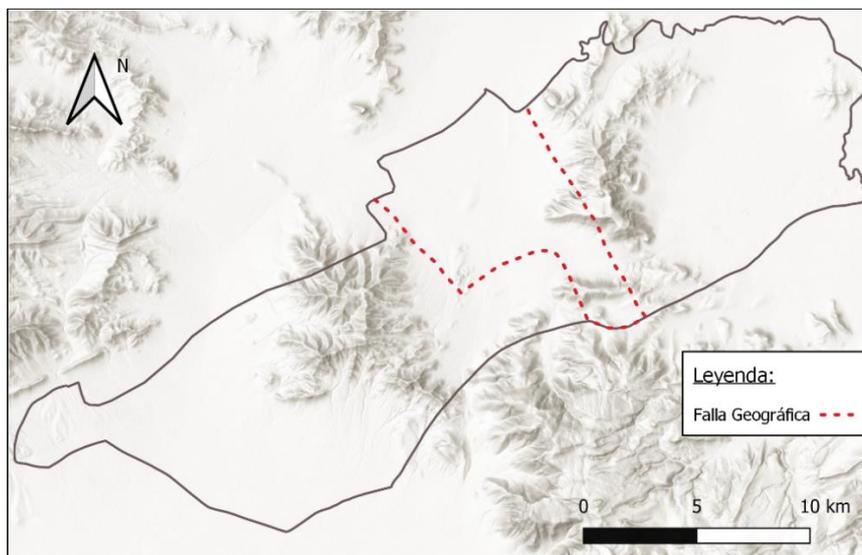


Figura 15: Ubicación de la falla en el acuífero en la zona de Yecla -Fuente: elaboración propia

2.4 Recarga

La recarga de esta masa proviene de dos fuentes: recarga natural por infiltración del agua de precipitación y recarga por retornos de riego derivada de los excedentes de demanda agrícola que no se evaporan ni se consumen. La Figura 16 muestra la variación anual de la recarga por precipitación y la recarga de los retornos subterráneos de riego agrícola introducidos en el modelo.

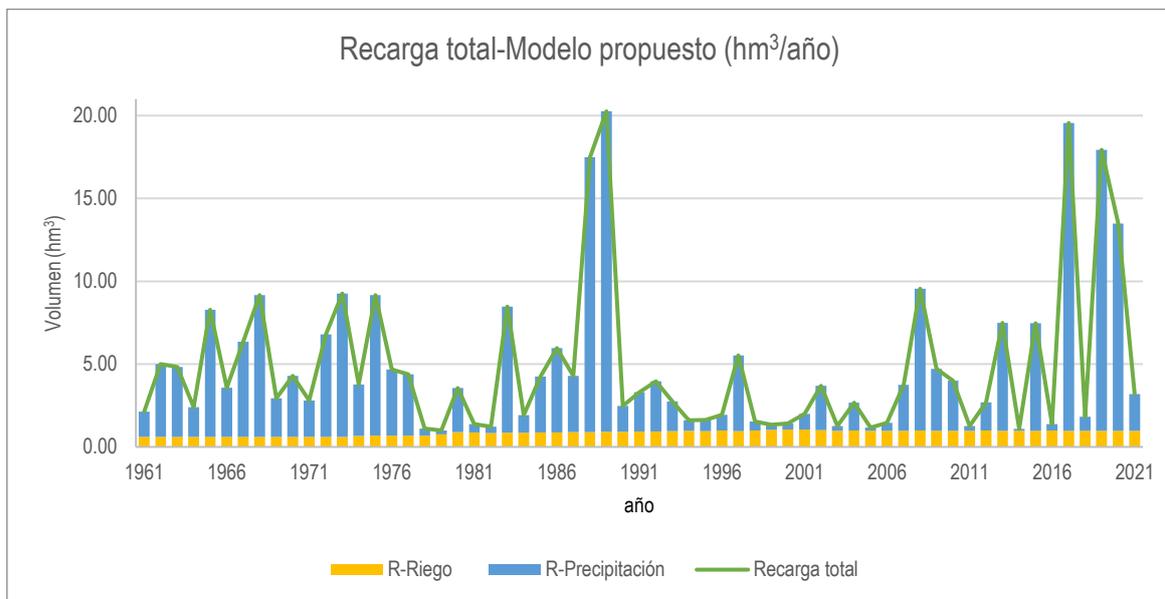


Figura 16. Evolución anual de la recarga total en el modelo Fuente: elaboración propia

2.5.1. Recarga por precipitación

La recarga por infiltración de la precipitación es estimada utilizando el código PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), el cual simula el ciclo hidrológico distribuido en el espacio con una resolución de 1 km x 1 km y un paso de tiempo mensual (Pérez - Martín, 2005). Para esta masa PATRICAL considera una zonificación de la superficie del acuífero de 4 sectores identificados con los códigos 815202, 8152500, 7102320 y 7102380.

Esta recarga llega a la capa superficial (acuífero libre), compuesta por los materiales del Cretácico Superior y parte del Inferior. La Figura 17 muestra los sectores en los que se ha dividido la superficie para la recarga.

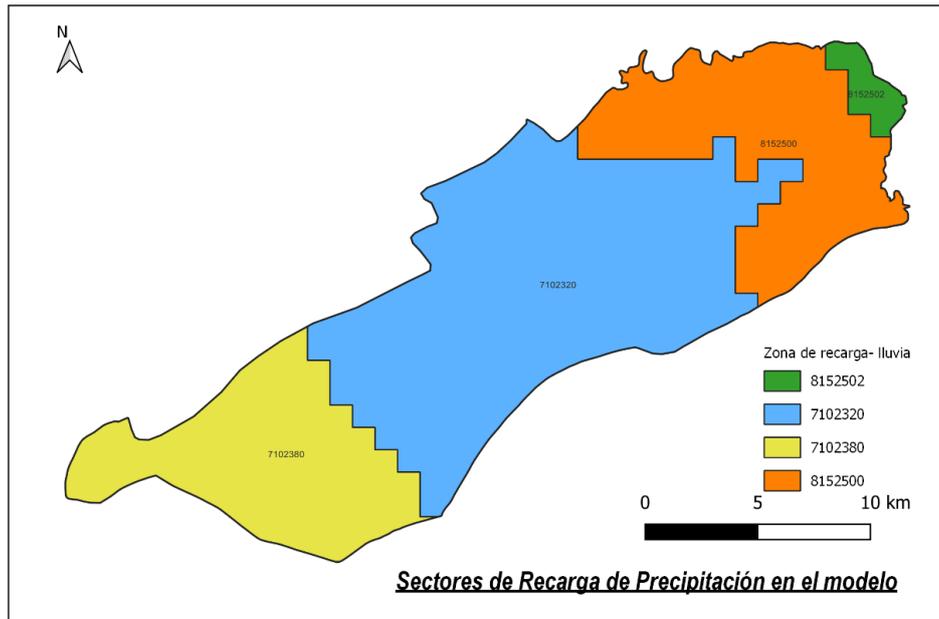


Figura 17: Sectores de recarga por infiltración de precipitación según las zonas utilizadas en PATRICAL. Fuente: elaboración propia

La recarga muestra una variabilidad significativa a lo largo de los años. Durante el periodo previo a que se realicen las extracciones en el acuífero comprendido entre 1940/41 y 1959/60, presenta un valor medio de 3.08 hm³ al año, mientras que en el periodo de 1960/61 a 2020/21, el valor medio asciende a 4.06 hm³. Esto indica que, a pesar de esta variabilidad, la recarga promedio por precipitación se ha mantenido estable en los últimos años, como se puede apreciar en la Figura 18.

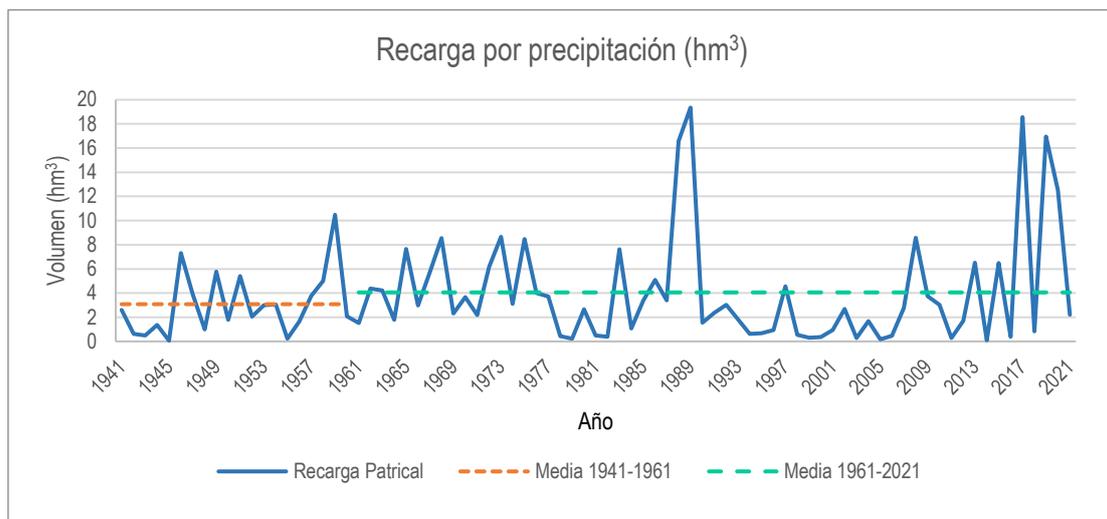


Figura 18: Evolución anual de la recarga total por infiltración de lluvia según modelo PATRICAL. Fuente: elaboración propia

En el estudio titulado "Determinación de las reservas útiles de embalses subterráneos en el acuífero Jumilla-Villena (Alicante y Murcia)" del año 2009, se estimó una recarga constante de $10,62 \text{ hm}^3/\text{año}$. Mientras, en el estudio "Encomienda de gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el inventario de recursos hídricos subterráneos y con la caracterización de acuíferos con continuidad hidrogeológica entre demarcaciones hidrográficas. Jumilla-Yecla-Castellar" del 2021, se calculó una recarga constante de $10,62 \text{ hm}^3/\text{año}$. Al comparar estos valores con la recarga media propuesta en nuestro modelo de $4,06 \text{ hm}^3/\text{año}$, se puede observar que es significativamente menor (Figura 19).

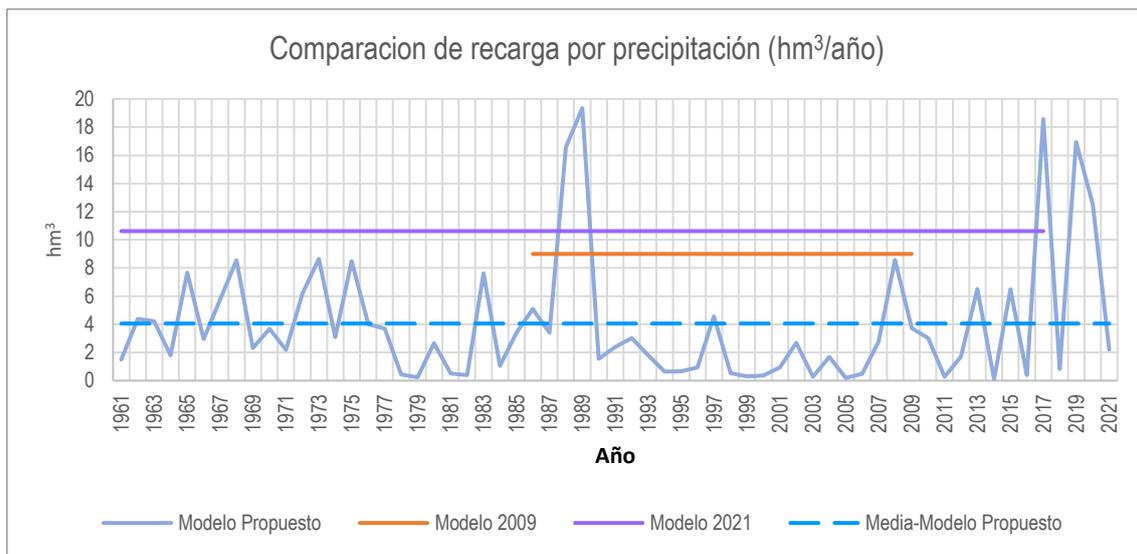


Figura 19: Comparación de la recarga de precipitación propuesta con modelos previos del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia

2.5.2. Recarga por retornos de riego

La recarga por retornos de riego se estima en función de las características de las unidades de demanda agrícola (UDA): su ubicación, las comunidades de regantes que las componen, el origen del agua, las tecnologías de riego utilizadas, las infraestructuras existentes, entre otros. La información necesaria para el cálculo se obtiene de la DHJ y de la DHS. Se asume que la distribución espacial de los retornos es constante en toda la superficie de regadío en ambas demarcaciones hidrográficas.

Las UDA's se muestra en la Figura 20 clasificadas según la demarcación hidrográfica correspondiente.

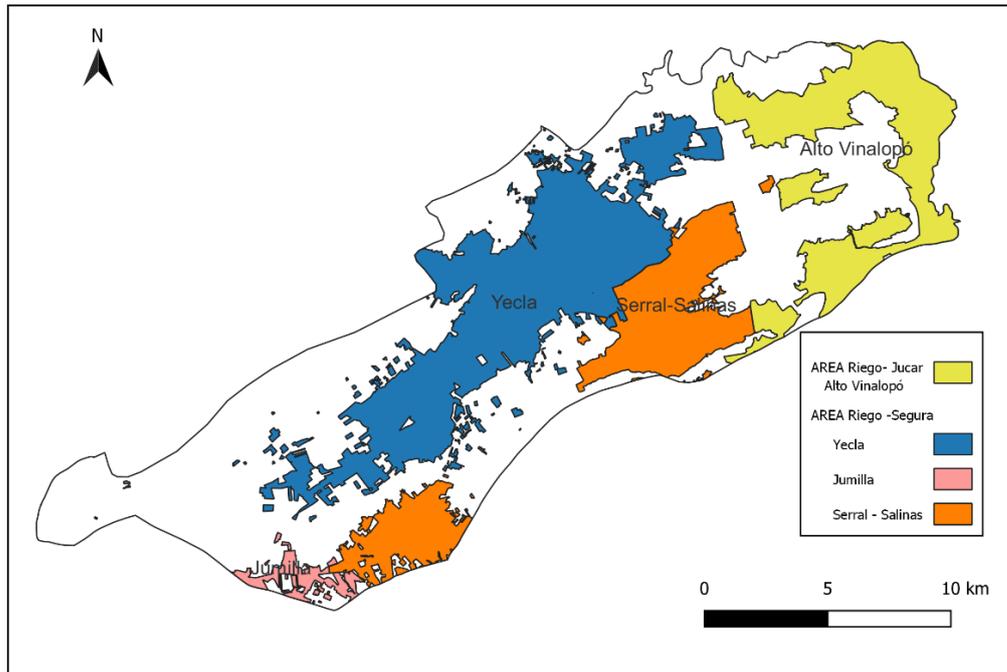


Figura 20: Sectores de recarga por retornos de riego de las unidades de demanda agrícola. Fuente: elaboración propia

Las características de las UDA's son las que se muestran en la Tabla 3.

CODIGO	DEMARCACIÓN	AREA DE RIEGO	SUPERFICIE BRUTA (Ha)	ORIGEN
A9035	Júcar	Alto Vinalopó	4120.08	Subterráneo
UDA01	Segura	Yecla	7547.23	Superficial
UDA02	Segura	Jumilla	393.59	Superficial
UDA05	Segura	Serral Salinas	3879.41	Superficial

Tabla 3: Características de la superficies de riego ubicadas en la masa de Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia

La UDA Alto Vinalopó forma parte de la DHJ y tiene una superficie bruta de 4120.08 Ha y una tasa de retorno con un coeficiente del 2.5% (DHJ). Con un promedio de bombeo de 21.87 hm³/a, se registra una recarga en el sistema Jumilla-Yecla-Villena de 0.55 hm³/a.

Las UDA's Yecla, Jumilla y Serral Salinas forman parte de la DHS y tienen una superficie bruta de 7547.23 Ha, 393.59 Ha y 393.59 Ha, respectivamente. Su tasa promedio de retorno es del 1.5% sobre la demanda bruta agraria (DHS, 2015). Con un promedio de bombeo de 20.65 hm³/a para fines agrarios, resulta una recarga en el sistema Jumilla-Yecla-Villena de 0.31 hm³/a. Los datos

utilizados corresponden a los publicados en los planes hidrológicos (DHJ, 2021b; DHS, 2015/2021- anejo 3).

La evolución de la recarga por retornos de riego ha presentado una ligera variabilidad al alza en el volumen anual en las demarcaciones hidrográficas del Júcar y del Segura, tal como se muestra en la Figura 21.

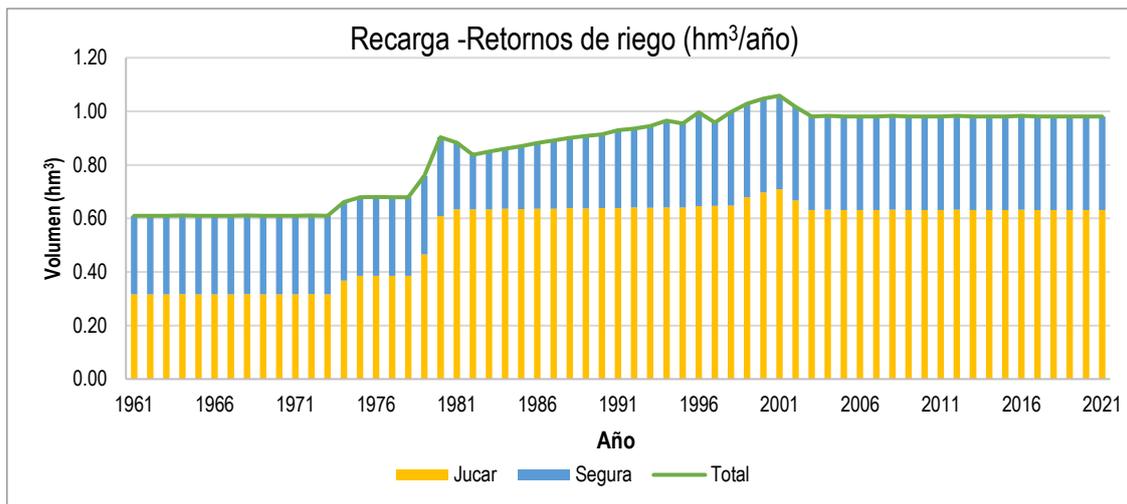


Figura 21: Evolución anual de la recarga anual por retornos de riego. Fuente: elaboración propia

En el modelo del año 2009, se estimó una recarga constante por retorno de riego de 9 hm³/año. En cambio, en el modelo del 2021, se calculó una recarga constante por retorno de riego de 8,31 hm³/año. Al comparar estos valores con la recarga media por retorno de riego propuesta en nuestro modelo de 0,86 hm³/año, se puede observar que es significativamente menor en la Figura 22.

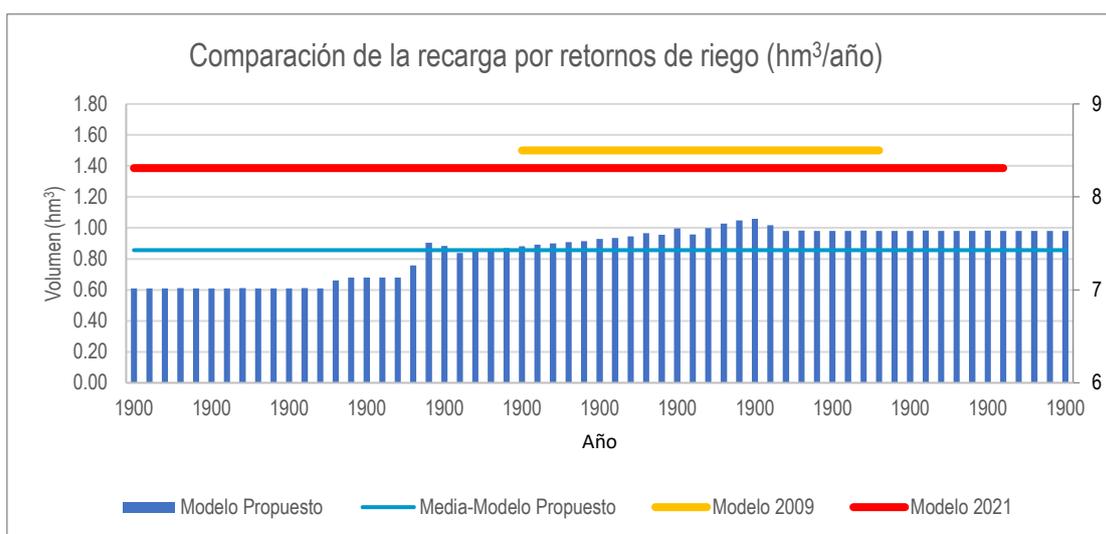


Figura 22: Comparación de la Recarga de Retornos de Riego propuesta con modelos previos del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia

2.5 Extracciones de agua subterránea

La masa de Jumilla-Yecla-Castellar ha sido declarado como sobreexplotada debido a las extracciones ascendentes de agua subterránea para diversos usos, tales como agricultura, consumo humano, entre otros. Para analizar esta situación, estudiaremos las extracciones realizadas y la ubicación de los diferentes pozos de bombeo, la cual se obtuvo de modelos previos, como se muestra en la Figura 23.

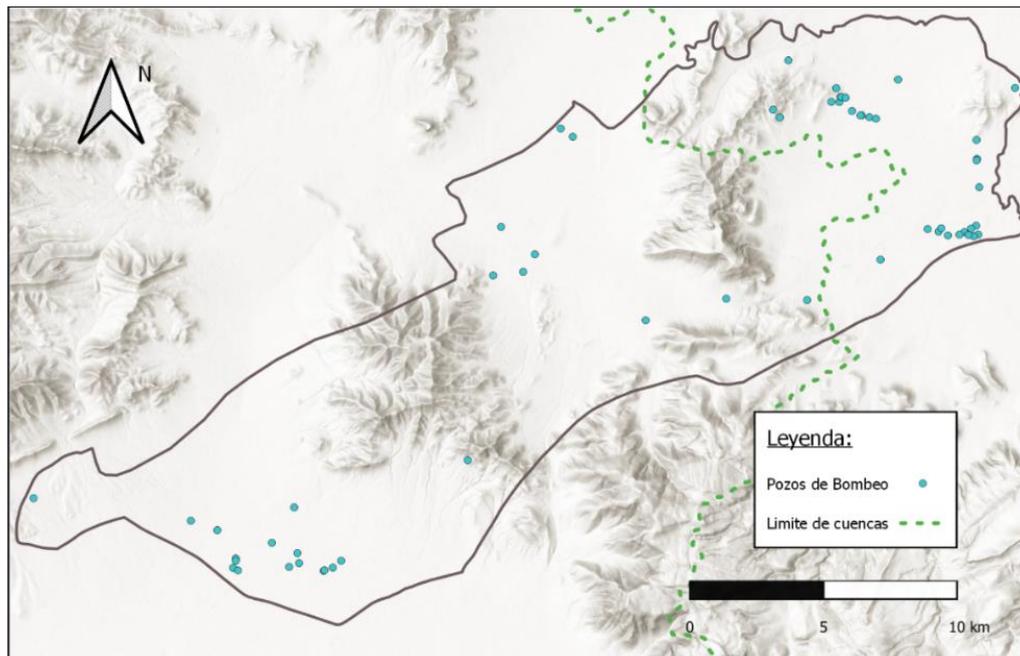


Figura 23: Ubicación de los pozos de bombeo Fuente: elaboración propia

En el modelo del año 2009, se consideran bombeos anuales con una tendencia ascendente para los años hidrológicos 1985/ 86-2008/09 con extracciones medias de 45.55 hm³/año. En cambio, el modelo del año 2021 identificó una tendencia ascendente en los bombeos anuales para los años hidrológicos 1960/61-2016/17, con una extracción media de 42.09 hm³/año. Al comparar ambos modelos, se pudo observar que las diferencias en los bombeos no eran significativas como muestra la Figura 24.

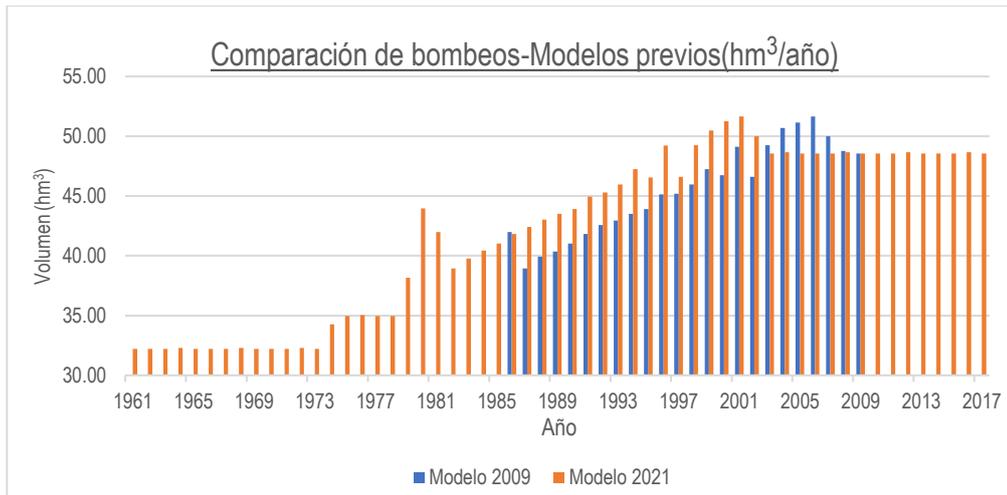


Figura 24: Comparación de los bombeos en los modelos IGME-DPA (2009) e IGME (2021). Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, hemos obtenido información proporcionada por la DHJ sobre los bombeos realizados en su demarcación, lo cual nos permitirá compararlos con los modelos previos.

En el modelo del año 2009, se consideran bombeos anuales con una tendencia ascendente para los años hidrológicos 1985/86-2008/09 con extracciones medias de 25.17 hm³/año. Por otro lado, en el modelo del año 2021, se identificó una tendencia ascendente en los bombeos anuales para los años hidrológicos 1960/61-2016/17, con una extracción media de 21.63 hm³/año; y en la información dada por la DHJ para los años hidrológicos 2006/07-2020/21 las extracciones medias fueron de 21.86 hm³/año. Al comparar los bombeos, se pudo observar que las diferencias no son significativas entre ellas especialmente en el modelo del año 2021 y la información de la DHJ como vemos en la Figura 25.

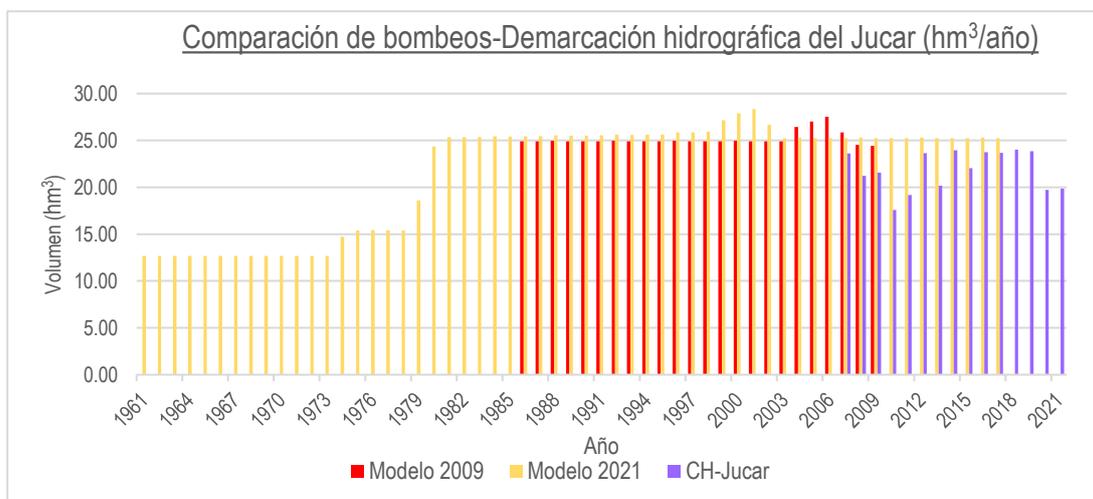


Figura 25: Comparación de los bombeos en la zona de la DHJ de los modelos IGME-DPA (2009) e IGME (2021) con los datos proporcionados por la DHJ. Fuente: elaboración propia.

En base al análisis previo, procederemos a definir los bombeos para nuestro modelo, tomando como referencia las extracciones de agua subterránea del modelo del año 2021, dado que la diferencia con la demás información es mínima y por tener un periodo más amplio (1960/61-2016/2017). Además, asumiremos para los siguientes 4 años hidrológicos el mismo valor que el año hidrológico 2016/17. Resultando en nuestro modelo, bombeos con tendencia ascendente para el periodo hidrológico comprendido entre 1959/60 y 2020/21, con un valor medio de 21.81 hm³/año para la DHJ, así como un valor medio de 20.65 hm³/año para la DHS, lo que resulta en un valor medio total de 42.52 hm³/año, tal como se muestra en la Figura 26.

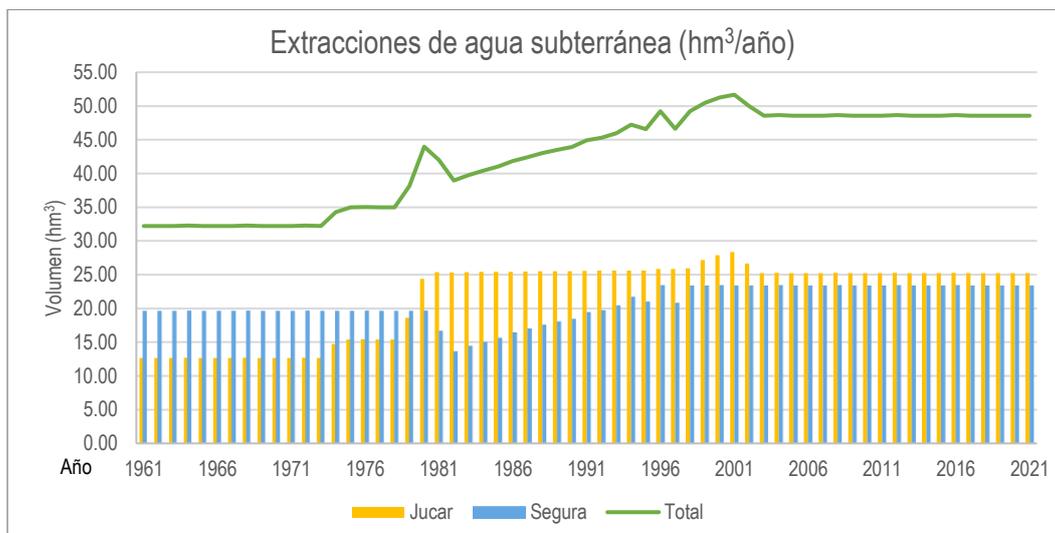


Figura 26: Evolución anual de las extracciones de agua subterránea en el nuevo modelo. Fuente: elaboración propia.

2.6 Manantiales

Se dispone de información acerca del funcionamiento de un manantial llamado El Chopo, ubicado en el extremo nororiental del acuífero y con una altitud de 499 metros sobre el nivel del mar. Dicho manantial funcionó hasta que comenzaron las extracciones (mediados del siglo XX). Según Pérez Medina (2005), se utilizaba para el riego de unas 1.600 hectáreas. Además, el IGME ha registrado tres manantiales en el extremo suroccidental del acuífero (puntos M-1, M-2 y M-3, Figura 27) con altitudes entre 560 y 620 metros sobre el nivel del mar. En la actualidad, todos estos manantiales se encuentran secos.

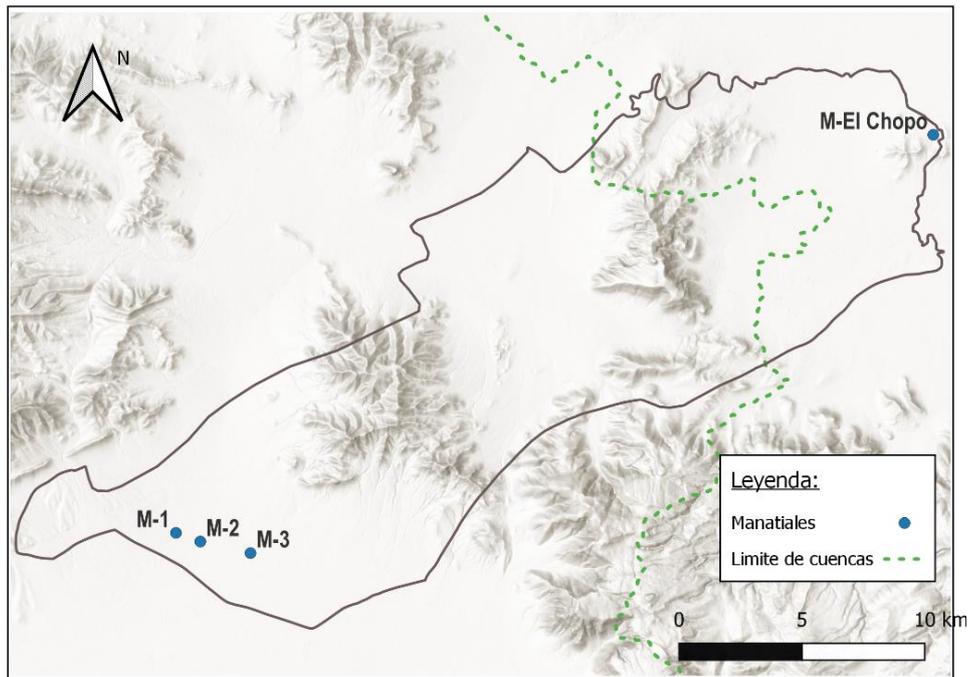


Figura 27: Localización de los manantiales documentados en la zona modelada. Fuente: elaboración propia.

2.7 Modelo hidrogeológico conceptual.

El modelo hidrogeológico conceptual de la masa Jumilla-Yecla-Castellar se basa en un enfoque de entradas (recarga de agua) y salidas (extracciones de agua). Las entradas son principalmente la infiltración de precipitaciones y la recarga inducida desde la superficie por retornos de riego. Las salidas se refieren a las extracciones de agua subterránea a través de pozos de bombeo para diversos usos. Los manantiales deberían considerarse en régimen no influenciado o natural.

Además, se consideran:

- Geología, flujo de agua y propiedades del terreno según el tipo de suelo.
- Interacción con otras unidades hidrogeológicas cercanas, que se consideran nulas debido a que se asumen como límites impermeables del acuífero.
- Existencia de una falla geográfica que rodea el dominio de Yecla.
- Presencia de formaciones hidrogeológicas compuestas por tres capas, que representan un acuífero libre, un acuitardo y un acuífero confinado.
- Inclusión de 5 dominios hidrogeológicos, con 3 dominios en la primera capa (Jumilla, Yecla, Castellar), y un dominio en cada una de las otras dos capas.
- Definición de un régimen natural estacionario que se extiende hasta septiembre de 1960, debido a la disponibilidad de datos a partir de esa fecha.

Este enfoque permite comprender la dinámica del sistema y es esencial para la gestión sostenible del acuífero.

3. Construcción del modelo - Código utilizado

Para la construcción del modelo de flujo de la masa se ha utilizado la interfaz gráfica ModelMuse (Winston, 2009). La ecuación diferencial (1) del flujo de agua subterránea en medio poroso saturado se resuelve utilizando el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984). Estos programas se eligen por su robustez, rendimiento, versatilidad y por el hecho de que son de libre acceso.

El movimiento tridimensional del agua subterránea en un medio poroso saturado, anisótropo y heterogéneo en régimen transitorio se describe de manera matemática mediante la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde x , y , y z son las coordenadas que indican un sistema de ejes donde se referencian las componentes de la conductividad hidráulica K_x , K_y y K_z en unidades de longitud por unidad de tiempo (L/T), h es la altura piezométrica (L), S_s es el coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz (1/L), W es el flujo de agua por unidad de volumen, el cual representa los sumideros y las fuentes de agua (1/T) y t es el tiempo (T). MODFLOW resuelve la ecuación del flujo mediante el método numérico de diferencias finitas. Siempre que los ejes principales de anisotropía estén alineados con el sistema de coordenadas de análisis.

En el método de las diferencias finitas el sistema descrito de forma continua por la Ecuación 1, es sustituido por un número finito de puntos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por diferencias entre los valores de las variables en esos puntos. De esta manera MODFLOW realiza un balance hidrológico para cada celda y consigue calcular los valores de la altura piezométrica o caudal mediante el álgebra matricial y soluciones iterativas. Esto se traduce en la obtención de la altura piezométrica en función del espacio y del tiempo, es decir, $h = h(x, y, z, t)$ y los balances de flujo para cada celda.

En MODFLOW las capas del modelo pueden ser tratadas como libres, confinadas o una combinación de éstas. Se pueden simular acciones del exterior como pozos de bombeo, recarga,

drenajes, ríos, etc. También es posible calcular balances hídricos de subzonas dentro del espacio total del entorno de estudio gracias al programa ZONEBUDGET.

ModelMuse permite al usuario introducir de forma amigable los datos de entrada para los modelos mediante objetos (puntos, líneas o polígonos). Además, los objetos son usados para especificar valores de información espacial independientemente de la discretización espacial y temporal que se haya definido previamente, por tanto, la malla y periodos de simulación pueden ser cambiados sin volver a especificar información relativa a la estructura hidrogeológica y a las condiciones de contorno, lo que supone una enorme ventaja para el modelador. Se pueden importar datos desde una variedad de fuentes, como por ejemplo en este caso, a partir de *shapefiles* creados mediante la herramienta de información geográfica QGIS.

4. Implementación del modelo

En esta sección se describe el proceso seguido para implementar el modelo numérico de la masa de agua subterránea de Jumilla-Yecla-Castellar mediante la interfaz ModelMuse. Se utilizaron diferentes tipos de archivos para la introducción de los datos. Archivos de Excel (xlsx), que se utilizaron para describir tablas de datos; archivos Shape (shp), que se utilizaron para introducir geometrías a partir de sistemas de información geográfica; y archivos ráster, que asignan un valor a cada celda que representa información real.

4.1 Discretización horizontal

La masa de Jumilla-Yecla-Castellar ha sido modelada horizontalmente mediante celdas con una resolución constante de 200 m x 200 m, lo que ha dado lugar a un mallado de 187 filas y 116 columnas, con un total de 21,692 celdas por capa, de las cuales 8980 son activas. Las coordenadas EPSG:25830-ETRS89/ UTM (HUSO 30S) del vértice noroeste del modelo constituyen el origen para la definición del modelo numérico. En la Tabla 4 se pueden consultar las coordenadas máximas y mínimas.

X min; Ymin	Xmax; Ymax	Filas/Columnas	Tamaño de Celda
645300; 4256900	682700; 4280100	187/116	200m x 200m

Tabla 4: Datos en relación con la discretización horizontal del modelo de la masa Jumilla-Yecla-Castellar.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 28 se muestra el mallado horizontal del modelo. En la primera imagen se representan todas las celdas y en la segunda imagen solo las celdas activas, identificadas en azul, mientras

que las inactivas aparecen en gris. Cabe destacar que se ha utilizado la misma discretización para todas las capas del modelo.

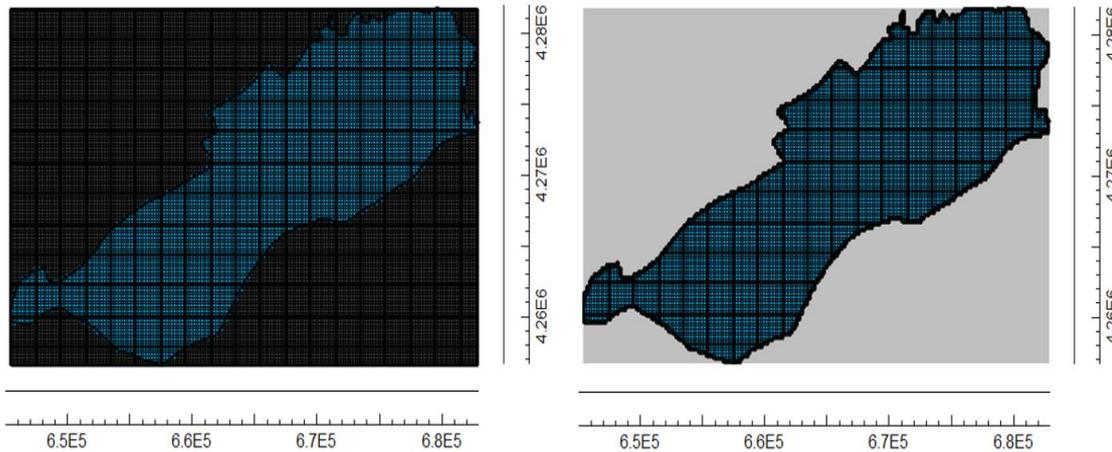


Figura 28: Dominio y vista en planta de la malla generada. Fuente: elaboración propia.

4.2 Discretización vertical

Como se ha dicho más arriba, la discretización vertical de este sistema consta de tres capas acuíferas que descansan sobre la capa impermeable constituida por facies del Keuper. De arriba hacia abajo dichas capas son:

- Capa 1: Materiales Cretácico Superior e inferior
- Capa 2: Materiales de la base Cretácico inferior
- Capa 3: Materiales de la edad Jurásica

Para introducir las capas mencionadas ha sido necesario la definición de las siguientes superficies:

- Techo del modelo: a partir de la topografía del terreno;
- Base del acuífero superior,
- Base del acuífero medio,
- Base del acuífero inferior.

Toda esta información se ha extraído del modelo IGME-DPA (2009). Se trata de mapas de líneas isohipsas (ITGE, 1993) realizados a partir de la interpretación de datos geofísicos, concretamente, perfiles eléctricos verticales obtenidos de ITGE (1992), y de sondeos mecánicos.

La primera capa se considera como convertible, es decir, dependiendo de si el nivel piezométrico del agua es inferior o superior al límite del techo del estrato será libre o confinada. En este caso siempre será libre. Las otras dos capas son configuradas como confinadas, la segunda es un acuitardo y la tercera está confinada.

Todo ello da como resultado un modelo de tres capas con un espesor variable definido para toda la superficie del modelo. En la Figura 29 muestra el techo de la primera capa correspondiente a la superficie del terreno y las celdas activas en azul y en ambos cortes pueden diferenciarse las capas.

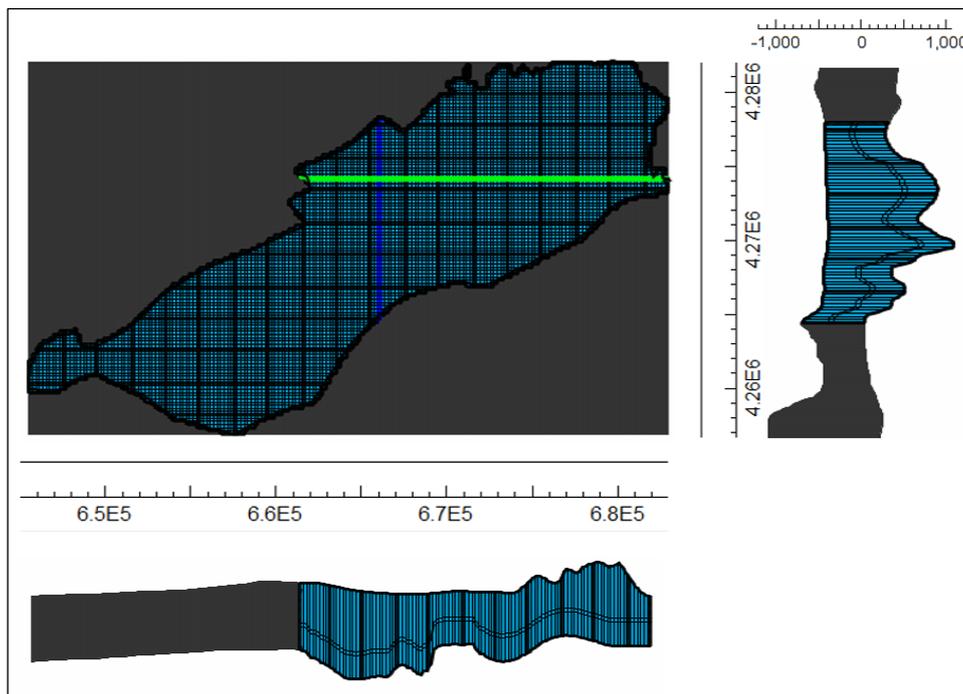


Figura 29: Discretización vertical del modelo de Jumilla-Yecla-Castellar. Fuente: elaboración propia.

4.3 Discretización temporal

En este estudio se ha adoptado una discretización temporal mensual, abarcando un total de 81 años hidrológicos. El periodo de estudio se extiende desde octubre de 1940 hasta septiembre de 2021, dividiéndose en dos tramos según el estado del acuífero:

- ✓ El primer periodo, que abarca desde el año hidrológico 1940/1941 hasta el 1959/1960, representa el régimen no influenciado, asumiendo que el medio ambiente no ha sido significativamente afectado por la actividad humana.

4.5 Asignación preliminar de parámetros hidráulicos

Para la simulación del modelo es necesario asignar una serie de parámetros hidráulicos a las celdas. Estos parámetros son la conductividad hidráulica (K_x , K_y y K_z), el rendimiento específico (S_y) y el coeficiente de almacenamiento (S_s). Nos ayudan a entender cómo el agua subterránea se comporta en el acuífero y son cruciales para modelar su flujo. Los valores de K_x , K_y y K_z indican la capacidad del acuífero para permitir el paso del agua, mientras que el S_y mide la cantidad de agua que se puede almacenar y liberar por unidad de cambio en la carga hidráulica. Por último, el S_s muestra la capacidad del acuífero para almacenar y liberar agua por unidad de volumen. Estos valores se obtienen mediante pruebas de bombeo o datos de literatura.

Según IGME (2009), la conexión entre los dominios varía en todo el acuífero. Para introducir los parámetros hidrogeológicos se han considerado 5 zonas: 3 en la capa superior, 1 en la capa intermedia y 1 en la capa inferior como se muestra en la Tabla 5.

Dominio		K_{ij} (m/s)	$S_s(\text{conf})$ (-)	S_y (no conf) (-)
Cretácico Superior	Villena	2E-04	0.06	0.06
	Yecla	5E-05	0.015	0.024
	Jumilla	3E-05	0.015	0.005
Base del Cretácico Inferior		1E-06	1E-05	0.01
Jurásico		5E-05	1E-05	0.01

Tabla 5 : Parámetros hidráulicos calibrados en el modelo IGME (2009). Fuente: extraído de IGME (2009).

En el caso del modelo del IGME (2021), se ha considerado una sola zona por cada capa, siendo los parámetros calibrados los que se ven en la Tabla 6.

Dominio	k_{ij} (m/d)	S_s (1/m)	S_y (1/m)
Villena	3	0.00001	0.027
Yecla	7	0.0001	0.05
Jumilla	2	0.00001	0.02

Tabla 6 : Parámetros hidráulicos calibrados en el modelo IGME (2021). Fuente: extraído de IGME (2021).

Los parámetros mostrados para los modelos de los años 2009 y 2021 han sido calibrados para una recarga total que es casi cuatro veces mayor que la considerada en nuestro modelo. Por lo tanto, no son aptos para el nuevo modelo. Para seleccionar los nuevos parámetros se ha revisado

la bibliografía en busca de parámetros hidrológicos adecuados, tomando en cuenta el tipo de material presente en las distintas zonas. La Tabla 7 muestra el rango establecido para los parámetros de conductividad hidráulica (K_{ij}), capacidad de almacenamiento (S_s) y rendimiento específico (S_y).

Dominio		K_{ij} (m/s)	$S_s(\text{conf})$ (-)	$S_y(\text{no conf})$ (-)
Cretácico Superior	Villena	0.1-1000	1×10^{-5} - 6×10^{-2}	0-0.2
	Yecla	0.1-1000	1×10^{-5} - 6×10^{-2}	0-0.2
	Jumilla	0.1-1000	1×10^{-5} - 6×10^{-2}	0-0.2
Base del Cretácico Inferior		0.00001-0.1	1×10^{-5} - 1×10^{-2}	0.02-0.35
Jurásico		0.1-1000	1×10^{-5} - 6×10^{-2}	0-0.2

Tabla 7 : Rango de parámetros hidráulicos. Fuente: elaboración propia con datos de Custodio, E. et al. (1983), Freeze, R.A., et al. (1979).

Además, también tomamos en cuenta la conductancia de los manantiales, así como las conductividades hidráulicas de las barreras de flujo que representan las fallas que obstaculizan el paso del flujo horizontal.

4.6 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en un modelo de flujo de agua subterránea se refieren a las interacciones entre la masa de agua, descritas como flujos que entran y/o salen del modelo, y el medio exterior, actuando como límites físicos que afectan el movimiento del agua. Estas interacciones pueden comprender límites laterales, extracciones de agua subterránea mediante bombeos, cauces superficiales, drenajes, recarga por precipitación y retornos de riego. Es importante tener en cuenta que estas condiciones pueden influir en la calidad y cantidad del agua disponible en un acuífero.

En un modelo de flujo de agua subterránea se pueden distinguir tres tipos de condiciones de contorno que representan estas interacciones con el entorno:

1. Condición de Dirichlet: es una condición en la que la altura en un contorno es fija y conocida en el tiempo. Esta condición se emplea para representar la presencia de pozos, manantiales, ríos u otros cuerpos de agua superficiales que interactúan con el agua subterránea.

2. Condición de Neumann: implica un flujo prescrito y conocido que se aplica a través de una frontera del modelo. Esta condición se utiliza para representar situaciones como barreras impermeables, infiltración de recarga por precipitación o retornos de riego, y extracción de agua mediante bombeos desde la superficie del suelo.
3. Condición de Cauchy o mixta: es una combinación de las condiciones de Dirichlet y Neumann, en la cual la altura piezométrica tiene una influencia directa en el flujo de agua subterránea. Esta condición se utiliza para representar la interacción entre el agua subterránea y los cuerpos de agua superficiales, como drenajes, ríos y límites con otras masas de agua adyacentes.

Estos factores se incluyen al modelo mediante los paquetes específicos de MODFLOW, los cuales brindan información al modelo matemático acerca de la interacción entre el sistema analizado y el medio exterior.

4.6.1 Paquete de Barrera

Para la introducción de la falla geográfica ubicada en la zona de Yecla, utilizamos el paquete HFB (Horizontal Flow Barrier). Este paquete nos permite definir barreras al flujo horizontal, ya sean artificiales o naturales, que restringen o limitan el flujo de agua, y poseen propiedades hidráulicas específicas, como la conductividad hidráulica, que tiene un valor muy bajo con el fin de reproducir comportamientos diferentes en las zonas separadas, y la base de la barrera, que es de una celda (200 m).

4.6.2 Paquete de recarga

Se ha utilizado el paquete RCH (Recharge) para incorporar la recarga por la infiltración de agua proveniente de la precipitación o los retornos de riego en la zona del acuífero en unidades de metros por día (m/d). Este procedimiento de ingreso de datos es igual para ambos casos, donde se definen zonas específicas para la recarga de lluvia y la recarga de retornos de riego, dentro de las cuales las tasas de recarga son homogéneas. MODFLOW multiplica la tasa de recarga de cada área por la superficie de cada celda que se encuentre bajo su influencia, para obtener el flujo total de recarga. En nuestro modelo, se ha asignado la recarga a la capa superior o superficial del acuífero.

4.6.3 Paquete de pozos

Para la implementación de las extracciones de agua subterránea a través de pozos de bombeo en el modelo, se utiliza el paquete WEL (Well). En este paquete, es necesario definir la ubicación, profundidad, tipo de pozo y la tasa de extracción (m^3/d) para un periodo determinado.

Para introducir los pozos se crearon capas mediante la herramienta de información geográfica QGIS, conteniendo información sobre el nombre de cada pozo, sus coordenadas UTM, el tipo de pozo y la tasa de extracción (m^3/d).

4.6.4 Paquete de drenes

Para la simulación de manantiales se utiliza el paquete DRN (Drain), el cual considera únicamente flujos de salida del acuífero. La ubicación de los drenajes y sus cotas se obtuvieron a partir del estudio "Encomienda de gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el inventario de recursos hídricos subterráneos y con la caracterización de acuíferos con continuidad hidrogeológica entre demarcaciones hidrográficas. Jumilla-Yecla-Castellar" del año 2021. Para definir un dren en MODFLOW se requiere la cota de referencia del drenaje y la conductancia de los materiales del dren.

En la Tabla 8 se muestra la posición del manantial y los valores preliminares de cota de surgencia y conductancia asignados.

Código	UTM X	UTM Y	Cota (m.s.n.m)	Conductancia (m^2/d)
M-1	651759	4260707	598	10000
M-2	652757	4260373	600	10000
M-3	654805	4259941	605	10000
M-El Chopo	682188	4277566	499	10000

Tabla 8: Parámetros de configuración de los manantiales. Fuente: elaboración propia.

4.6.5 Paquete de observación de alturas piezométricas

El paquete HOB (Head Observation) de MODFLOW es una herramienta que permite la simulación de observaciones de niveles piezométricos en un modelo de flujo de agua subterránea. Con este paquete, se pueden definir la ubicación y los datos observados de los niveles de agua en pozos en diferentes periodos de tiempo. Esto facilita la comparación de los resultados del modelo con los

datos observados, lo que ayuda a calibrar y validar el mismo, así como a evaluar su precisión en la predicción del comportamiento del agua subterránea.

En este modelo, se cuentan con 8 puntos piezométricos ubicados en dos demarcaciones hidrográficas diferentes, 3 en la DHJ y 6 en la DHS, con registros desde el año 1963. Sin embargo, la falta de datos piezométricos anteriores a esta fecha hace imposible la identificación de alturas piezométricas correspondientes a un estado estacionario. Por lo tanto, el paquete HOB se emplea únicamente en el modelo de régimen influenciado.

4.7 Método de Solución

Para la resolución del modelo matemático se ha seleccionado el paquete GMG (Geometric Multigrid Package), un método que resuelve sistemas de ecuaciones lineales algebraicas mediante la aplicación de discretizaciones espaciales en múltiples niveles del modelo, lo que acelera la convergencia del proceso iterativo.

5. Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo

El proceso de calibración de un modelo busca ajustar los parámetros, las condiciones de contorno y las acciones exteriores para que los resultados se asemejen a los datos de campo. Sin embargo, en la mayoría de los casos solo se suelen modificar los valores de los parámetros hidrogeológicos. En este caso se modifican los valores de la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, el rendimiento específico, el espesor y la conductividad hidráulica de las barreras hidráulicas y la conductancia de los manantiales.

Por lo tanto, en este modelo, la calibración consiste en encontrar un conjunto de valores de los parámetros que hagan que los datos de salida del modelo concuerden con los datos reales, dentro de un margen de error preestablecido.

En un modelo de flujo, la variable a reproducir son las alturas piezométricas o los flujos de la red de drenaje. La calibración puede realizarse en régimen estacionario y/o transitorio, de forma manual o automática.

En este trabajo, se ha optado por realizar la calibración manual, lo que implica modificar los parámetros individualmente, uno a uno, y analizar el efecto resultante. Sin embargo, este método es lento y subjetivo, basado en el criterio del usuario. Los cambios realizados en los valores de los parámetros se han mantenido dentro de los rangos bibliográficos en todo momento.

5.1 La calibración en régimen no influenciado.

El modelo en régimen no influenciado intenta representar el sistema en condiciones naturales, donde no existe ninguna influencia humana (sin la presencia de bombeos y/o retornos de riego). Se trata de un estado en el que las entradas son equivalentes a las salidas y, por tanto, no hay variaciones de almacenamiento en el sistema.

Para ello, se ha optado por elegir el periodo entre los años hidrológicos 1940/41 y hasta el 1959/1960, ya que existen información para entradas corresponden a la recarga por infiltración de lluvia y no se presenta ningún tipo de bombeo. Las salidas al drenaje por los manantiales “El Chopo”, ubicado en el extremo nororiental del acuífero y res manantiales en el extremo suroccidental del acuífero (puntos M-1, M-2 y M-3, Figura 27). Al no disponer de datos piezométricos ni de caudales del manantial, el modelo no puede ser calibrado.

5.2 La calibración en régimen influenciado.

El proceso de calibración del modelo en régimen influenciado o transitorio ha buscado reproducir de manera correcta las alturas piezométricas del acuífero. Para ello, se han utilizado como base los valores observados durante los años de estudio con valores de entrada mensuales para cumplir con los objetivos del proyecto. La simulación ha abarcado un periodo de 60 años hidrológicos, desde octubre de 1960 hasta septiembre de 2021. Después de las primeras simulaciones, se ha identificado la necesidad de realizar una calibración más precisa para disminuir la incertidumbre.

Para calibrar las propiedades físicas del sistema de estudio, se han utilizado los datos conocidos, en este caso los del modelo IGME (2009), sobre las propiedades de los diferentes dominios y falla hidrológica del sistema. Sin embargo, como hemos utilizado una recarga total de casi la cuarta parte de dicho modelo, la conductividad hidráulica (K_{ij}), el almacenamiento específico (S_s) y el rendimiento específico (S_y) han tenido que modificarse. Por lo tanto, los valores originalmente asignados se han modificado en el modelo en régimen transitorio para reproducir correctamente los niveles observados.

Este proceso ha requerido una gran cantidad de simulaciones. A continuación, se muestran los parámetros hidrogeológicos calibrados en cada dominio (Tabla 9) y los parámetros hidrogeológicos calibrados en la falla de Yecla (Tabla 10). Los valores seleccionados además de calibrarse para reproducir la piezometría han sido elegidos dentro de los rangos correspondientes a los materiales según literatura consultada.

Dominio		Kij (m/d)	Ss (conf) (-)	Sy(no conf) (-)
Cretácico Superior	Villena	500	0.06	0.105
	Yecla	0.13	0.015	0.095
	Jumilla	0.71	0.015	0.061
Base del Cretácico Inferior		0.041	0.00001	0.05
Jurásico		0.5	0.00001	0.1

Tabla 9 : Resultados de la calibración: Dominios hidrogeológicos. Fuente: elaboración propia

Falla hidrológica	Espesor(m)	Conductividad Hidráulica (m/d)
Yecla	200	1.00E-08

Tabla 10 : Resultados de la calibración: Falla hidrológica. Fuente: elaboración propia

5.2.1 Análisis piezométrico

Para calibrar el modelo en régimen transitorio, se dispone de las alturas piezométricas observadas en 8 piezómetros distribuidos entre la DHJ (3) y la DHS (5). La localización de los piezómetros se puede observar en la Figura 31. El objetivo es entender cómo varían las alturas piezométricas en diferentes zonas del acuífero.

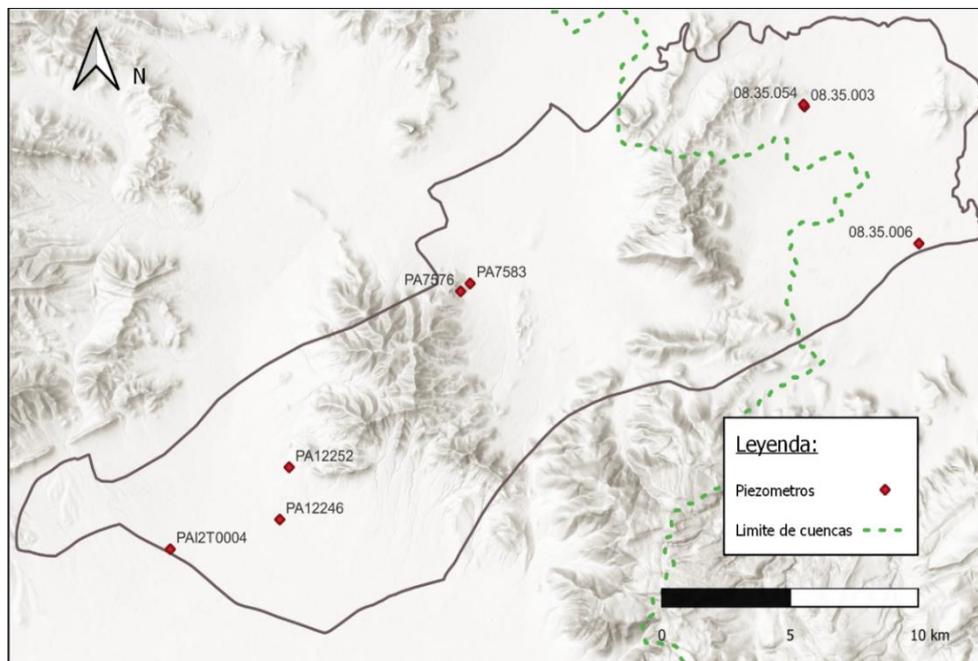


Figura 31: Localización de los piezómetros de control. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo puede reproducir con precisión la tendencia de las alturas del agua subterránea en la mayoría de los pozos de observación, Aunque en algunos

casos se observa una variación promedio de hasta 10.5 metros entre los valores simulados y observados.

A continuación, se presentan las comparaciones entre las alturas de agua subterránea observadas y simuladas para cada pozo de observación utilizado en el proceso de calibración.

En la zona de Jumilla, el piezómetro PA12252 muestra una serie que sigue la tendencia de los pozos de observación, aunque los valores absolutos no coinciden. La serie simulada muestra una diferencia de alrededor de 12 metros en comparación con la realidad. Esto puede ser debido a mediciones inexactas y la falta de suficientes datos observados. Esta diferencia se muestra claramente en la Figura 32, que ilustra la comparación entre las series simuladas y observadas.

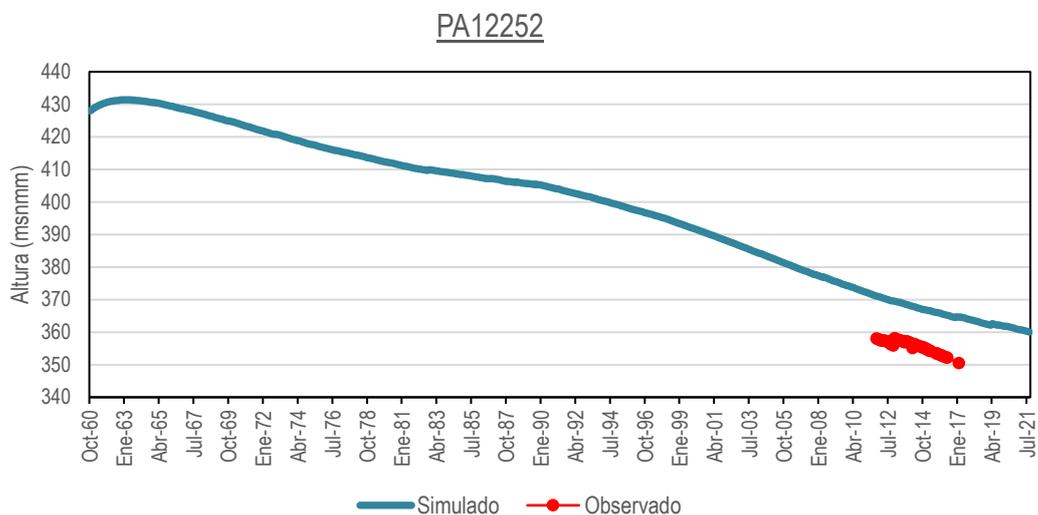


Figura 32: Calibración del piezómetro PA12252. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro PAI2T0004 muestra una serie que sigue la tendencia de las observaciones, pero la serie simulada tiene una diferencia promedio de aproximadamente 2.5 metros en comparación con datos observados. Sin embargo, se observa que la diferencia empieza a aumentar en el tramo final, como se muestra claramente en la Figura 33.

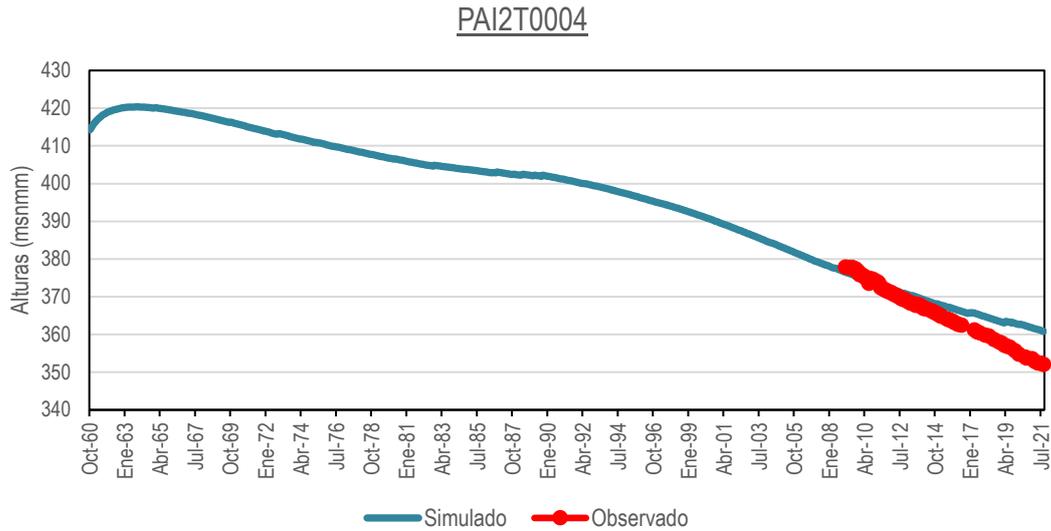


Figura 33: Calibración del piezómetro PAI2T0004. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro PA7583 ubicado en la zona en Yecla es el que mejor simula la tendencia de los pozos de observación, con una diferencia promedio de alrededor de 0.5 metros. Puede verse esta comparación en la Figura 34.

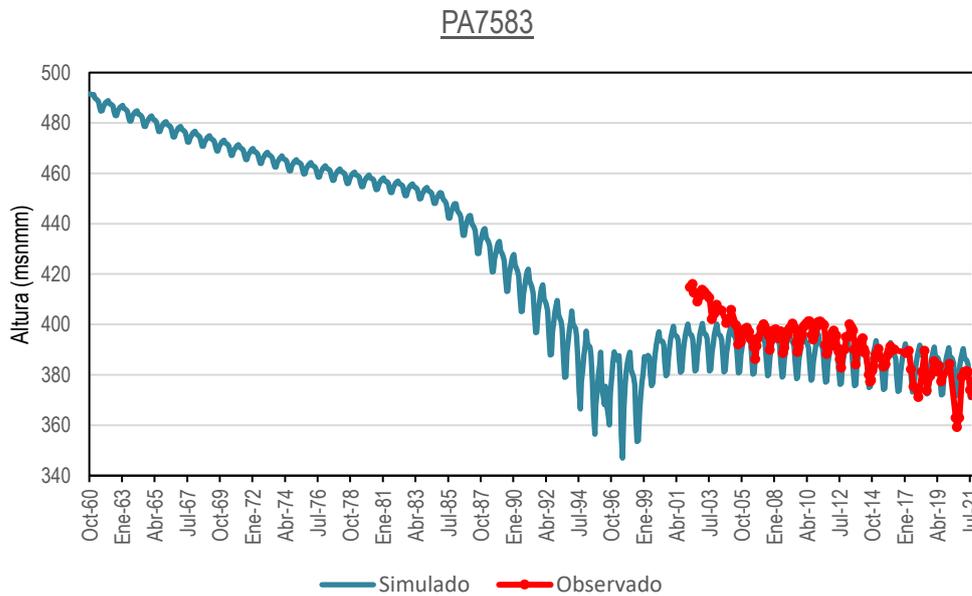


Figura 34: Calibración del piezómetro PA7576. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro PA12246 en la zona de Jumilla muestra una serie que sigue la tendencia de las observaciones, pero la serie simulada tiene una diferencia promedio de aproximadamente 7 metros en comparación con los valores observado (Figura 35).

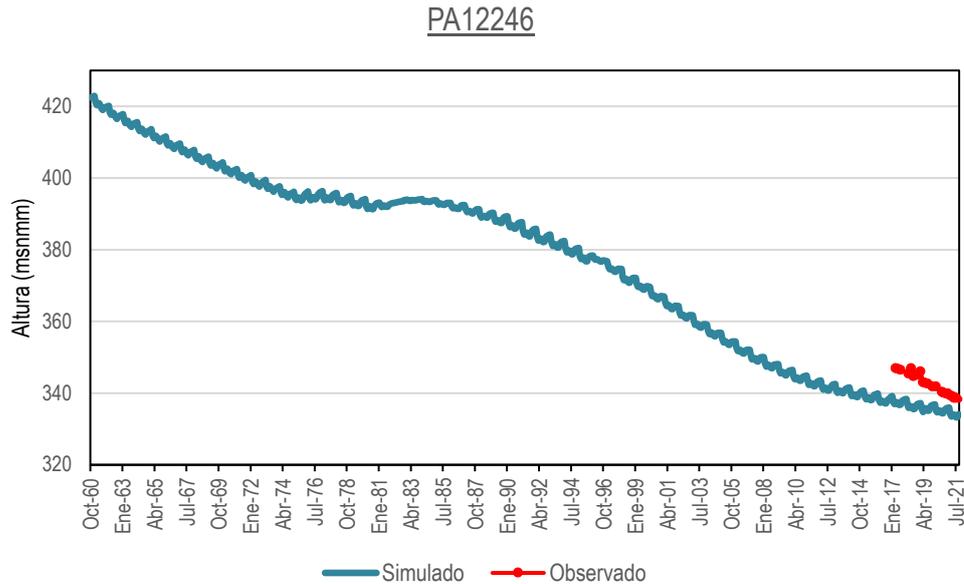


Figura 35: Calibración del piezómetro PA12246. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro PA7576 en Jumilla muestra una serie que sigue la tendencia de los pozos de observación, pero la serie simulada tiene una diferencia promedio de aproximadamente 11 metros en comparación con los valores reales medidos. Se puede observar que esta diferencia es mayor en el tramo inicial, lo cual se ve claramente en la Figura 36.

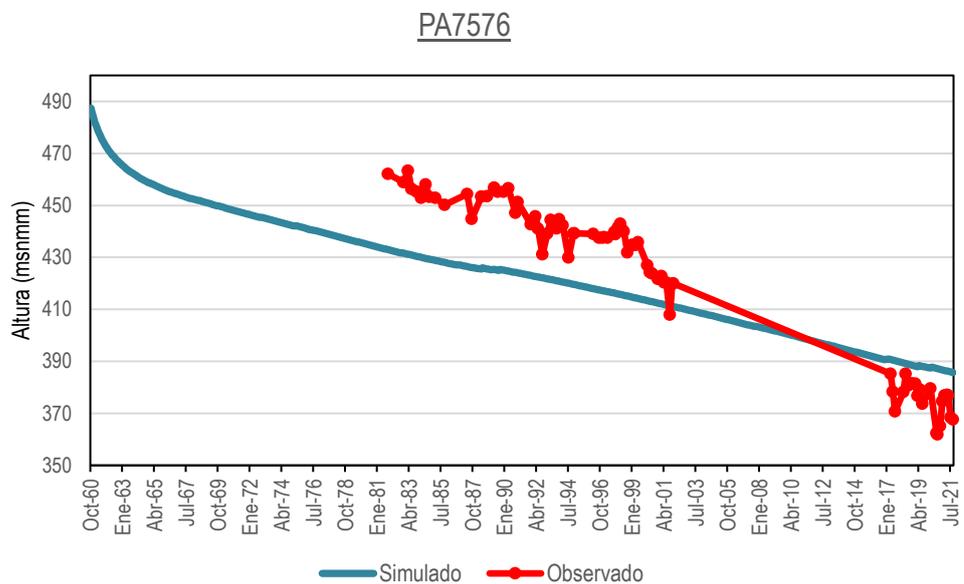


Figura 36: Calibración del piezómetro PA7576. Fuente: elaboración propia.

En la zona de Castellar, el piezómetro 08.35.003 presenta una serie que sigue la tendencia de las observaciones. Sin embargo, la serie simulada muestra una diferencia de aproximadamente 3 metros en comparación con los valores observados, como se ilustra en la Figura 37.

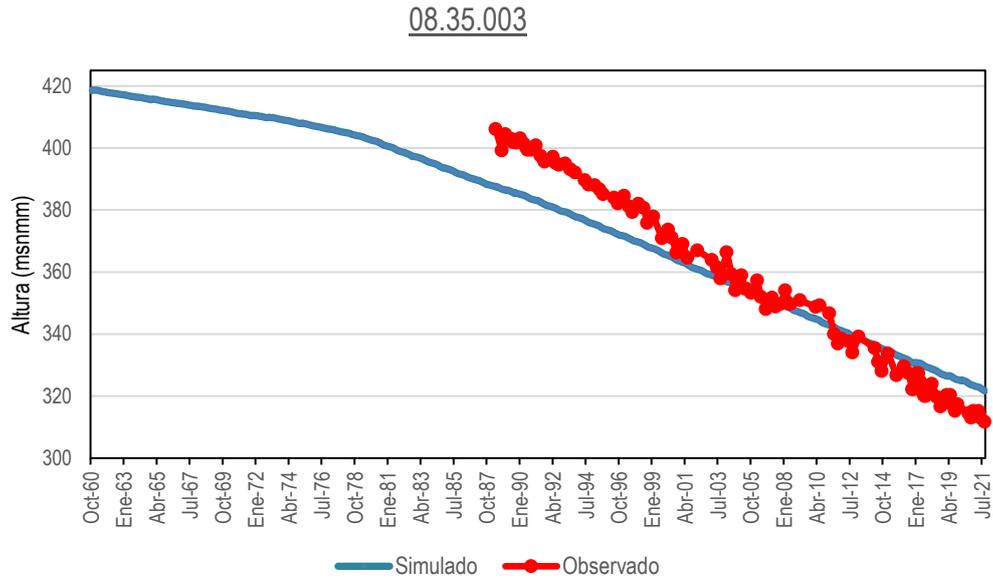


Figura 37: Calibración del piezómetro 08.035. 003.. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro 08.35.006 ubicado en la zona de Castellar tiene una serie que sigue la misma tendencia que los pozos de observación. Sin embargo, la serie simulada tiene una diferencia de alrededor de 7 metros en comparación con los valores reales. Esta diferencia comienza a aparecer en el tramo inicial, tal como se aprecia en la Figura 38.

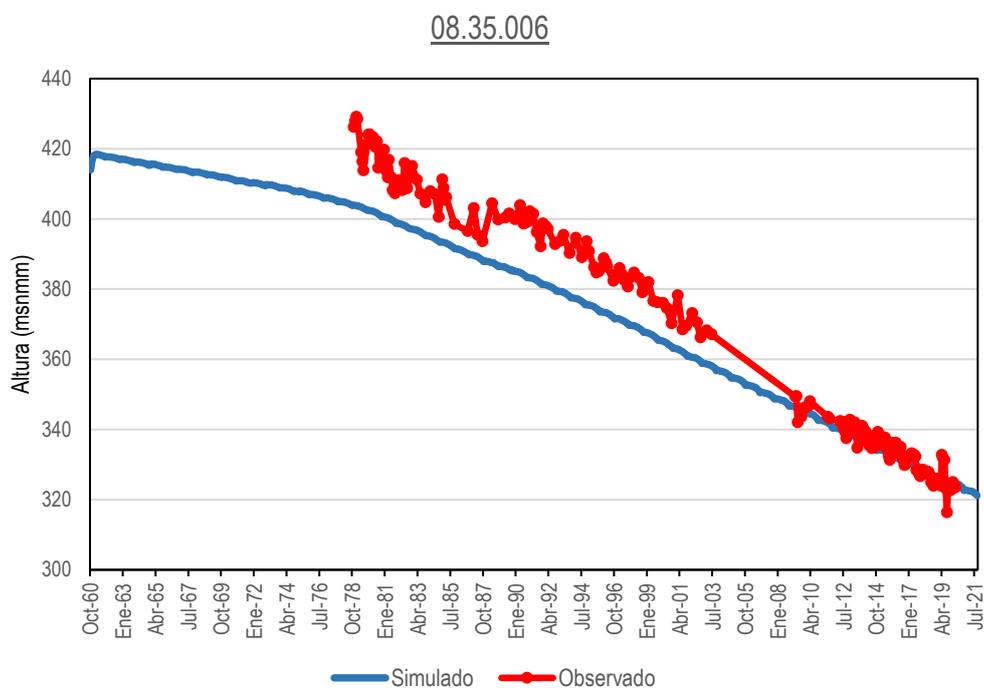


Figura 38: Calibración del piezómetro 08.035. 006. Fuente: elaboración propia.

El piezómetro 08.35.054 ubicado en la zona de Castellar tiene una serie que se aproxima a la tendencia de las observaciones. Sin embargo, la serie simulada tiene una diferencia de alrededor de 5 metros en comparación con la realidad. Esta diferencia aparece en el tramo final, tal como se aprecia en la Figura 39.

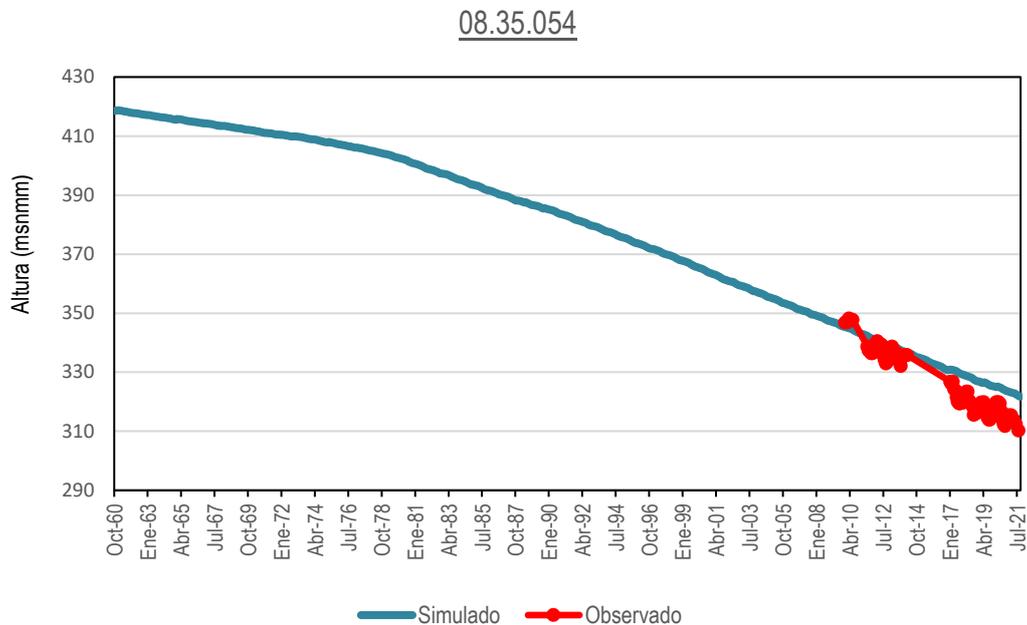


Figura 39: Calibración del piezómetro 08.035.054. Fuente: elaboración propia.

En el modelo podemos ver las alturas de los niveles de agua en tres capas diferentes del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar. Se ha observado que la disminución de los niveles de agua ha provocado que se sequen más celdas, lo que depende de la ubicación de las extracciones y la geometría interna de las capas. En la capa 1 (Figura 40), las alturas de los niveles de agua oscilan entre 220 m y 330 m, y se secan más celdas en la demarcación hidrográfica del Júcar que en la demarcación del Segura. En la capa 2 (Figura 41), las alturas de los niveles de agua oscilan entre 280 m y 330 m, mientras que en la capa 3 (Figura 42) van desde 310 m a 330 m, pero en estas capas no se han encontrado celdas secas.

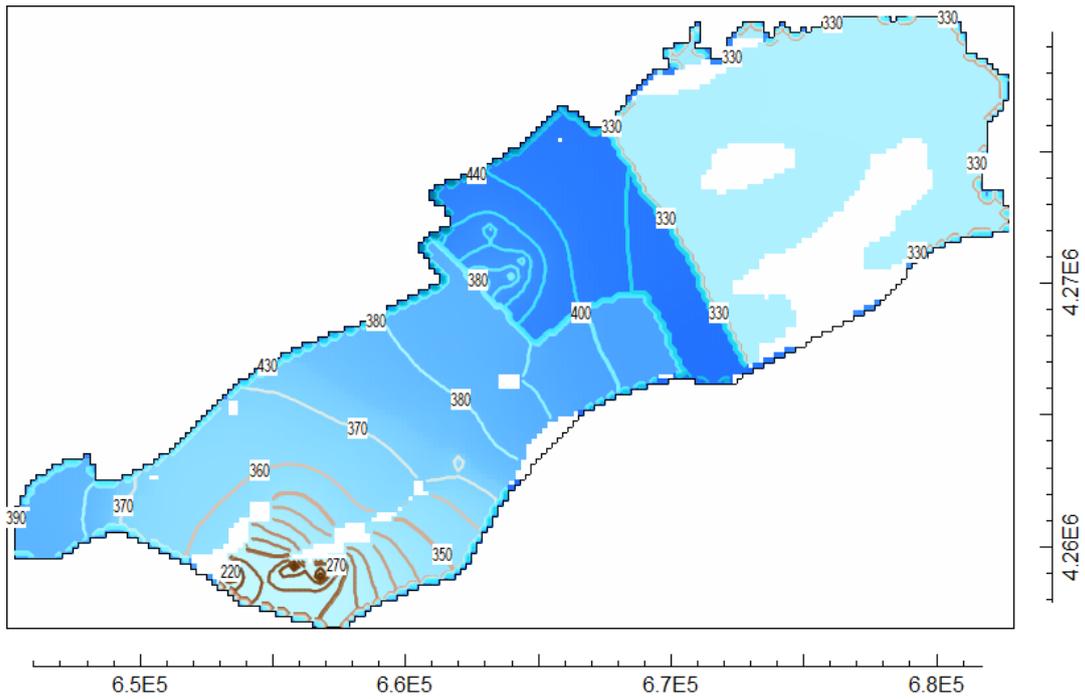


Figura 40: Mapa de isopiezas para la capa 1 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.

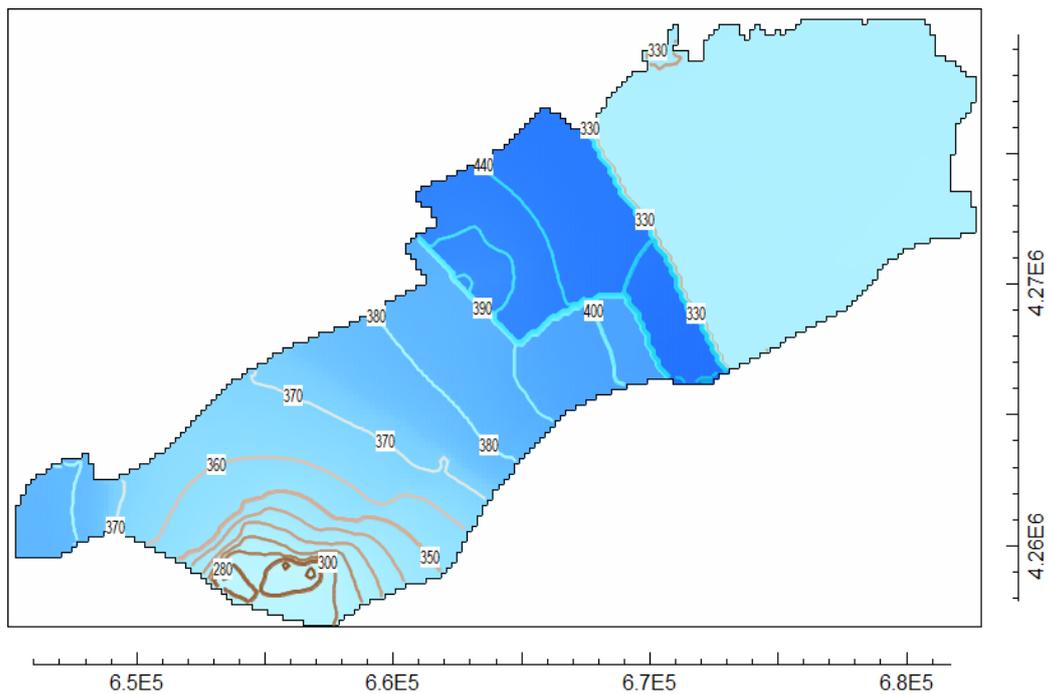


Figura 41: Mapa de isopiezas para la capa 2 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.

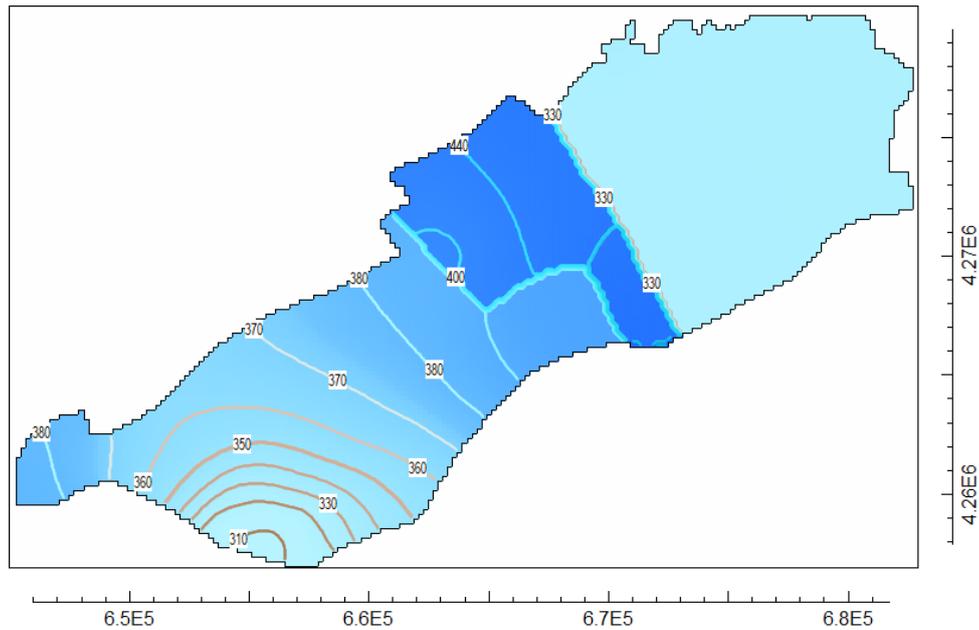


Figura 42: Mapa de isopiezas para la capa 3 en régimen transitorio. Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Análisis de la bondad de ajuste del modelo

Los valores simulados y observados de los ocho piezómetros de control son comparados calculando un valor residual medio. En la Figura 43 se pueden observar dichos residuos. Los círculos azules indican que los valores simulados son menores que los observados, mientras que los círculos rojos indican que los valores simulados son mayores. El diámetro de los círculos es proporcional al residuo.

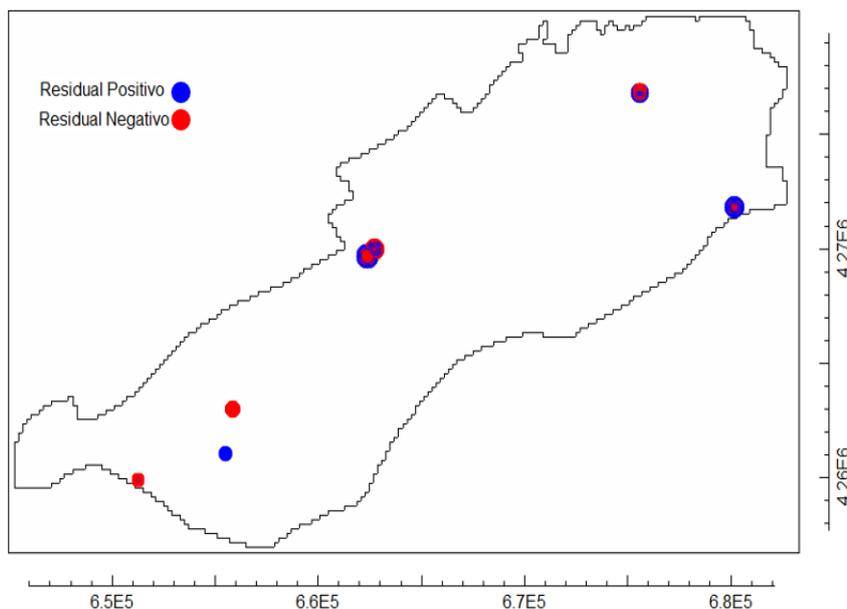


Figura 43: Mapa con la localización de los piezómetros de control y con los residuos. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 44, se han representados los valores observados vs. Los valores simulados en un diagrama de dispersión. La recta corresponde a la situación en que los registrado es igual a lo observado, es decir, cuando los residuos son nulos. La dispersión de los puntos alrededor de esta línea es una medida visual del ajuste realizado. Se nota que muchos puntos se agrupan cerca de la línea, lo que indica que la mayoría de los residuos tienen un valor inferior a 10 m. El resto de los puntos se agrupan de manera similar a la línea de 45 grados, dependiendo de su diferencia.

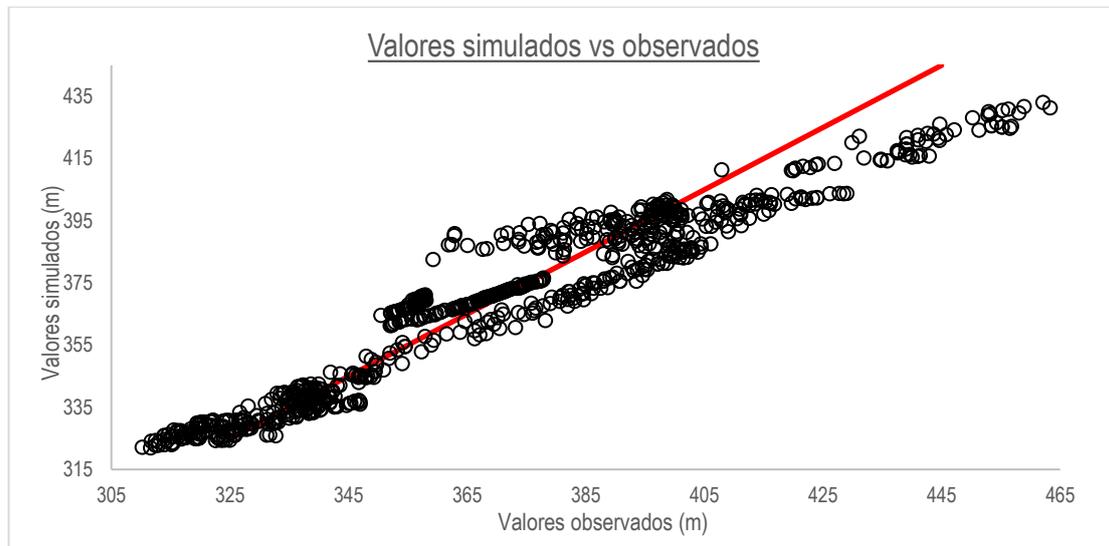


Figura 44: Alturas piezométricas observadas versus las simuladas en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

La Figura 45 muestra el histograma de los residuos. La distribución es bastante simétrica en un intervalo [-28;34.4].

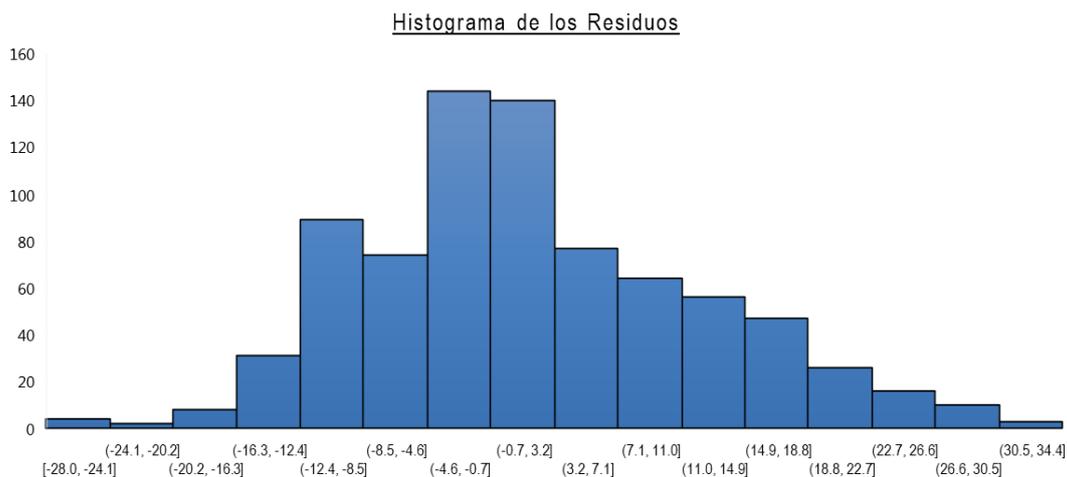


Figura 45: Histograma de residuos para todas las observaciones. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 11 se presentan algunos estadísticos que sumarían las características de los residuos derivados de la calibración. El residuo máximo es de 31.975 m y el mínimo de -27.995 m, con un promedio de 8.099 m. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtenida fue de 10.541 m

Se evaluó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual arrojó un valor de 0.965 indicando una relación lineal positiva aceptable entre los valores observados y los simulados. Asimismo, se analizó el índice de Nash-Sutcliffe, el cual alcanzó un valor de 0.903, lo que indica un muy buen ajuste.

Nº Pozos de Observación	8
Residual máximo	31.975
Residual mínimo	-27.995
Promedio Absoluto de los Residuos	8.099
coeficiente de correlación r2	0.965
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	10.541
Indicé de Nash-Sutcliffe	0.903

*Tabla 11 : Indicadores del análisis de la bondad de la calibración del modelo en régimen influenciado.
Fuente: elaboración propia.*

Por último, en la Tabla 12, se ha discriminado el cálculo del RMSE por zonas (Jumilla, Yecla y Castellar).

Zonas	Puntos de Control	Nº Datos	RMSE (m)
Castellar	3	398	9.43
Yecla	1	142	8.35
Jumilla	4	251	13.03

Tabla 12 : Indicadores estadístico RMSE por zonas. Fuente: elaboración propia

5.2.3 Balances de masa del sistema

Con el objetivo de entender cómo se distribuye el agua entre las demarcaciones hidrográficas, se ha llevado a cabo un análisis de balance de masas en el sistema de acuíferos. Se han realizado dos tipos de balances: uno global, que considera el sistema completo, y otro zonal, que se enfoca solo en la parte del acuífero que pertenece a cada demarcación. De esta manera, se puede determinar la cantidad de agua que se transfiere entre las demarcaciones.

5.2.3.1 Balance hídrico global

Se ha realizado un análisis del balance de agua en el acuífero Jumilla-Yecla-Castellar durante el período de 1960/1961 a 2020/2021. Los resultados indican que ha habido un cambio significativo en el nivel del agua a lo largo del tiempo. Se ha encontrado que la cantidad de agua que sale del acuífero es mayor que la que entra, lo que pone en evidencia que se están utilizando las reservas de agua subterránea almacenadas en el acuífero. La información media anual se encuentra en la Tabla 13.

	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Diferencias (hm ³ /año)
Recarga	4.93	0	4.93
Bombeos	0.00	40.43	-40.43
Total			-35.50

Tabla 13 : Resumen del balance de masa global para el modelo en régimen transitorio. Período 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 46 se muestra cómo ha evolucionado el modelo del acuífero Jumilla-Yecla-Castellar a lo largo del tiempo en régimen transitorio. Durante el periodo de 1978/1979 hasta 2000/2001, los bombeos aumentaron considerablemente. Sin embargo, a partir de 2000/2001 hasta 2020/2021, estos comenzaron a disminuir levemente. En dos periodos, 1987/1988 hasta 1988/1989 y 2016/2017 hasta 2019/2020, hubo una importante recarga de agua debido a episodios de lluvias, lo que aumentó el almacenamiento del acuífero.

A pesar de que los retornos de riego también contribuyen a la recarga, su aporte es pequeño en comparación con la lluvia. Asimismo, el almacenamiento del acuífero sigue el mismo patrón que los bombeos, de modo que en aquellos momentos en que se producen más extracciones de agua, el acuífero acumula menos agua.

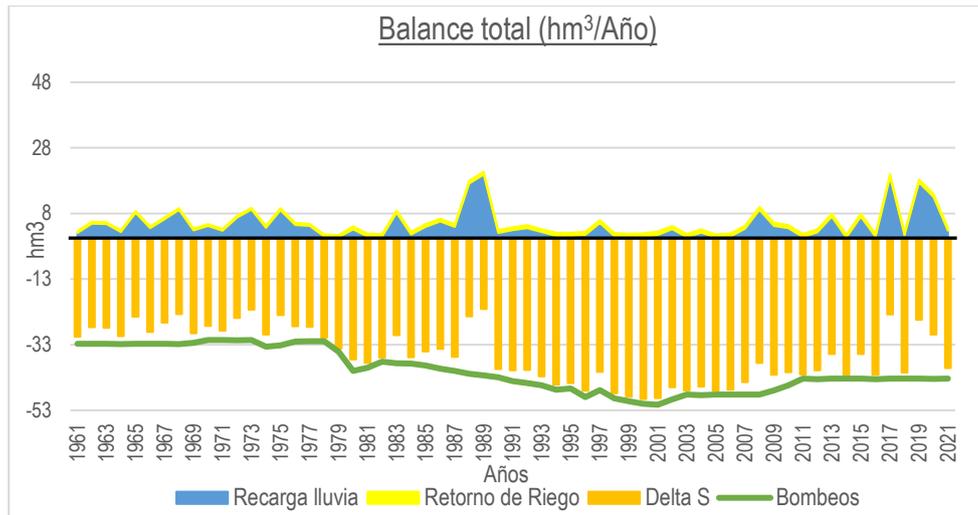


Figura 46: Evolución temporal de las componentes del balance global del modelo en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 47 se muestra cómo ha variado el almacenamiento del acuífero a lo largo de los 60 años simulados. Las barras verdes representan la cantidad de agua almacenada cada año, y la línea azul muestra la cantidad total acumulada a lo largo del tiempo. Se observa que el cambio en el almacenamiento no sigue un patrón definido y que hay años en los que se almacena más agua que otros. Solo en dos momentos, durante el periodo 1987/1988 hasta 1988/1989 y 2016/2017 hasta 2019/2020, el acuífero alcanzó niveles máximos debido al aumento en las precipitaciones. A lo largo del tiempo, el acuífero ha ido disminuyendo su almacenamiento debido a la gran cantidad de bombeos que se han producido en la zona, lo que lo ha dejado en un estado de explotación intensiva.

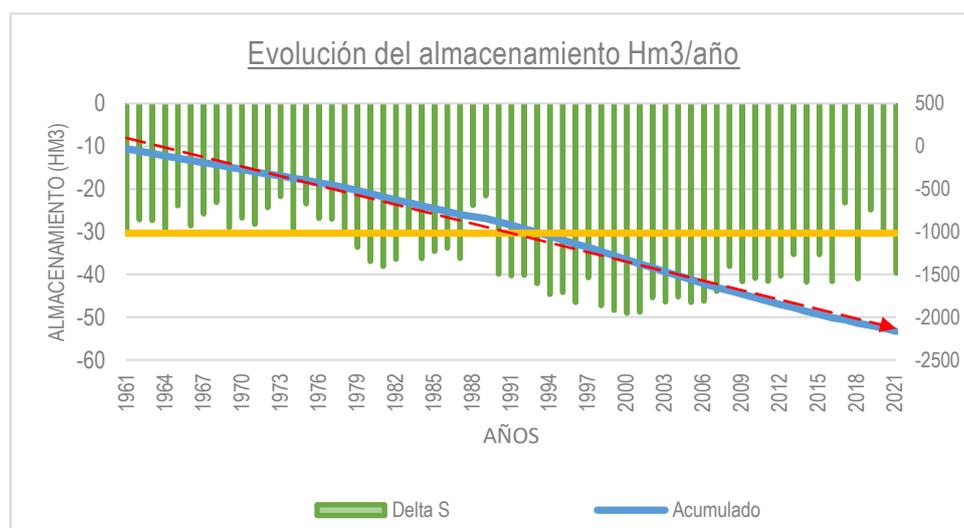


Figura 47: Evolución temporal del almacenamiento del acuífero en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

Durante el periodo comprendido entre 1960/1961 y 2020/2021, hemos contado con una distribución de entradas y salidas totales al acuífero que se puede apreciar en la Figura 48. En promedio, se ha registrado una diferencia de 124 m³ por año.

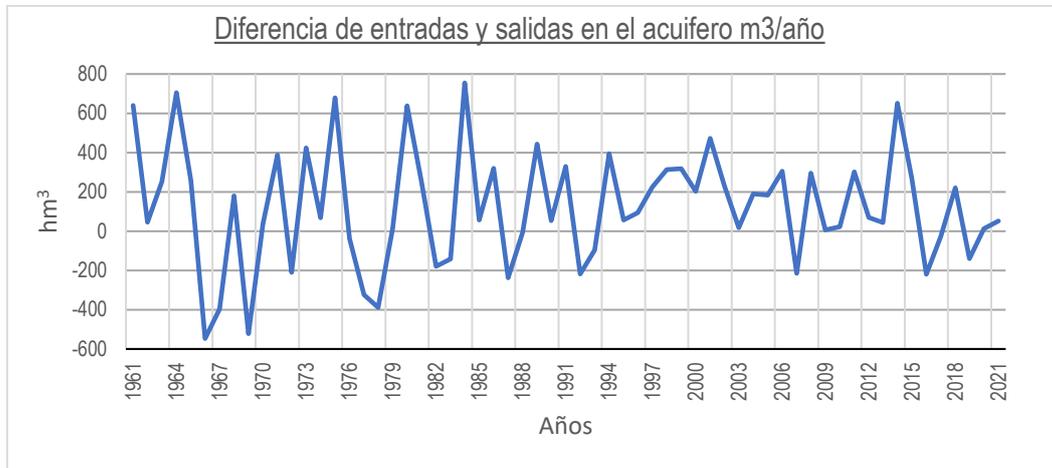


Figura 48: Evolución temporal de las entradas y salidas totales el acuífero en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

5.2.3.2 Balance hídrico por demarcación hidrográfica.

El balance parcial se lleva a cabo para observar cómo se transfieren los flujos entre las zonas que conforman las demarcaciones hidrográficas del Júcar y el Segura. En la Figura 49 se pueden ver estas zonas.

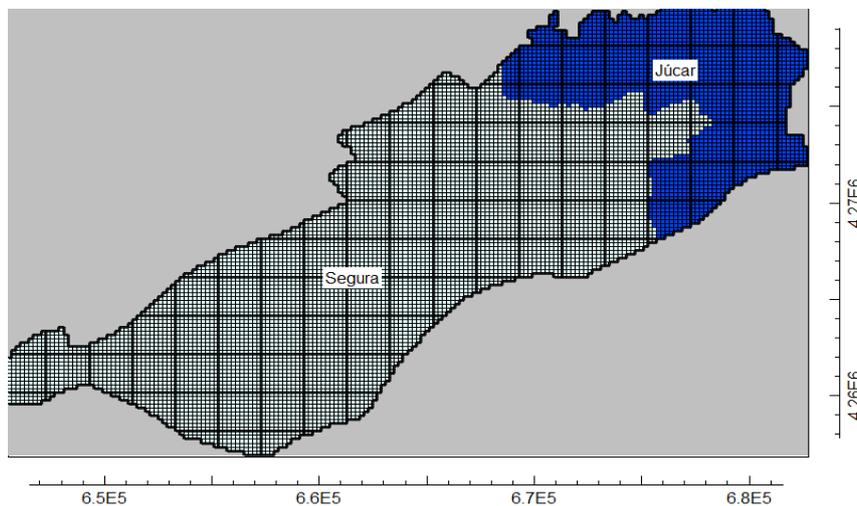


Figura 49: Áreas correspondientes a cada demarcación en el modelo global. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 14 se muestra el balance por zonas para el modelo influenciado. En la DHS se registra una recarga de 2.83 hm³ por año y unos bombeos de 18.55 hm³ por año. Además, se observa una transferencia de 7.22 hm³ por año hacia la DHJ. Por otro lado, en la DHJ, hay una recarga de 2.1

hm³ por año y unos bombeos de 21.88 hm³ por año. Lógicamente se aprecia la entrada de 7.22 hm³ por año desde la DHS.

Zona: DHS	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Diferencias (hm ³ /año)	Afección
Recarga	2.83	0	2.83	
Bombeos	0.00	18.55	-18.55	
DHJ a DHS	1.39	8.62	-7.22	Salidas
Total (Almacenamiento)			-22.94	
Zona: DHJ	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	Diferencias (hm ³ /año)	Afección
Recarga	2.10	0	2.10	
Bombeos	0.00	21.88	-21.88	
DHS a DHJ	8.62	1.39	7.22	Entradas
Total (Almacenamiento)			-12.56	

Tabla 14 : Resumen del balance de masa parcial por demarcaciones en régimen transitorio. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

En el análisis de las transferencias entre las dos demarcaciones, se ha observado que el flujo va en dirección a la DHJ y en el balance final muestra que es la ganadora en el periodo simulado, con una transferencia promedio de 7.22 hm³/año. La evolución de estas transferencias se puede apreciar en la Figura 49Figura 50.

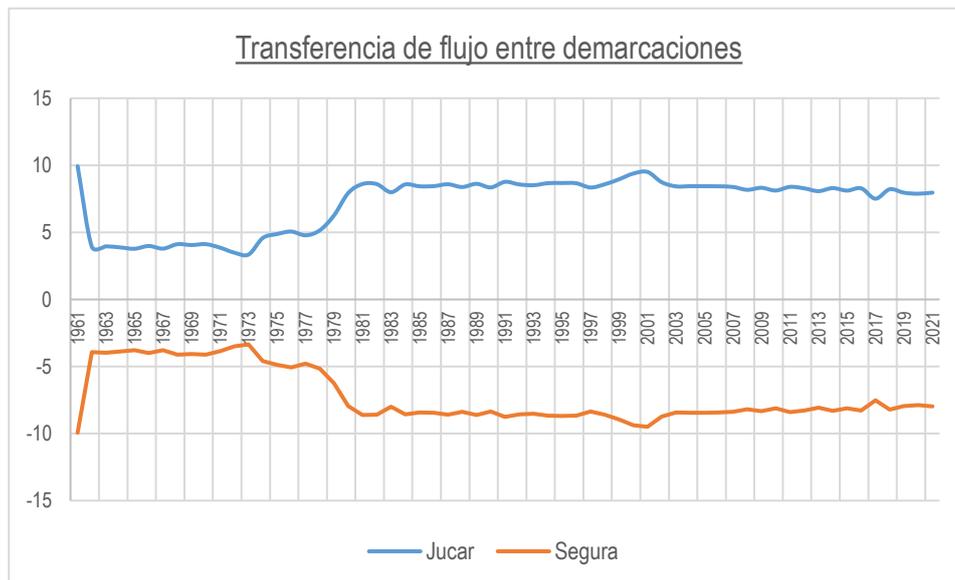


Figura 50: Evolución de las transferencias de flujo entre DHJ y DHS. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

La demarcación hidrográfica del Segura ha tenido distribución de entradas y salidas totales con una diferencia promedio de 118.14 m³ por año durante el periodo de 1960/1961 a 2020/2021, tal como se puede ver en la Figura 51

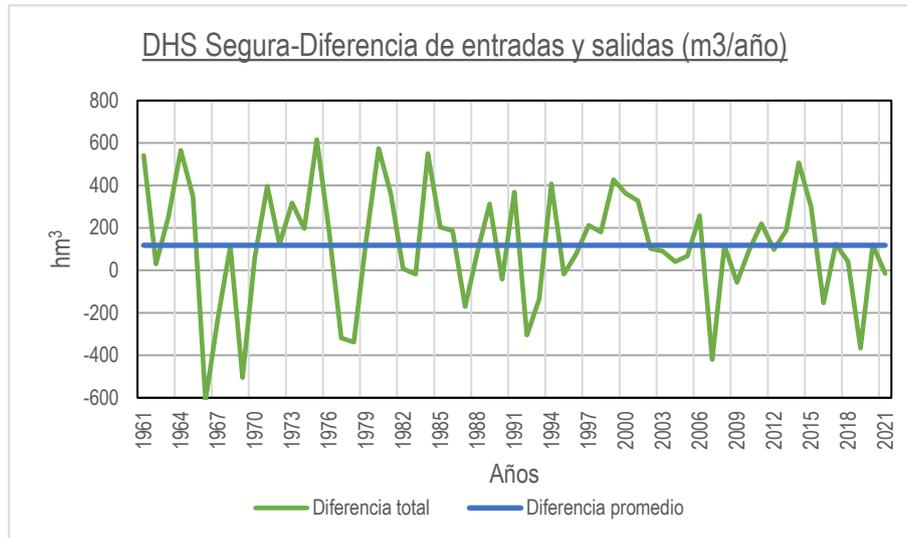


Figura 51: Evolución temporal de las entradas y salidas totales al acuífero en la Demarcación hidrográfica del Segura. Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

En comparación con la demarcación hidrográfica del Segura, la distribución de entradas y salidas totales es mucho menor con una diferencia promedio de 5.91 m³ por año en la demarcación hidrográfica del Júcar durante el periodo de 1960/1961 a 2020/2021, lo cual se muestra en la Figura 52.

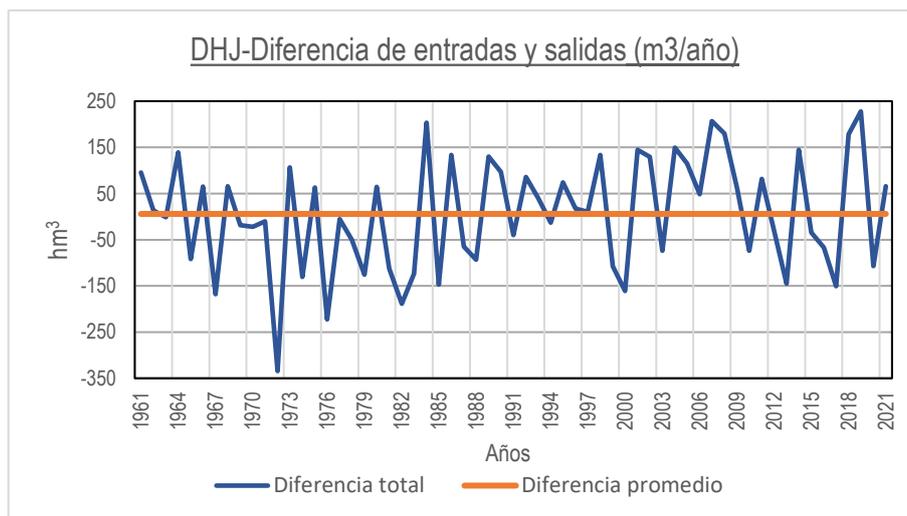


Figura 52: Evolución temporal de las entradas y salidas totales al acuífero en la Demarcación hidrográfica del Júcar Periodo 1960/1961-2020/2021. Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones

El objetivo de este estudio ha sido la construcción de un modelo de flujo de agua subterránea de la masa de Jumilla-Yecla-Castellar utilizando el código MODFLOW bajo la interfaz gráfica de usuario ModelMuse. Se revisaron los antecedentes y dos modelos previos a cargo del IGME y de la DPA de los años 2009 y 2021.

Se planteó inicialmente un modelo en régimen no influenciado en el cual la única entrada a la masa es la recarga por infiltración del agua de precipitación y la salida el manantial El Chopo en el extremo nororiental del acuífero y tres manantiales en el extremo suroccidental del acuífero. Sin embargo, al no disponer de datos ni de piezometría ni de caudales aforados en los manantiales, no fue posible calibrar el modelo.

El modelo en régimen influenciado indicó que el volumen de agua extraído del acuífero ha aumentado progresivamente desde 1960/61 hasta 2020/21, con un promedio anual de 40.43 hm³. Esto se debe principalmente a un cambio de uso de la tierra y a la expansión de las superficies de regadío. Como resultado, se ha observado un descenso en las alturas piezométricas, especialmente en la capa superior y en la zona de Castellar. Además, la recarga de agua al acuífero es muy pequeña en comparación con las extracciones, con un valor total de 4.93 hm³/año. De este valor, la recarga por precipitaciones representa un valor de 4.06 hm³/año y una recarga por retornos de riego de 0.86 hm³/año. En consecuencia, el acuífero Jumilla-Yecla-Castellar se encuentra en mal estado cuantitativo.

Además, se observó una interacción entre las zonas correspondientes a ambas demarcaciones. Se ha visto que la DHJ es ganadora en el régimen influenciado, con una transferencia promedio de 7.22 hm³/año desde la CHS. Esto se debe a que las alturas piezométricas son más altas en la zona de Yecla, que pertenece a la CHS.

7. Líneas futuras

De acuerdo con este trabajo se proponen diversas líneas de investigación para mejorar el funcionamiento del modelo.

La incorporación de piezómetros adicionales en las zonas más críticas para obtener más datos y así poder realizar una mejor evaluación del comportamiento del acuífero. Actualmente, los datos disponibles son bastante reducidos, por lo que se hace necesario aumentar el número de puntos de observación.

Además, se sugiere evaluar el volumen de explotaciones máximas permitidas por demarcación con el objetivo de alcanzar el buen estado cuantitativo de la masa y gestionar posibles soluciones para recuperar el acuífero más afectado en la zona de Castellar. Para ello, se tendrán en cuenta los datos recopilados mediante los piezómetros y se analizará la información hidrogeológica disponible.

Otra de las propuestas es realizar una caracterización hidrogeológica más detallada del dominio Jumilla para una mejor calibración del modelo. Con esta información se podrán identificar las zonas de mayor interés hidrogeológico y ajustar las simulaciones del modelo hidrogeológico.

Por último, se propone evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos y manantiales que actualmente se encuentran secos. Esta evaluación permitirá identificar las zonas más vulnerables y establecer medidas de gestión adecuadas para garantizar un uso sostenible de los recursos hídricos en el futuro.

8. Referencias Bibliográficas

Calvo-Rubio, F. C. (2011, febrero). Las aguas subterráneas en la demarcación del Segura. Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2027-Masa De Agua Subterránea 070.023 Jumilla-Villena Segura.

Confederación hidrográfica del Segura. (2015). Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015-Masa De Agua Subterránea 070.023 Jumilla-Yecla (P. 53).

Confederación hidrográfica del Segura. (2015b). Plan Hidrológico De La Demarcación Del Segura 2015/21-Anejo 3. Usos Y Demandas (P. 322).

Confederación hidrográfica del Segura. (2021). Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2027 -MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 070.023 Jumilla-Villena Segura (p. 47).

El Instituto Geológico Y Minero De España & La Excm. Diputación Provincial De Alicante. (2006). Estudio del funcionamiento hidrogeológico y simulación numérica del flujo subterráneo en los acuíferos carbonatados de Solana y Jumilla-Villena (Alicante y Murcia).pdf (p. 215).

EQUIPO TÉCNICO EVREN. (2020). Cartografía territorial de los suelos críticos para la recarga de acuíferos en la Comunidad Valenciana (castellano).pdf (p. 106). Ordenación del Territorio y Paisaje.

Gil Tomás, Alberto. (2015). Estudio de la explotación de aguas subterráneas en dos masas de agua de la demarcación del Segura [Universidad Politècnica de València].

Hernández, D. L. R., Mejuto, D. M. F., & Benítez, D. A. P. (2011). Adaptación Del Modelo Numérico De Simulación Del Flujo En Los Embalses Subterráneos De Jumilla-Villena Y Vega Baja Al Sistema De Información Hidrológica De La Diputación De Alicante. Determinación De Las Reservas Útiles Dinámicas Y Garantías De Suministro. Acuífero De Jumilla-Villena (p. 136).

Instituto geológico y minero de España. (2012). Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica. (p. 494).

Instituto geológico y minero de España. (2009). Determinación de las reservas útiles de los embalses subterráneos de Pinar De Camús, Mediodía, Orba, Beniarbeig, Serral-Salinas, Jumilla-

Villena, Barrancones-Carrasqueta Y Voltés (Alicante). Actividad: “Determinación De Las Reservas Útiles En El Acuífero Jumilla-Villena (Alicante Y Murcia)” (p. 75).

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2006). Acuerdo Específico De Cooperación Para Los Años 2004, 2005 Y 2006 Entre El Instituto Geológico Y Minero De España Y La Excma. Diputación Provincial De Alicante. “Estudio Del Funcionamiento Hidrogeológico Y Simulación Numérica Del Flujo Subterráneo En Los Acuíferos Carbonatados De Solana Y Jumillavillena (Alicante Y Murcia)” Tomo I: Jumilla-Villena (p. 229).

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2021). Encomienda De Gestión Para Desarrollar Diversos Trabajos Relacionados Con El Inventario De Recursos Hídricos Subterráneos Y Con La Caracterización De Acuíferos Con Continuidad Hidrogeológica Entre Demarcaciones Hidrográficas -Definición Y Caracterización De Masas De Agua (Jumilla-Yecla-Castellar) Subterránea Con Continuidad Hidrogeológica Entre Demarcaciones Hidrográficas (Júcar-Segura) (p. 107).

J. L. Molina y J. L. García Aróstegui. (2009). Nuevas metodologías para el análisis integrado de la gestión del agua subterránea. Aplicación al caso de estudio del Altiplano (Murcia, SE España). Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Murcia, 14.

Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. (2020, octubre 8). Anuncio de la Confederación Hidrográfica del Júcar, O.A., sobre declaración en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo de la masa de agua subterránea 080.173 Sierra del Castellar. 4.

Moreno, J. M., Ortiz, M. I. L., & Aracil, P. F. (2021). Análisis Multidisciplinar para Mitigar el Impacto de los Fenómenos Climáticos Extremos. (p. 20).

McDonald, M. y Harbaugh, A. (1984). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open File Report 83-875.

Winston, R.B. (2009). ModelMuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52 p.

Pérez-Martín M.A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes demarcaciones. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Europea del Agua. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Pérez-Martín, M.A, Estrela, T., Andreu, J. and Ferrer, J. (2014). Modeling Water Resources and River-Aquifer Interaction in the Júcar River Basin, Spain. *Water Resources Management* (2014) 28:4337–4358 DOI 10.1007/s11269-014-0755-3

McDonald, M. y Harbaugh, A. (1984). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open File Report 83-875.

Winston, R.B. (2009). ModelMuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52 p.

Pérez-Martín M.A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes demarcaciones. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Europea del Agua. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Pérez-Martín, M.A, Estrela, T., Andreu, J. and Ferrer, J. (2014). Modeling Water Resources and River-Aquifer Interaction in the Júcar River Basin, Spain. *Water Resources Management* (2014) 28:4337–4358 DOI 10.1007/s11269-014-0755-3.

Samper, J., García Vera, M. A. (1992). Manual de usuario del programa BALAN_8. Dpto. Ingeniería del terreno. E. T. S. de Ingenieros de Caminos. UPC. Barcelona. España.

Demarcación hidrográfica del júcar (2013). Memoria - anejo 12 evaluación del estado de las masas de agua superficial y subterránea 281p.