

AQUIFER PROJECT: “Innovative instruments for an integrated management of groundwater in a context of an increasing scarcity of hydrological resources”

Informe y modelo hidrogeológico del Campo de Cartagena-Mar Menor

Report and hydrogeological model of Campo de Cartagena-Mar Menor

Fecha: 31/03/2023



El presente estudio ha sido realizado en el marco del proyecto Interreg-Sudoe AQUIFER, liderado por el CN IGME-CSIC (Instituto Geológico y Minero de España), con la participación de los socios CUADLL (Comunitat d'usuaris d'aigua de la vall baixa i delta del Llobregat), CWP (Catalan Water Partnership), CRCC (Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena), BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), Aqua-Valley, ISA-LEAF (Instituto Superior de Agronomía de la Universidad de Lisboa), AR (Águas do Ribatejo), y PPA (Associação Parceria Portuguesa para a Água).

Este documento ha sido realizado por el CN IGME-CSIC, bajo la dirección del Dr. José Luis García Aróstegui, científico titular y líder del proyecto, con el apoyo de la Dra. Virginia María Robles Arenas.

El trabajo ha sido contratado a la empresa consultora Amphos 21, con la participación del equipo formado por Maria Pool, Roger Mas, Diego Sampietro y Elena Abarca en la realización del trabajo y elaboración del informe.

En bibliografía, este informe será citado como sigue:

- García-Aróstegui, J.L., Robles-Arenas, V.M., Pool, M., Mas, R., Sampietro, D., Abarca, E. (2023). Informe y modelo hidrogeológico del Campo de Cartagena-Mar Menor. AQUIFER Project (SOE4/P1/E1045). 119 p.

Síntesis

El proyecto Interreg Sudoe AQUIFER titulado "Herramientas innovadoras para la integración de las aguas subterráneas en un contexto de creciente escasez de recursos hídricos", es un proyecto financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el marco del programa Interreg SUDOE V (2014-2020). Su principal objetivo es capitalizar, probar, difundir y transferir prácticas innovadoras para la preservación, el seguimiento y la gestión integrada de los acuíferos que sean útiles a la hora de tomar decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Para lograr este objetivo, el proyecto se divide en 4 grupos de tareas, en concreto, este informe se enmarca en el grupo de tareas 2 "Soluciones avanzadas de gestión de aguas subterráneas", donde se propone llevar a cabo soluciones avanzadas en la gestión de acuíferos a escala piloto con el objetivo de resolver problemáticas de mejora de la disponibilidad de recursos y su calidad.

Entre las actividades planteadas, la 2.1 consiste en la "Modelización hidrogeológica acoplada en el acuífero Campo de Cartagena-Mar Menor", puesto que el Campo de Cartagena puede considerarse paradigmático a nivel de la zona SUDOE por la multitud de problemáticas que confluyen, entre ellos, graves problemas de escasez y el deterioro de la calidad de las aguas y los ecosistemas. El resultado de dicha actividad es este entregable que recoge los principales resultados alcanzados con el modelo, que permite la simulación de alternativas de gestión del acuífero.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos y alcance	1
2	Recopilación y análisis de la información	3
2.1	Introducción	3
2.2	Geometría de los acuíferos	3
2.3	Parámetros hidráulicos.....	8
2.4	Niveles piezométricos.....	11
2.5	Extracciones	14
2.6	Recarga	16
3	Modelo conceptual	18
4	Modelo numérico	20
4.1	Proceso de modelación numérica	20
4.2	Dominio y geometría	22
4.2.1	Dominio.....	22
4.2.2	Geometría.....	23
4.3	Discretización espacial	28
4.4	Régimen y discretización temporal.....	30
4.5	Condiciones de contorno	30
4.5.1	Flujo nulo	30
4.5.2	Nivel constante	30
4.5.3	Condición mixta no lineal: Dren	31
4.5.4	Recarga	32
4.5.5	Extracciones	37
4.6	Condiciones iniciales	40
4.7	Parámetros	40
4.8	Puntos de observación	41
4.9	Calibración.....	43
4.9.1	Indicadores de calibración	45
4.9.2	Parámetros de calibración	47
5	Resultados	48
5.1	Estadísticos	48
5.2	Niveles observados vs simulados.....	49
5.3	Piezometría	56
5.4	Balance hídrico del modelo numérico	58
5.4.1	Recarga	58

5.4.2	Descarga al mar	60
5.4.3	Extracciones del acuífero cuaternario	62
5.4.4	Descarga a Cartagena.....	63
5.4.5	Balance global	64
5.5	Parámetros calibrados.....	66
5.5.1	Conductividad hidráulica.....	66
5.5.2	Almacenamiento	66
5.6	Velocidad del agua subterránea	68
5.7	Transporte de partículas.....	69
6	Resumen y conclusiones	70
7	Recomendaciones.....	73
8	Referencias	74
A.	Niveles observados vs. simulados	78
A.1	1920 – 2020.....	78
A.2	1960 – 2020.....	98
A.3	2015 – 2020.....	103

Índice de Figuras

Figura 2-1: Límite de la Masa de Agua Subterránea del Campo de Cartagena y de sus acuíferos principales, ilustrados en un corte hidrogeológico. Tomado de García-Aróstegui et al. (2017).	5
Figura 2-2: Modelo geológico tridimensional de la cuenca del Campo de Cartagena (factor de exageración vertical x10). Tomado de Jiménez-Martínez et al. (2012).....	6
Figura 2-3: Ubicación de perfiles geoelectrónicos (doble trazo en amarillo) y perfiles 2,6 y 9 (CHS-Tragsatec, 2020).	7
Figura 2-4: Mapa de espesor de los materiales cuaternarios en la zona de estudio (CHS-Tragsatec, 2020).	8
Figura 2-5: Valores de transmisividad obtenidos en los ensayos de bombeo (CHS-Tragsatec, 2020).	10
Figura 2-6: Evolución histórica de niveles en el sistema del Campo de Cartagena. (García - Aróstegui, 2021)	12
Figura 2-7: Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Cuaternario. Entre 1927 y 1972 los niveles son estimados (Domingo-Pinillos, 2019).....	13
Figura 2-8: Mapas de isopiezas (García-Aróstegui et al., 2017) y dirección de flujo de agua subterránea en el acuífero cuaternario en octubre de 2009 (izquierda) y octubre de 2016 (derecha). Cotas en metros sobre el nivel del mar. TTS denota Trasvase Tajo-Segura.	14
Figura 2-9: Pozos de extracción en el Cuaternario a partir del registro de Aguas de la CHS para el año 2020/2021.	15
Figura 2-10: Evolución temporal de las extracciones en los acuíferos del Campo de Cartagena (Domingo-Pinillos, 2019).	16
Figura 2-11: Distribución espacial de la recarga anual media (mm/año) estimada por el modelo de balance hidrológico superficial (Contreras et al., 2017).	17
Figura 3-1: Evolución histórica de niveles en el sistema del Campo de Cartagena (García - Aróstegui, 2021).	19
Figura 4-1: Diagrama del proceso de modelación numérica.....	21
Figura 4-2: Dominio de modelación (línea negra) y límite de los afloramientos cuaternarios (línea roja) en la cuenca del Campo de Cartagena.....	23
Figura 4-3: Espesor de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios considerado para el modelo numérico.....	25
Figura 4-4: Vista 3d de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios considerados para el modelo numérico.....	26

Figura 4-5: Topografía definida en el modelo numérico.....	27
Figura 4-6: Cota de fondo de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definida en el modelo numérico.....	27
Figura 4-7: Secciones verticales de norte (profile 1) a sur (profile 3) indicando la potencia de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definidos en el modelo numérico.....	28
Figura 4-8: Malla definida en el modelo numérico y zoom en la franja costera con el refinamiento horizontal implementado.....	29
Figura 4-9: Celdas definidas y segmentos con condición de contorno de nivel prescrito para representar la conexión entre el acuífero y la laguna.....	31
Figura 4-10: Celdas definidas en el límite sur con condición de contorno mixta no lineal para representar la descarga por el sector de Cartagena.	32
Figura 4-11: Conceptualización del balance en SPHY.	33
Figura 4-12: Parámetros de suelo y raíces utilizados en el modelo SPHY de Campo de Cartagena. Arriba a la izquierda: contenido de arena (%); arriba a la derecha: contenido de arcilla (%); abajo a la izquierda: contenido de materia orgánica (%); abajo a la derecha: conductividad hidráulica saturada (mm/día).....	34
Figura 4-13: Zonas de recarga definidas en el modelo numérico.	36
Figura 4-14: Evolución temporal de las extracciones en los acuíferos del Campo de Cartagena (Domingo-Pinillos, 2019).	37
Figura 4-15: Pozos de extracción en el Cuaternario a partir del registro de Aguas de la CHS para el año 2020/2021.	38
Figura 4-16: Zonas de extracción definidas en el modelo numérico.	39
Figura 4-17: Puntos de observación del modelo numérico.	41
Figura 4-18: Puntos de observación virtuales incluidos en el modelo numérico con medida de nivel a partir de la piezometría del año 1961.	43
Figura 4-19: Malla de puntos piloto definida para el proceso de calibración estocástica.	45
Figura 5-1: Puntos de observación virtuales con medida de nivel a partir de la piezometría del año 1961.	48
Figura 5-2: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación.	51
Figura 5-3: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación.	52
Figura 5-4: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación y puntos virtuales.	53
Figura 5-5: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos puntos virtuales incluidos en el modelo numérico.	54

Figura 5-6: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 2015 a 2020 para los pozos de observación SM incluidos en el modelo numérico.	55
Figura 5-7: Piezometría medida y simulada para el año 1961.	57
Figura 5-8: Piezometría simulada para la simulación estacionaria correspondiente al año 1920.	57
Figura 5-9: Piezometría simulada para la simulación estacionaria correspondiente al año 1920 y al final de simulación correspondiente a diciembre de 2020.	58
Figura 5-10: Recarga anual (hm ³ /año) impuesta en el modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020).	59
Figura 5-11: Recarga (mm/año) impuesta en el modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020) y precipitación medida (mm/año) para el periodo 1951-2020. ...	59
Figura 5-12: Descarga anual al Mar Menor (hm ³ /año) para cada segmento definido en el contorno obtenida a partir del modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020).	60
Figura 5-13: Descarga anual total al Mar Menor (hm ³ /año) para todo el periodo simulado (1920-2020).	62
Figura 5-14: Extracciones del acuífero cuaternario (hm ³ /año) en las diferentes zonas definidas para todo el periodo simulado (1920-2020).	62
Figura 5-15: Extracción total del acuífero cuaternario (hm ³ /año) simulado para todo el periodo simulado (1920-2020) y función obtenida a partir de antecedentes (Domingo-Pinillos, 2019).	63
Figura 5-16: Descarga anual hacia Cartagena (hm ³ /año) para todo el periodo simulado (1920-2020).	64
Figura 5-17: Balance global en el Campo de Cartagena (hm ³ /año) para todo el periodo simulado (1920-2020).	65
Figura 5-18: Distribución espacial de la permeabilidad (m/d) obtenido a partir del proceso de calibración.	67
Figura 5-19: Distribución espacial del almacenamiento (porosidad drenable) obtenido a partir del proceso de calibración.	67
Figura 5-20: Distribución espacial de la velocidad obtenido para el último paso de tiempo de la simulación correspondiente a diciembre de 2020.	68
Figura 5-21: Simulación de partículas con tiempo de tránsito (años) y trayectorias hasta el Mar Menor. Campo de permeabilidad obtenido a partir del proceso de calibración.	69

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Valores de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) en sondeos y zanjas del acuífero cuaternario (Tragsatec, 2013).....	9
Tabla 2-2: Valores de transmisividad obtenidos en los ensayos de bombeo (CHS-Tragsatec, 2020).	9
Tabla 4-1: Recarga promedio (tasa en mm/año) para todo el periodo simulado en cada zona de recarga.	35
Tabla 4-2: Zonas de extracción dentro del sector sur y porcentaje de explotación en función de los derechos obtenidos a partir del registro de Aguas de la CHS.	40
Tabla 4-3: Pozos de observación incluidos en el modelo numérico (ETRS89 UTM30N).	42
Tabla 5-1: Estadísticos del periodo de calibración del modelo numérico de flujo.....	49
Tabla 5-2: Descarga promedio al Mar Menor (hm ³ /año) en los sectores definidos en el contorno.	61
Tabla 5-3: Descarga promedio al Mar Menor (hm ³ /año) en los sectores definidos en el contorno.	65

1 Introducción

1.1 Antecedentes

En el desarrollo de sus funciones, el Centro Nacional IGME-CSIC ha resultado adjudicatario del Proyecto AQUIFER: “Instrumentos innovadores para la gestión integrada de las aguas subterráneas en un contexto de escasez creciente de recursos hídricos” (SOE4/P1/E1045), financiado por el Fondo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea (UE), dentro del programa de cooperación transfronteriza INTERREG SUDOE 2014 – 2020.

El objetivo principal de AQUIFER es capitalizar, testar, difundir y transferir prácticas innovadoras de preservación, monitorización y gestión integrada de acuíferos que sean de ayuda a la hora de la toma de decisiones de la gestión de los recursos hídricos subterráneos, mejorar la transferencia tecnológica a los agentes locales y crear nuevas sinergias y desarrollar herramientas comunes en un contexto de escasez de recursos hídricos y amenazas medioambientales. Este proyecto mejorará la cooperación y la transferencia de tecnología entre universidades, centros de investigación y el tejido empresarial, fomentando sinergias y desarrollo de nuevos productos y servicios. En AQUIFER los usuarios están presentes como beneficiarios de los organismos de investigación y administración que proporcionan la base de conocimiento necesaria.

La actividad 2.1 del Proyecto AQUIFER se centra en la “Modelización hidrogeológica acoplada en el acuífero Campo de Cartagena-Mar Menor”, situado en el sureste de España. La modelización hidrogeológica del Campo de Cartagena es una necesidad en términos socioeconómicos y ambientales, y es un caso que puede considerarse como un referente de la importancia de las aguas subterráneas. Dicha actividad 2.1 del Proyecto AQUIFER está liderada por el IGME-CSIC con el apoyo de los usuarios locales (Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, CRCC), y debe contar con la experiencia de CUADLL, BRGM y AR. Este ámbito de trabajo podría considerarse paradigmático a nivel de la zona SUDOE por la multitud de problemáticas que confluyen, singularmente, los graves problemas de escasez y deterioro de la calidad de las aguas y los ecosistemas asociados.

1.2 Objetivos y alcance

El principal objetivo del presente trabajo es avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena mediante la incorporación de nuevos datos y la calibración de un modelo matemático de flujo subterráneo que suponga una mejora del conocimiento sobre los varios que se han calibrado hasta la actualidad (Contreras et al., 2017;

Alcolea et al., 2019; Domingo-Pinillos, 2019; CHS-Tragsatec, 2020), entendiendo que cada uno de ellos, incluido el presente, tiene sus debilidades y fortalezas.

Atendiendo a la caracterización previa existente, y para el desarrollo del modelo numérico, el proyecto se ha definido en función de una serie de tareas:

- **Definir la geometría del acuífero cuaternario.** En base a la cartografía del IGME-CSIC y datos de columnas geológicas se realizará una propuesta de mejora en la definición del acuífero con respecto a la realizada por el IGME (1991). Se integrará singularmente la nueva información geométrica obtenida por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) en el estudio realizado por CHS-Tragsatec (2020).
- **Determinar los parámetros hidráulicos en el acuífero cuaternario.** Se recopilarán los datos disponibles en la base de datos del IGME-CSIC para obtener información de ensayos de bombeo en el acuífero cuaternario, así como otras informaciones que estén disponibles en otros estudios locales facilitados por el IGME-CSIC, como los realizados por la CHS en la zona costera.
- **Cuantificar la recarga al acuífero cuaternario.** La cuantificación de la recarga se realiza dentro de la actividad A1.3 del Proyecto AQUIFER, mediante el código SPHY (*Spatial Processes in Hydrology*) que simula el balance de agua en el suelo. Tales trabajos han sido llevados a cabo en el marco de la contratación del IGME-CSIC a la empresa consultora FutureWater.
- **Estimar las extracciones en el acuífero cuaternario.** Se recopilarán los datos de diferentes fuentes: tales como el inventario del Registro de Aguas de la CHS, los consumos de agua del Sistema Integrado de Control de Aprovechamientos (SICA) de la CHS y los pozos dentro del expediente APV-90/2016, que centraliza la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, para tratar de determinar con precisión las extracciones del acuífero cuaternario.
- **Reconstruir la evolución piezométrica del acuífero cuaternario desde el régimen natural hasta la actualidad.** El objetivo es mejorar el modelo conceptual y calibrar las acciones exteriores que permiten reproducir un comportamiento piezométrico del acuífero cuaternario a largo plazo.

2 Recopilación y análisis de la información

2.1 Introducción

La primera tarea ha consistido en recopilar y revisar la información disponible sobre el sistema acuífero del Campo de Cartagena. Entre los antecedentes, se han revisado tanto aquellos especificados en el Pliego de Preinscripciones Técnicas (PPT), así como la de otros trabajos y datos públicos o facilitados por las administraciones y organismos implicados.

Hay numerosos trabajos relativos a la hidrogeología del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena, entre los cuales destacan los más relevantes, como ITGE (1989), IGME (1991), IGME (1994), Senent-Alonso et al. (2009), García-Aróstegui et al. (2012), Jiménez-Martínez et al. (2012), Baudron et al. (2014), Contreras et al. (2017), Domingo-Pinillos (2019), Alcolea et al. (2019) y CHS-Tragsatec (2020).

La mayoría de los trabajos comentados anteriormente relacionados con el Campo de Cartagena, tienen cuatro puntos comunes que son:

- Incertidumbre provocada por el desconocimiento de datos piezométricos fiables previamente al año 1975 y la evolución de los acuíferos desde su origen, antes de la antropización del medio.
- Los trabajos recientes basados en modelos matemáticos generalmente estudian únicamente el acuífero libre de la capa cuaternaria y sus interrelaciones con el entorno, sin incorporar el resto de las capas acuíferas a los modelos, lo que genera una falta de conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de todo el conjunto del sistema.
- Falta de información fiable sobre los regímenes de explotación por bombeo de cada capa, lo que genera incertidumbre a la hora de la introducción de los datos en el modelo, y traslada esa incertidumbre a la evolución de las extracciones reales en el tiempo y a la recarga real por infiltración excedentes de de riego que está relacionada con las extracciones de aguas subterráneas.
- Variabilidad en los parámetros hidráulicos reportados para el acuífero cuaternario, al hacer consideraciones diferentes en cuanto a las extracciones.

2.2 Geometría de los acuíferos

La cuenca neógeno-cuaternaria del Campo de Cartagena, con una extensión aproximada de 1500 km², puede llegar a tener espesores de hasta 1500 m (García-Aróstegui et al., 2017). Sobre un basamento de edad paleozoica, pérmica y triásica, formado por esquistos, filitas,

cuarcitas y calizas, descansan los materiales sedimentarios del neógeno. Este relleno sedimentario de la cuenca está compuesto principalmente por alternancia de sedimentos, en particular, margas con intercalaciones de calizas, areniscas y conglomerados, que fueron depositados en el periodo transcurrido entre el Tortonense y el Cuaternario. Las arenas y conglomerados del Tortonense, las calizas del Mesiniense y las areniscas del Plioceno conforman los acuíferos profundos, mientras que los sedimentos del Cuaternario constituyen el acuífero superficial (Aragón et al., 2009; IGME, 1994, 1991; Rodríguez, 1995). El sistema hidrogeológico regional es un sistema multicapa (Figura 2-1) compuesto por:

- Un acuífero superficial o libre cuaternario, compuesto principalmente por gravas, arenas, conglomerados y arenisca con intercalaciones de limos y arcillas,
- un acuífero confinado intermedio plioceno, llamado Loma Tercia, compuesto principalmente por areniscas,
- un acuífero confinado profundo mesiniense, llamado Venta la Virgen, también compuesto por areniscas, y un acuífero confinado profundo tortoniense, compuesto por arenas y conglomerados.

Estos acuíferos están separados por acuitardos de baja a muy baja permeabilidad, como es el caso de las capas de margas y evaporitas que separan el Plioceno del Cuaternario, las cuales llegan a tener más de 40 m de espesor. Este espesor se reduce hacia los bordes de la cuenca, especialmente en el borde sur, donde llegan a aflorar materiales metamórficos de basamento correspondientes a la Sierra de Cartagena – La Unión. La reducción de esta capa que actúa como acuitardo, abre la posibilidad de que el acuífero plioceno y cuaternario se encuentren localmente conectados, aunque esta conexión hidráulica no se refleja a escala regional, donde cada acuífero muestra un nivel piezométrico independiente. El acuífero cuaternario, objeto de este estudio, es el que ocupa la mayor extensión en la cuenca del Campo de Cartagena, con un espesor saturado medio de unos 50 m en esa extensión (García-Aróstegui et al., 2017; Jiménez-Martínez et al., 2012).

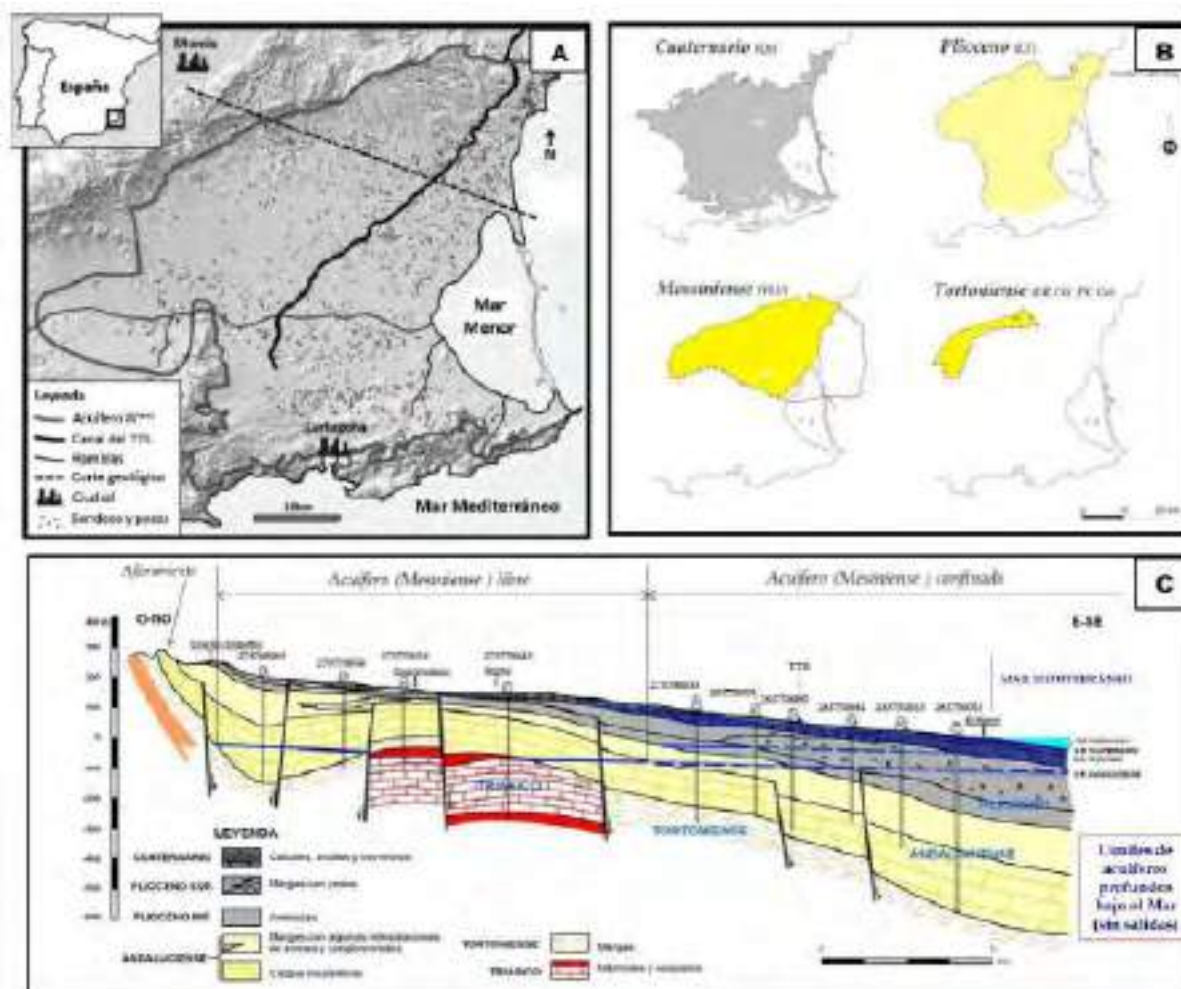


Figura 2-1: Límite de la Masa de Agua Subterránea del Campo de Cartagena y de sus acuíferos principales, ilustrados en un corte hidrogeológico. Tomado de García-Aróstegui et al. (2017).

El funcionamiento hidrogeológico del sistema es complejo debido a su geometría y grado de antropización. En Jiménez-Martínez et al. (2012) se propone un modelo geológico tridimensional (Figura 2-2) en base al análisis de diversas fuentes de datos, entre ellos: perfiles sísmicos, gravimetría, resistividad eléctrica y 491 perfiles en pozos y sondeos. La interpretación de dicha información litológica y geofísica permitió asimismo la interpolación de superficies de techo y muro de las tres formaciones principales, con una malla de resolución uniforme de 500 x 500 m.

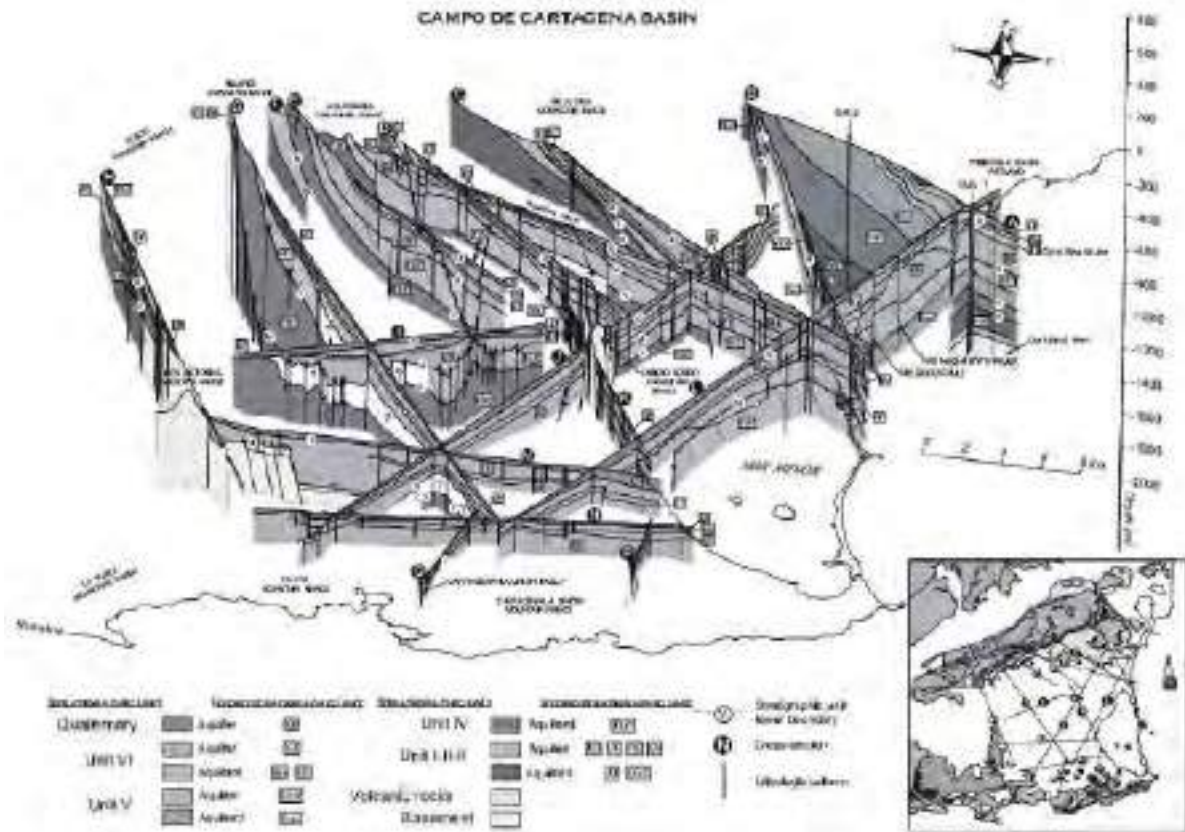


Figura 2-2: Modelo geológico tridimensional de la cuenca del Campo de Cartagena (factor de exageración vertical x10). Tomado de Jiménez-Martínez et al. (2012).

En el estudio realizado por CHS-Tragsatec (2020), centrado en la franja costera, se realizó una campaña de prospección geofísica mediante sondeos eléctricos verticales (SEVs) y tomografías eléctricas (Figura 2-3), así como la perforación de nuevos sondeos de investigación hidrogeológica, la información de la cual permitió determinar un mapa de espesor del acuífero cuaternario en la zona litoral (Figura 2-4).

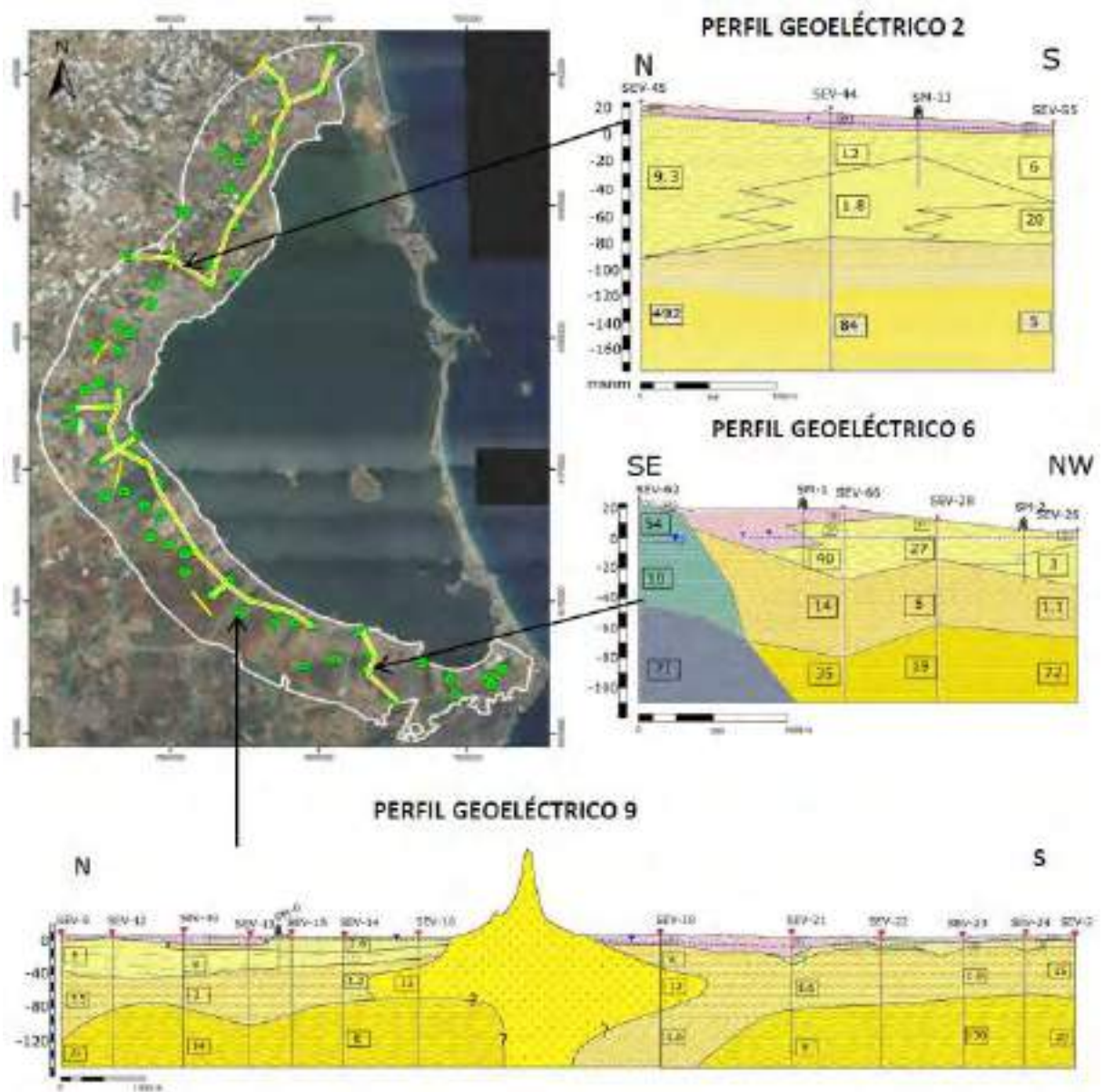


Figura 2-3: Ubicación de perfiles geoelectricos (doble trazo en amarillo) y perfiles 2,6 y 9 (CHS-Tragsatec, 2020).

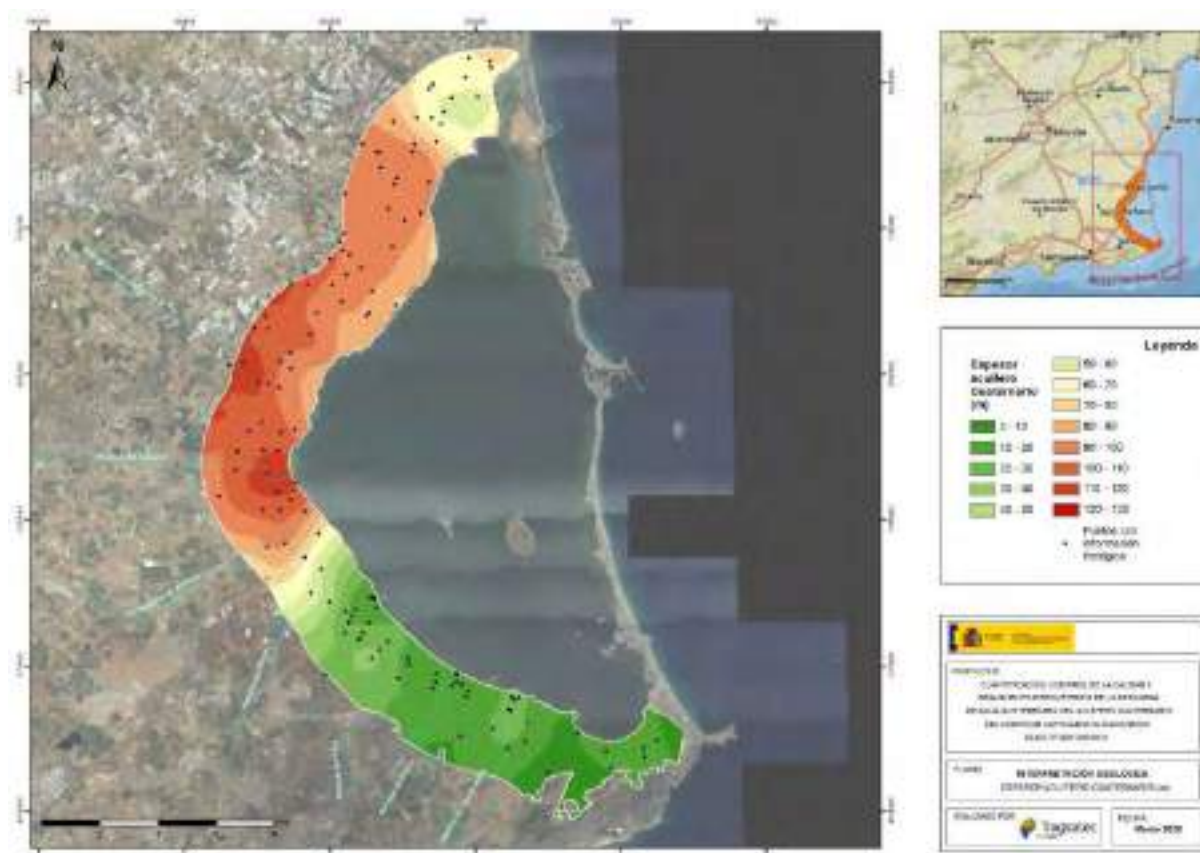


Figura 2-4: Mapa de espesor de los materiales cuaternarios en la zona de estudio (CHS-Tragsatec, 2020).

2.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del acuífero, principalmente transmisividad y coeficiente de almacenamiento, vienen determinados a partir de la interpretación de ensayos hidráulicos, tales como de bombeo o inyección. Estos ensayos son escasos en la zona, además de que su resultado es marcadamente local, por lo que la información que proporcionan es muy puntual y difícil de extrapolar a una mayor extensión de acuífero. En Tragsatec (2013), se llevan a cabo varios ensayos para la caracterización hidrogeológica del acuífero cuaternario (

Tabla 2-1).

En los valores obtenidos, se observa una gran heterogeneidad, característica de los acuíferos cuaternarios donde hay una gran variedad de materiales y espesores. Los materiales del acuífero cuaternario son relativamente homogéneos a escala regional, si bien a escala local pueden existir cambios bruscos debidos, por ejemplo, a paleocauces de alta conductividad hidráulica (Contreras et al., 2017).

En CHS-Tragsatec (2020) se ejecutaron hasta 17 ensayos de bombeo. En la Tabla 2-2 y Figura 2-5 se exponen los datos de transmisividades obtenidos. En uno de los sondeos construido a testigo continuo (SM-12) se efectuaron cinco ensayos Lefranc para determinar la permeabilidad de los materiales atravesados.

Tabla 2-1: Valores de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) en sondeos y zanjas del acuífero cuaternario (Tragsatec, 2013).

ID	Tipo	Código	Tmin (m ² /d)	Tmax (m ² /d)	Smin	Smax
101	Sondeo	Sondeo 1	15	20,4	7,40E-03	-
120	Sondeo	Sondeo 21	15,3	16,6	4,60E-05	5,50E-03
168	Zanja	Zanja 1	71,5	97,2	0,056	-
169	Zanja	Zanja 2	117,5	153,8	0,103	0,118
251	Zanja	Dren	213,1	-	-	-
252	Sondeo	SHI-01	7,2	13,7	1,20E-03	-
253	Sondeo	SHI-02	780	836	7,00E-03	-
254	Sondeo	SHI-03	1185	1352	7,40E-03	-
255	Sondeo	SHI-04	500	690	3,35E-03	-
256	Sondeo	SHI-05	1570	1600	2,70E-03	-

Tabla 2-2: Valores de transmisividad obtenidos en los ensayos de bombeo (CHS-Tragsatec, 2020).

Sondeo	T (m ² /d)	Sondeo	T (m ² /d)
SM-1	5	SM-11	319
SM-2	608	SM-13	94
SM-3	2	SM-14	45
SM-5	832	SM-15	134
SM-6	129	SM-16	314
SM-7	17	SM-17	176
SM-8	62	SM-18	345
SM-9	83	SM-19	311
SM-10	1014		



Figura 2-5: Valores de transmisividad obtenidos en los ensayos de bombeo (CHS-Tragsatec, 2020).

Las transmisividades más elevadas se registraron en zonas ramblas y paleocauces, próximos al trazado actual de ramblas, donde existe una mayor granulometría de los materiales. Este es el caso de los sondeos SM-2, junto a la rambla de Carrasquilla, SM-5 junto a la rambla del Beal y Miranda, y SM-11 junto a rambla de Los Alcázares. Por el contrario, las transmisividades más bajas se dieron en la zona sur en la que el espesor del acuífero es menor y los materiales son de naturaleza más arcillosa. En general, destaca la variabilidad espacial de la transmisividad en función de su proximidad a los ejes de las ramblas o paleocauces, los cuales son formaciones muy permeables, pero de escasa extensión lateral.

2.4 Niveles piezométricos

Los datos referentes a la piezometría corresponden a varias fuentes, entre las que se encuentran la red piezométrica que gestiona la CHS, los datos piezométricos del IGME y los estudios previos sobre modelización del acuífero cuaternario realizado por Senent-Alonso et al. (2009).

El IGME realiza controles piezométricos y recaba datos sobre aguas subterráneas desde hace varias décadas, disponiendo de datos sistemáticos desde la década de los años 70 hasta el año 2001 aproximadamente, fecha en la que empezó la CHS a llevar los mencionados controles de las aguas subterráneas en distintos puntos de la zona. Sin embargo, la mayoría de los pozos históricos fueron perforados por particulares, lo que hace que exista falta de información técnica sobre la ejecución de los mismos, lo cual los convierte en puntos poco fiables a la hora de discernir cual es el origen o tramo acuífero al que pertenecen las muestras, y cuáles son las mediciones de los niveles piezométricos de los sondeos estudiados.

En general, del estudio de las gráficas de las piezometrías obtenidas de los datos oficiales de la CHS y del IGME para todos los tramos acuíferos del sistema multicapa, se puede observar una zona temporal coincidente con los niveles más bajos entre 1975 y 1985, a partir de la cual todos los acuíferos experimentan una recuperación general y paulatina coincidente con la puesta en marcha del Traspase Tajo-Segura (Figura 2-6). También existen dos zonas temporales donde las piezometrías experimentan un descenso generalizado, que coinciden con los periodos de sequía que se produjeron uno en 1995 y otro en 2005.

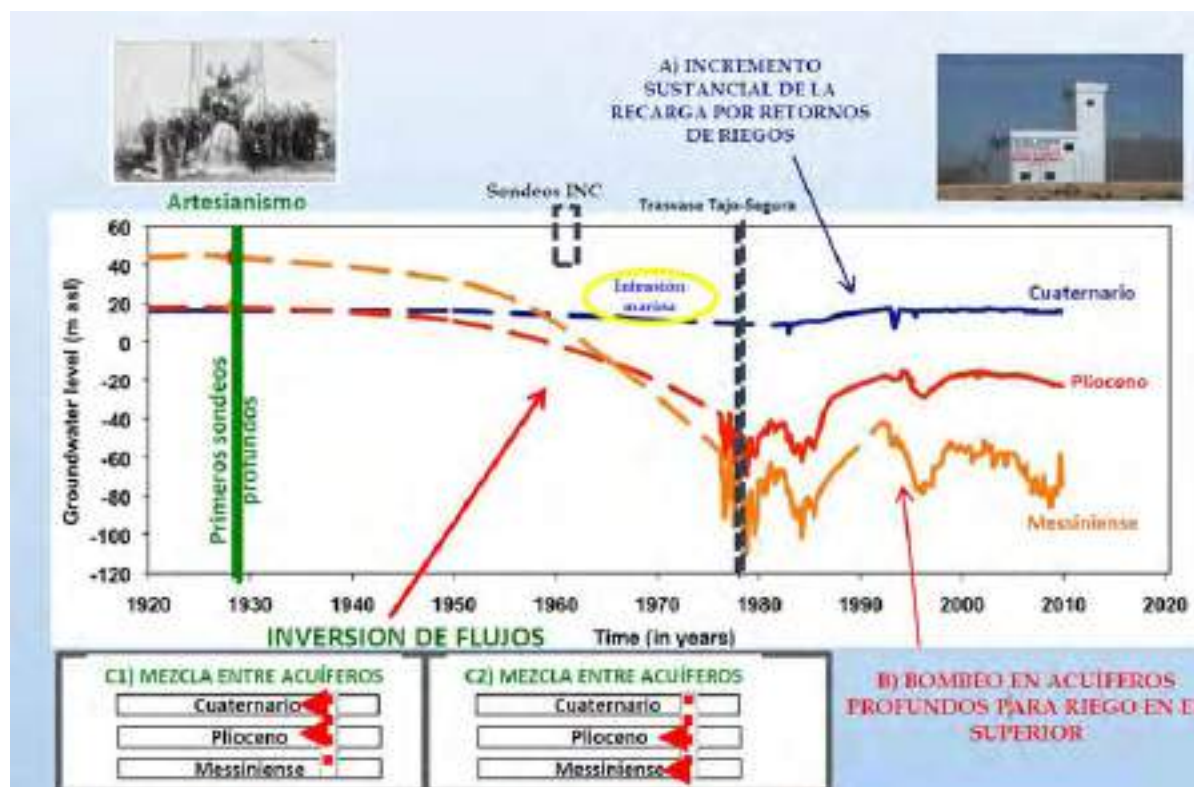


Figura 2-6: Evolución histórica de niveles en el sistema del Campo de Cartagena. (García -Aróstegui, 2021)

Los datos históricos obtenidos de antes de la antropización del medio, la aplicación de ecuaciones de segundo grado, y la interpolación de datos estadísticos, han servido para reconstruir el estado anterior a las mediciones del IGME en el acuífero cuaternario (Figura 2-7). En el último tercio del siglo XIX, en general, había surgencia natural en parte del Campo de Cartagena.

En el primer cuarto del siglo XX con el perfeccionamiento de las técnicas extractivas, se consiguen mayores profundidades y mayores caudales, lo que provoca que los niveles piezométricos del Cuaternario dejarán de tener surgencias naturales, y a su vez, se empezase a poder llegar a las capas confinadas inferiores como el Plioceno y algunos puntos del Mesiniense.

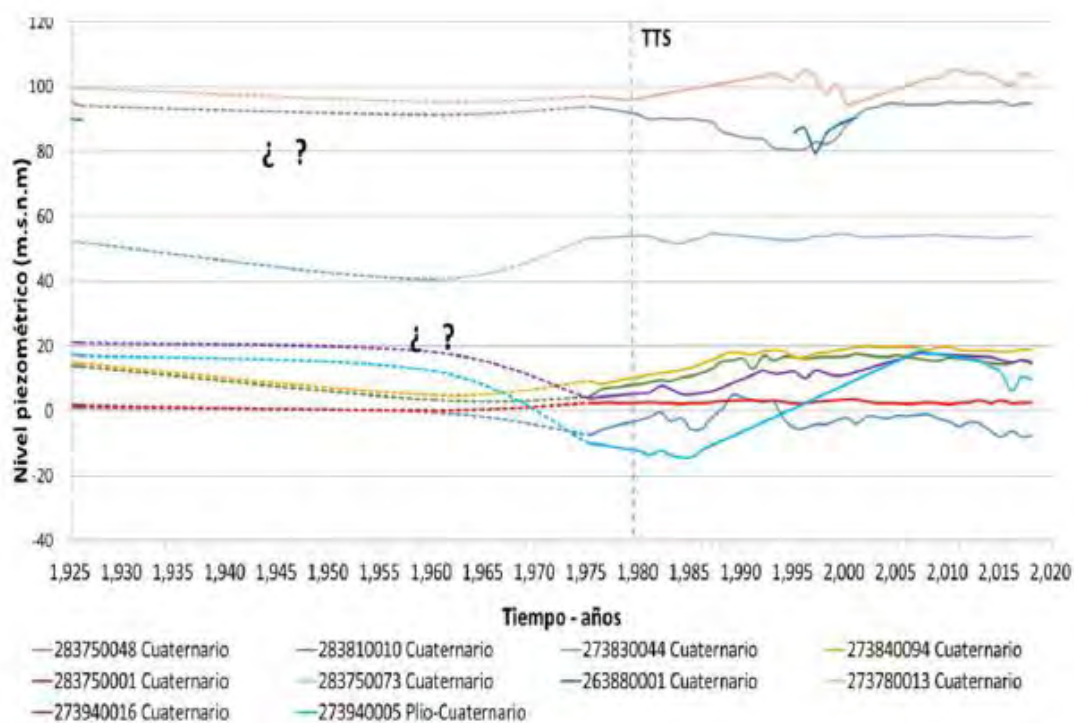


Figura 2-7: Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Cuaternario. Entre 1927 y 1972 los niveles son estimados (Domingo-Pinillos, 2019).

En el trabajo de García-Aróstegui et al. (2017) se ofrecen dos mapas piezométricos para el acuífero cuaternario en la zona cercana a la laguna, para 2009 y 2016 (Figura 2-8). Se observa un comportamiento global típico de acuífero cuaternario conectado a una masa de agua salada, con isopiezas paralelas a la línea de costa, lo que revela un flujo de descarga del acuífero a la laguna, con cierta influencia de la Rambla del Albuñón cerca de su desembocadura. En 2016 se observan niveles negativos en la zona de costa y en su parte sur, provocados por el impacto de las zanjas drenantes existentes.

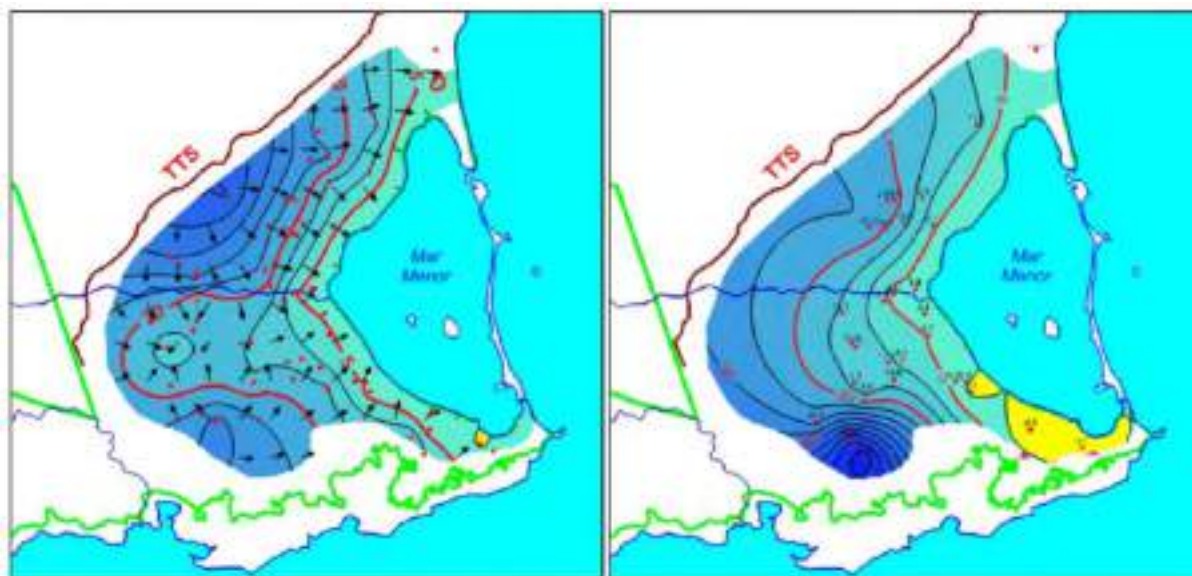


Figura 2-8: Mapas de isopiezas (García-Aróstegui et al., 2017) y dirección de flujo de agua subterránea en el acuífero cuaternario en octubre de 2009 (izquierda) y octubre de 2016 (derecha). Cotas en metros sobre el nivel del mar. TTS denota Trasvase Tajo-Segura.

2.5 Extracciones

En el estudio del IGME (1991) se habla de una cifra total de explotación por bombeos que ronda los 21 hm³/año, de los cuales 2 serían debidos a la explotación del acuífero superficial Cuaternario, 6,3 del acuífero plioceno y 12,3 del acuífero mesiniense. Según García-Aróstegui et al. (2017), estas cifras corresponderían al año húmedo de 1990 y se han modificado sustancialmente a fecha presente. En Jiménez-Martínez et al. (2012) se cifran las extracciones en el acuífero cuaternario, plioceno y mesiniense en 104 hm³/año, incluyendo los bombeos en el Triásico de Los Victorias. En cambio, el PHCS 2015-2021 reconoce una cifra de bombeo total en el Campo de Cartagena de 88,2 hm³/año. Estos caudales son inciertos, principalmente debido la dificultad de discernir de qué acuífero están bombeando los pozos de extracción. A nivel cualitativo, los acuíferos profundos son los más explotados, mientras que el nivel de explotación del acuífero cuaternario es pequeño debido a su alto nivel de contaminación por infiltración de excedentes de riego.

En el presente estudio, se ha efectuado una revisión de la información del Registro de Aguas de la CHS. De esta información, se han identificado 1172 aprovechamientos en Campo de Cartagena, con un total de 1446 puntos de agua y unos derechos asociados de 81,08 hm³/año. El IGME-CSIC ha estimado que 657 puntos captan el acuífero cuaternario o pliocuaternario de la parte sur (Figura 2-9), excluyendo el Triásico de Los Victorias, Cabo Roig y zona de Fuente Álamo. Los derechos de agua totales (considerando todos los usos),

asociados a estos 657 puntos de agua ascienden a 21,23 hm³/año, con un promedio de caudales instantáneos de 8,8 L/s.

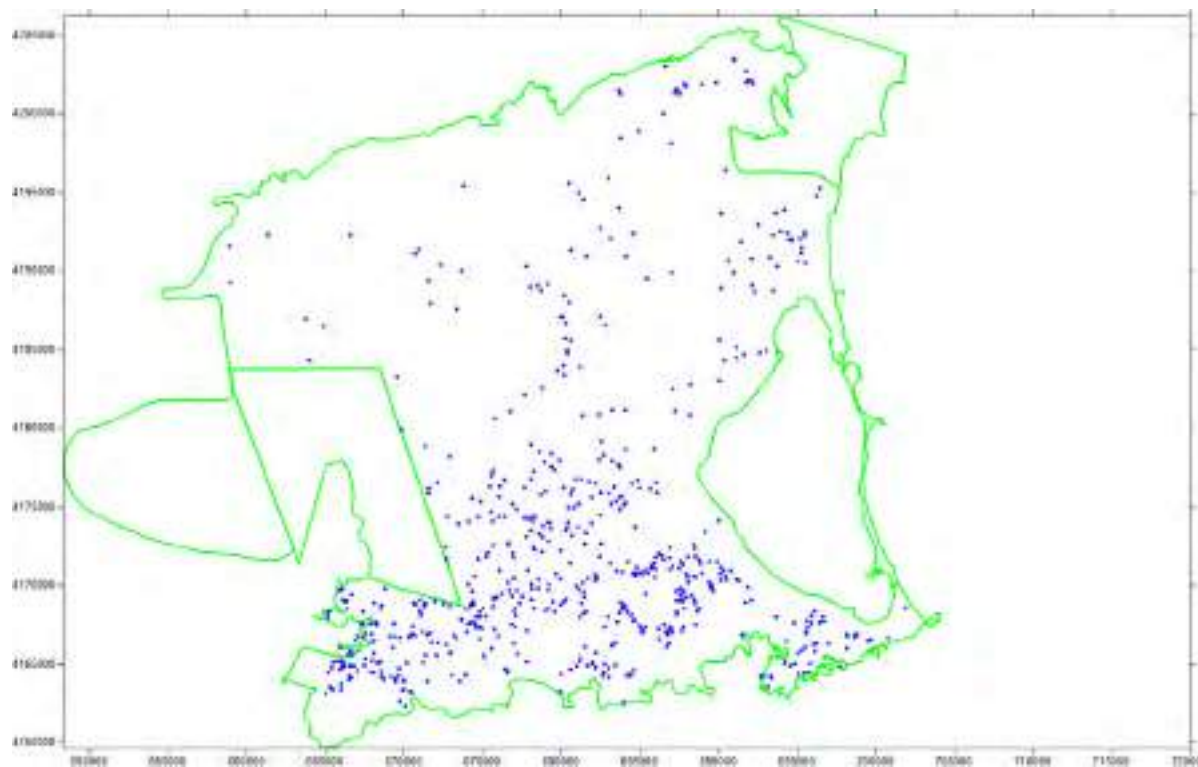


Figura 2-9: Pozos de extracción en el Cuaternario a partir del registro de Aguas de la CHS para el año 2020/2021.

Dicha revisión realizada por el IGME-CSIC ha analizado los consumos de agua del Sistema Integrado de Control de Aprovechamientos (SICA) de la CHS para el año hidrológico 2020/21. De los 357 puntos de control de extracciones en las Masas de Agua Subterránea Campo de Cartagena y Triásico de Los Victorias, unos 80 puntos captarían el acuífero cuaternario con unos derechos asociados de 9,74 hm³/año, lo que supone controlar el 46% de los derechos de este tramo acuífero. El consumo de agua en estos 80 puntos habría sido de 1,77 hm³ para el año hidrológico 2020/21, lo que supone aproximadamente el 18,1% de los derechos asociados (9,74 hm³/año). Por lo que asumiendo el mismo porcentaje del 18% de consumo en el caso de los 577 puntos no controlados, cuyos derechos ascienden a 11,49 hm³/año, se obtendría un consumo adicional de bombeo de 2,1 hm³/año.

La tercera fuente analizada por el IGME-CSIC para evaluar el bombeo son los pozos dentro del expediente APV-90/2016, que centraliza la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena. Dicho expediente contiene datos del seguimiento mensual que se realiza sistemáticamente desde marzo de 2019, en 137 pozos. Los derechos asociados a estos 137

pozos ascienden a 9 hm³/año, pero solamente 117 puntos con 6,51 hm³/año de derechos asociados captarían el acuífero cuaternario. El volumen consumido en el año hidrológico 2020/21 por parte de los 117 puntos que captan el acuífero cuaternario o pliocuaternario de la parte sur asciende a 1,045 hm³, por tanto, aproximadamente un 16% del volumen concedido, cifra muy similar a la obtenida por SICA (18%), García-Aróstegui, J. L. (2021).

La evolución histórica de estas extracciones desde 1925 se definió en Domingo-Pinillos (2019). Dónde a partir de la evolución de la demanda agrícola se realiza una reconstrucción de la extracción anual por cada acuífero entre 1925 y 2018 (Figura 2-10).

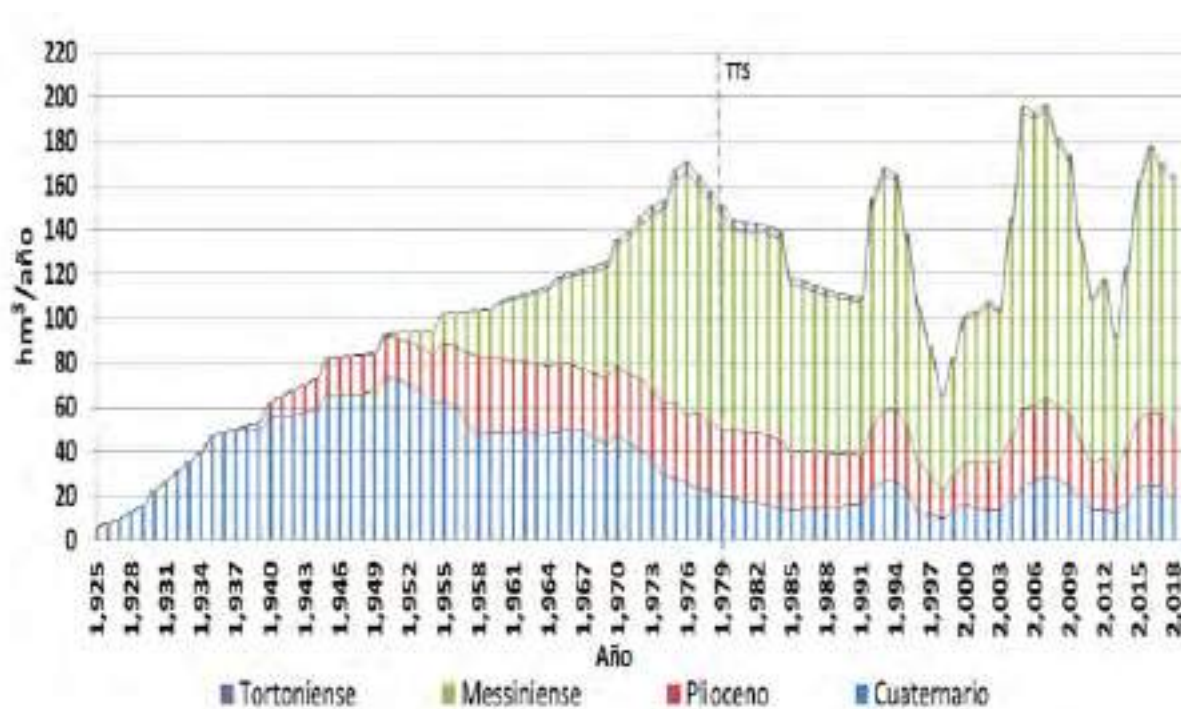


Figura 2-10: Evolución temporal de las extracciones en los acuíferos del Campo de Cartagena (Domingo-Pinillos, 2019).

2.6 Recarga

En Jiménez-Martínez et al. (2012) se da un valor de índice de precipitación anual media de 310 mm/año, que proporciona una infiltración útil que varía entre 17 mm/año (Baudron et al., 2014), y 50 mm/año propuesto por estudios del IGME (IGME, 1991), y definidos como la primera estimación de recarga moderna para el acuífero cuaternario.

La recarga natural procedente de la precipitación se propone de 50 mm/año en el IGME en sus estudios iniciales de finales del siglo XX (IGME, 1991). Algunas consideraciones posteriores aconsejan rebajar esa cifra debido al actual cambio climático tendente a la reducción de lluvias en España, más acusado en zonas semiáridas (Alcalá y Custodio, 2015). También, otros estudios consideran que al cambiar el régimen de precipitación generalmente con lluvias torrenciales, se están obteniendo datos recientes donde los valores de precipitación anual están superando la media establecida en 310 mm/año, por lo que se considera que, para periodos recientes del siglo XXI, debiera de elevarse en cierta medida el valor de recarga natural a establecer en estudios hidrogeológicos de esta zona.

En Contreras et al., (2017) se lleva a cabo un modelo hidrológico superficial para estimar la recarga en el Campo de Cartagena, aplicando un modelo de balance de agua en el suelo mediante el uso del código SPHY (Spatial Processes in Hydrology). En los resultados de esta modelización se observa que las mayores tasas se encuentran en el sector más meridional de la cuenca (Figura 2-11).

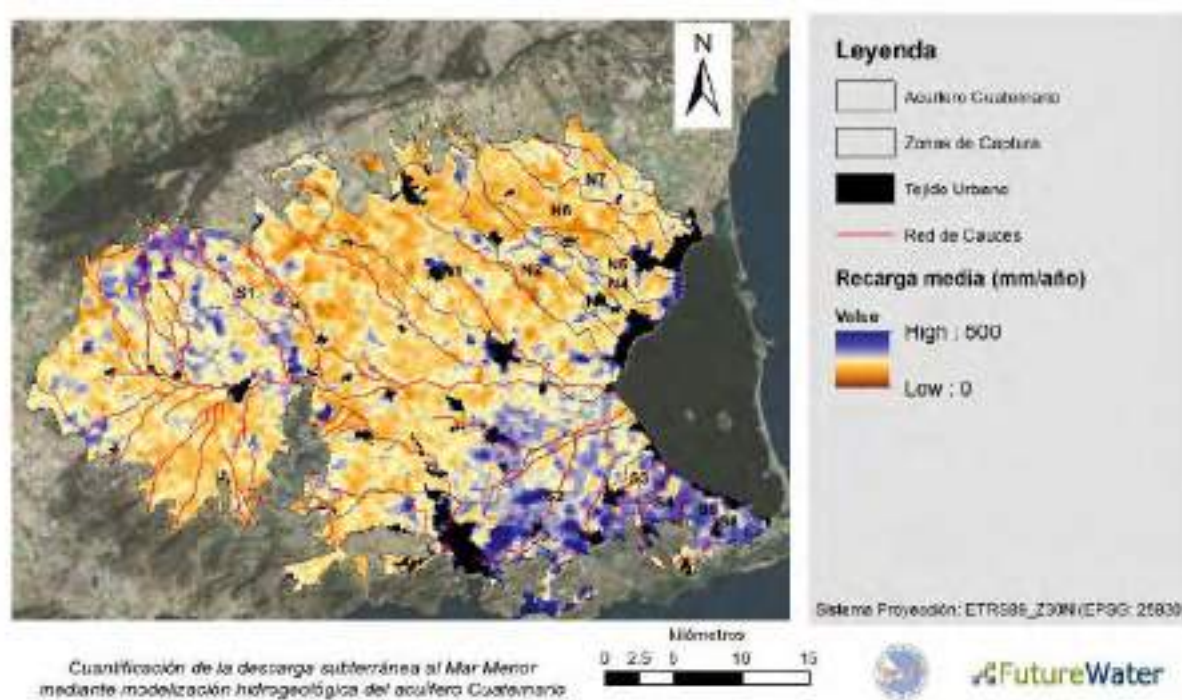


Figura 2-11: Distribución espacial de la recarga anual media (mm/año) estimada por el modelo de balance hidrológico superficial (Contreras et al., 2017).

3 Modelo conceptual

La dinámica de flujo y transporte de aguas subterráneas en los acuíferos que conforman la cuenca del Campo de Cartagena es altamente compleja debido al alto grado de heterogeneidad que presenta. El relleno sedimentario de la cuenca está compuesto principalmente por margas con intercalaciones de calizas, areniscas y conglomerados, que fueron depositados en el periodo transcurrido entre el Tortonense y el Cuaternario. Las arenas y conglomerados del Tortonense, las calizas del Mesiniense y las areniscas del Plioceno conforman los acuíferos profundos, mientras que los sedimentos del Cuaternario constituyen el acuífero superficial.

En este estudio se ha definido un modelo conceptual del acuífero cuaternario y pliocuaternario que está conectado a una masa de agua salada a través de la laguna del Mar Menor, asumiendo una desconexión con las unidades acuíferas inferiores. Esta hipótesis se fundamenta tanto por los datos históricos de niveles de los acuíferos inferiores como por la presencia de una capa continua de margas y evaporitas del Plioceno de muy baja permeabilidad con funcionamiento de acuitardo (Contreras et al., 2017).

Los procesos que se han considerado para reproducir el funcionamiento hidrogeológico del sistema son la recarga por infiltración de agua de lluvia y excedentes de riego, la descarga hacia la laguna y hacia el sur por el sector de Cartagena y la descarga a partir de la extracción histórica del acuífero cuaternario. La interacción entre aguas superficiales y subterráneas no se ha tenido en cuenta en este estudio por ser muy limitados los aforos en canales, rieras y ramblas, asumiendo que los aportes son relativamente pequeños en comparación con la recarga directa por precipitación e infiltración de excedentes de riego.

La evolución de niveles de los diferentes acuíferos del sistema da pistas sobre la dinámica histórica del mismo. Así, desde principios de 1920 la extracción se concentraba principalmente en el acuífero cuaternario, siendo máxima en la década de los años 60. A partir de entonces, y con el avance de la tecnología, hubo una profundización generalizada de los pozos, concentrándose la extracción en el acuífero plioceno y mesiniense, de mejor calidad, mostrando un descenso pronunciado en los niveles inferiores. A partir del trasvase Tajo-Segura en la década de los 80, las extracciones tanto del acuífero cuaternario como de los acuíferos profundos disminuyó produciendo un ascenso en los niveles piezométricos hasta la actualidad, ver Figura 3-1.

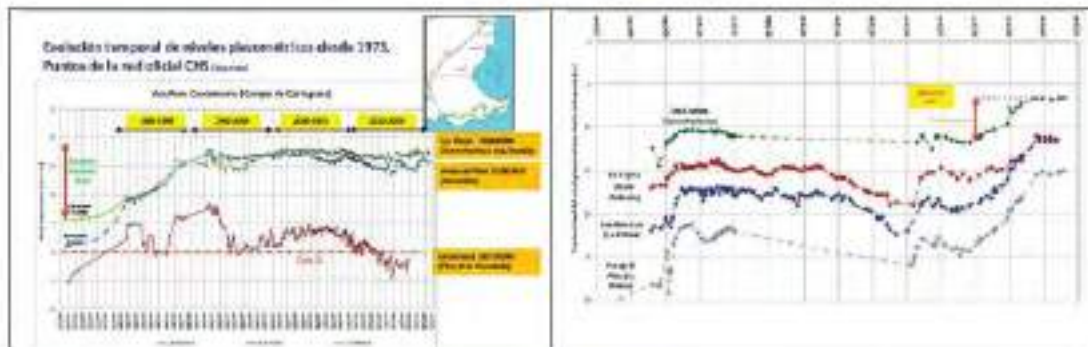
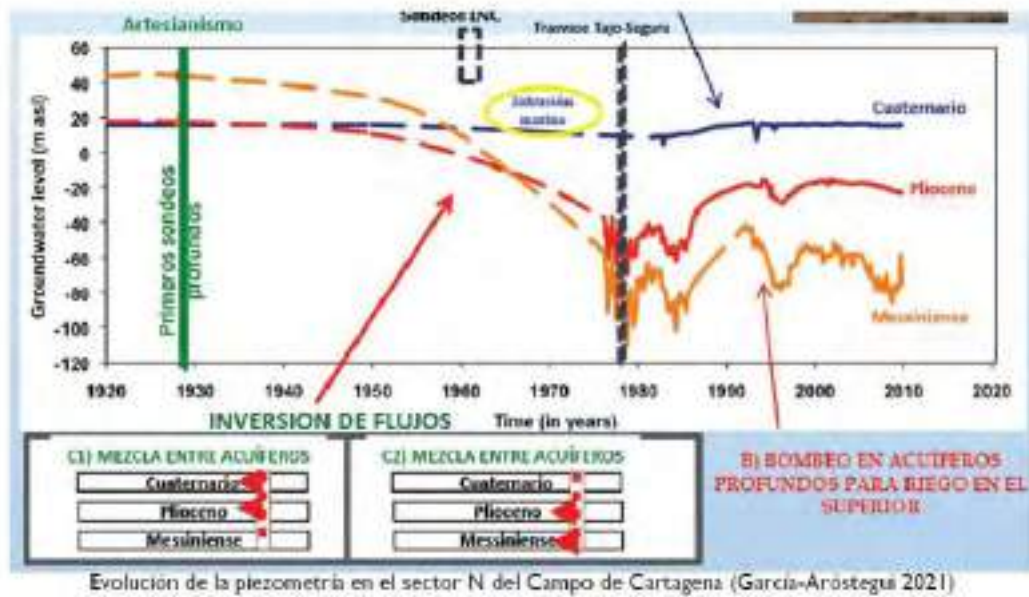


Figura 3-1: Evolución histórica de niveles en el sistema del Campo de Cartagena (García -Aróstegui, 2021).

4 Modelo numérico

4.1 Proceso de modelación numérica

El proceso de modelación numérica de un sistema acuífero es iterativo, y abarca varias etapas (Figura 4-1). La primera etapa consiste en la definición del modelo conceptual donde se caracterizan las unidades hidrogeológicas, la geometría (tridimensional) de dichas unidades, así como sus parámetros hidráulicos, y se evalúa el balance hídrico cuantificando las entradas y salidas del sistema (ver, por ejemplo, Barnett et al., 2012).

La segunda etapa consiste en definir el modelo numérico en base al modelo conceptual elaborado. En esta fase, se define el dominio, la discretización espacial, las condiciones de contorno adecuadas para reproducir el balance hídrico definido en el modelo conceptual y las condiciones iniciales.

Una vez definido el modelo numérico, se procede a definir un régimen estacionario. La simulación del modelo estacionario tiene dos funciones muy importantes; en primer lugar, realizar una primera calibración de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica en este caso) que permitan caracterizar el sistema acuífero; y, en segundo lugar, definir las condiciones iniciales para el modelo transitorio. Si una vez analizados los resultados (coherencia en cálculo de parámetros, ajustes y balance hídrico) éstos no son satisfactorios, se debe revisar nuevamente el modelo conceptual y redefinirlo. Si los resultados son satisfactorios, se procede a la siguiente fase de calibración transitoria del modelo.

En la calibración transitoria se ajustan los parámetros hidráulicos asociados al modelo transitorio (conductividad hidráulica y almacenamiento en este caso) considerando las variaciones temporales en las entradas y salidas del sistema. Posteriormente, se analizan los resultados en términos de ajustes de series temporales de nivel, coherencia de parámetros calibrados con respecto a los definidos en el modelo conceptual y coherencia del balance hídrico. Si los resultados no son satisfactorios, se debe revisar nuevamente el modelo estacionario, el modelo conceptual y realizar nuevamente las fases de calibración.

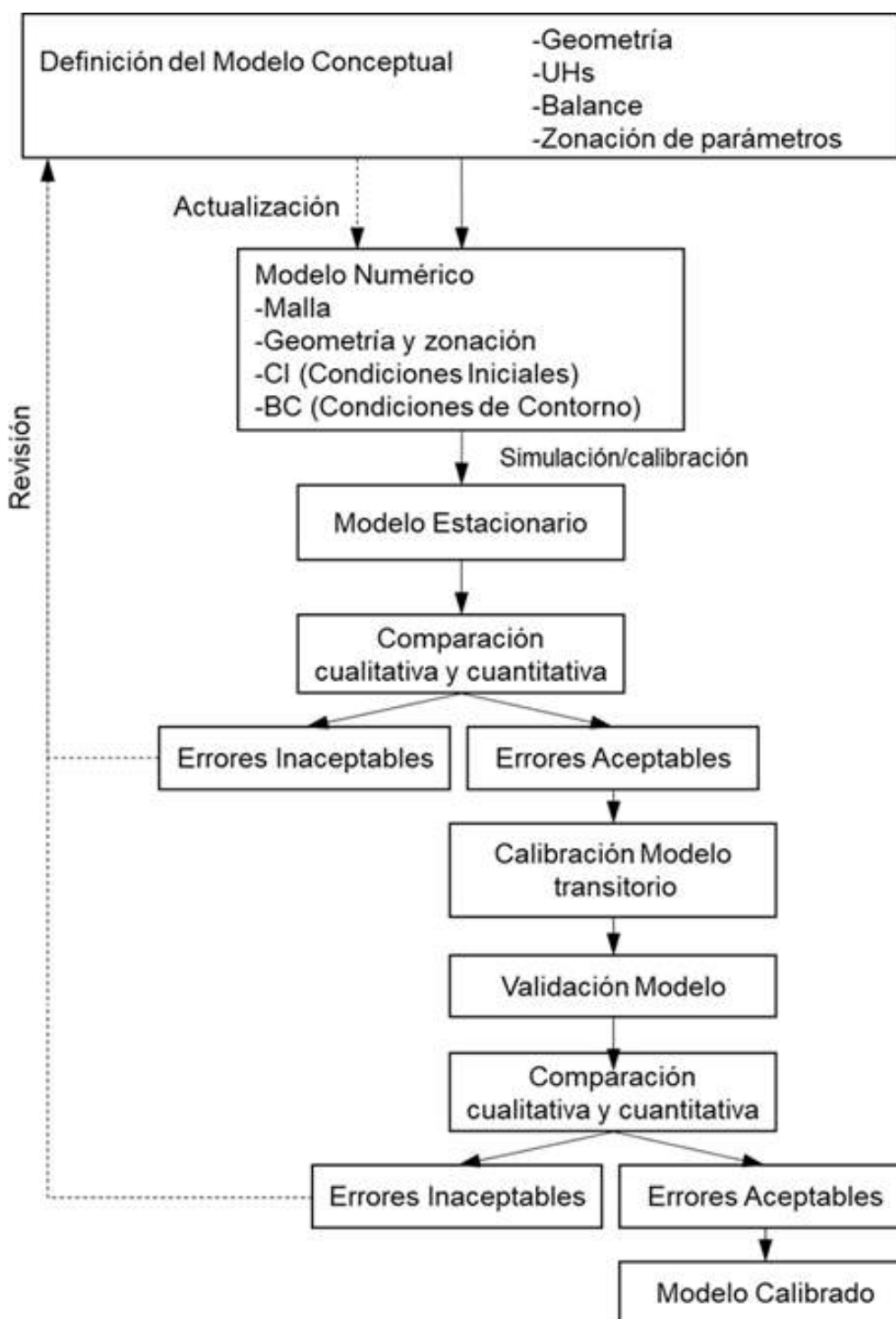


Figura 4-1: Diagrama del proceso de modelación numérica.

El modelo numérico se ha desarrollado en el software MODFLOW con la interfaz gráfica Groundwater Vistas versión 8.23 (GWV8). MODFLOW es uno de los códigos comerciales más utilizados y testados para la modelación de flujo y transporte de aguas subterráneas. La

justificación del empleo de este software se encuentra en que se pretende que sea empleado por los usuarios, que son además socios del proyecto, la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena.

Para el modelo numérico, se ha utilizado el motor de cálculo de MODFLOW-USG que permite el refinamiento de la malla en ciertas zonas específicas con una malla no estructural, y minimiza los errores de balance.

El presente modelo resuelve la ecuación de flujo saturado sin tener en cuenta efectos de densidad.

4.2 Dominio y geometría

4.2.1 Dominio

De forma específica, los límites del dominio del modelo numérico se han establecido en base a los siguientes criterios:

- **Límite superior o techo:** se ha considerado la superficie de terreno derivada a partir del DEM (IGN) de paso de malla de 50 m.
- **Límite inferior:** en base a la información generada durante la elaboración del modelo conceptual, se ha considerado la existencia de un límite impermeable desconectando el sistema del resto de unidades acuíferas profundas.
- **Límites laterales:** se ha limitado el acuífero a la extensión de las formaciones cuaternarias, a partir de las observaciones efectuadas durante la elaboración del modelo conceptual:
 - **Norte y Sur:** estos límites se han definido a partir de los afloramientos cuaternarios presentes en la zona de estudio. Cabe mencionar que el contorno de dichos afloramientos se ha suavizado para facilitar la discretización espacial, excluyendo del modelo al sur del sistema los afloramientos volcánicos.
 - **Este:** este límite está delimitado por la laguna del Mar Menor.
 - **Oeste:** este límite está definido por una barrera geológica (elevación del sustrato), coincidiendo con el límite oriental de la cuenca de la rambla de la Murta. Se han comprobado, por tanto, que no existe transferencia de flujo subterráneo desde la zona de Fuente Álamo al resto del Campo de Cartagena,

y se van a llevar a cabo trabajos adicionales al proyecto AQUIFER para mejorar el conocimiento hidrogeológico en dicha zona.

El dominio total del modelo tiene una extensión aproximada de 745 km². En la Figura 4-2 se muestra el dominio del modelo hidrogeológico numérico.



Figura 4-2: Dominio de modelación (línea negra) y límite de los afloramientos cuaternarios (línea roja) en la cuenca del Campo de Cartagena.

4.2.2 Geometría

Como se ha mencionado anteriormente, el límite superior queda definido por la superficie topográfica obtenida a partir del DEM de 50 x 50 m (IGN). Por otra parte, la cota de fondo y el espesor del acuífero se ha definido en base a ciertos antecedentes:

- Cartografía del IGME (1991) así como datos de columnas geológicas de dicha fuente.
- Antecedentes sobre la geometría y geología definidos por Jiménez-Martínez et al. (2012) y García-Aróstegui (com. pers.).

- Estudio de CHS-Tragsatec (2020). Se ha revisado tanto el mapa de espesores, así como las columnas litológicas de los sondeos existentes y perfiles geofísicos.
- Base de datos y columnas de la CHS <https://www.chsegura.es/es/cuenca/mar-menor/>.
- Sondeos obtenidos en los trabajos realizados en 2021 y 2022 por parte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

La Figura 4-3 muestra el espesor de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definida a partir de la revisión y reinterpretación de todos antecedentes previos. Como se observa, tanto en la franja más cercana al borde costero del Mar Menor como hacia el oeste del sistema y en la zona central, el espesor supera los 100 m, y se estrecha hacia el norte y particularmente hacia el sur, sector donde se encuentran los menores espesores alcanzando valores de hasta 5 m en el borde del modelo.

En la franja costera el acuífero cuaternario presenta espesores más reducidos hacia el sur, llegando a potencias inferiores a 20 m en zonas próximas al límite con la sierra. En la zona central el espesor alcanza valores por encima de los 100 m entre los ejes de las ramblas de Los Alcázares y del Albuñón (CHS-Tragsatec, 2020). En el límite norte se produce una reducción en el espesor de los materiales cuaternarios hasta llegar a valores cercanos a los 60 m en el límite del modelo. De este modo, el espesor promedio del sistema definido es del orden de 65 a 70 m (Figura 4-4).

Es importante mencionar que existe muy poca información (columnas, sondeos y datos de espesores), y por tanto mucha incertidumbre, sobre la geometría de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios en la parte oeste y sur del sistema. Dicha incertidumbre puede traducirse en parámetros poco realistas obtenidos a partir del proceso de calibración inducidos por errores geométricos asumidos en la construcción del modelo numérico.

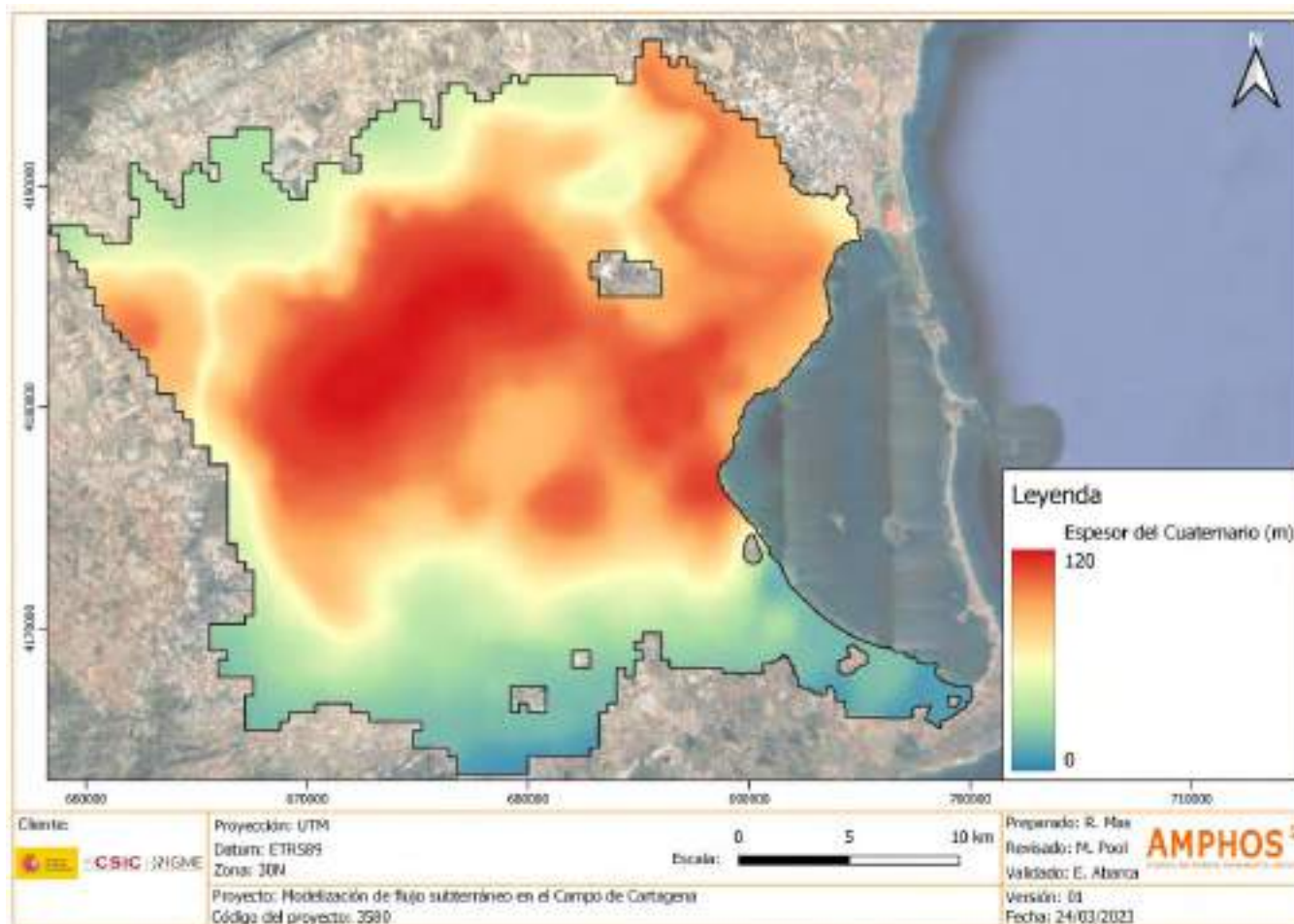


Figura 4-3: Espesor de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios considerado para el modelo numérico.

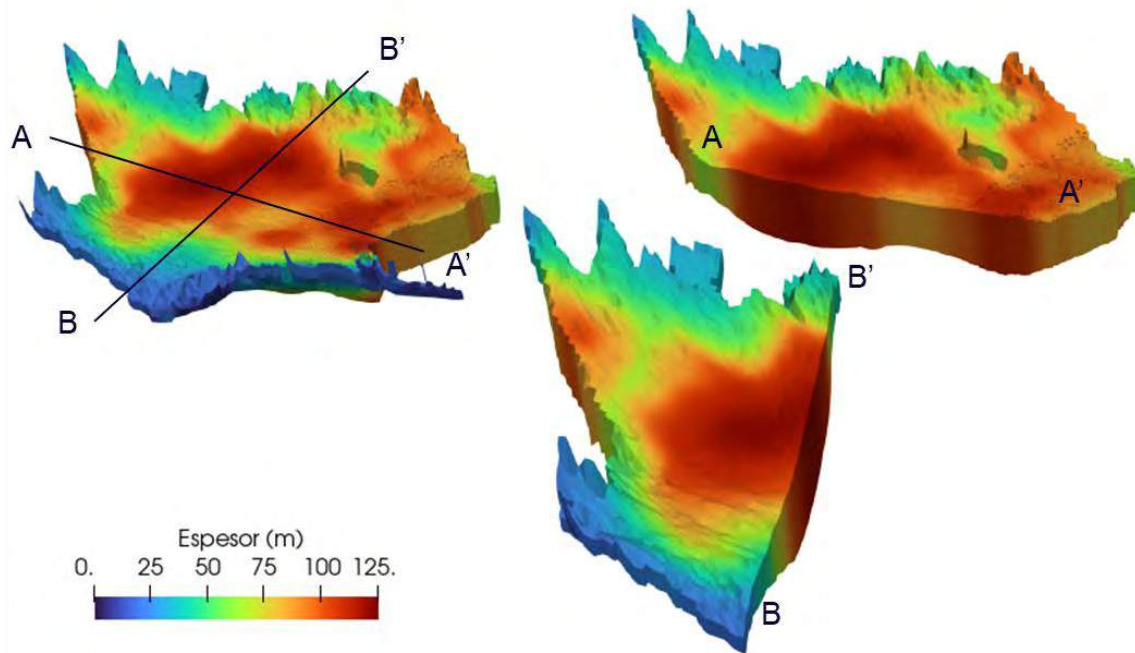


Figura 4-4: Vista 3d de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios considerados para el modelo numérico.

La topografía y la cota de fondo de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definidas en el modelo numérico se muestran en la Figura 4-5 y la Figura 4-6, respectivamente. En la Figura 4-7 se representan tres secciones verticales de norte a sur mostrando el espesor definido en el modelo numérico y el nivel piezométrico para el año 1961.

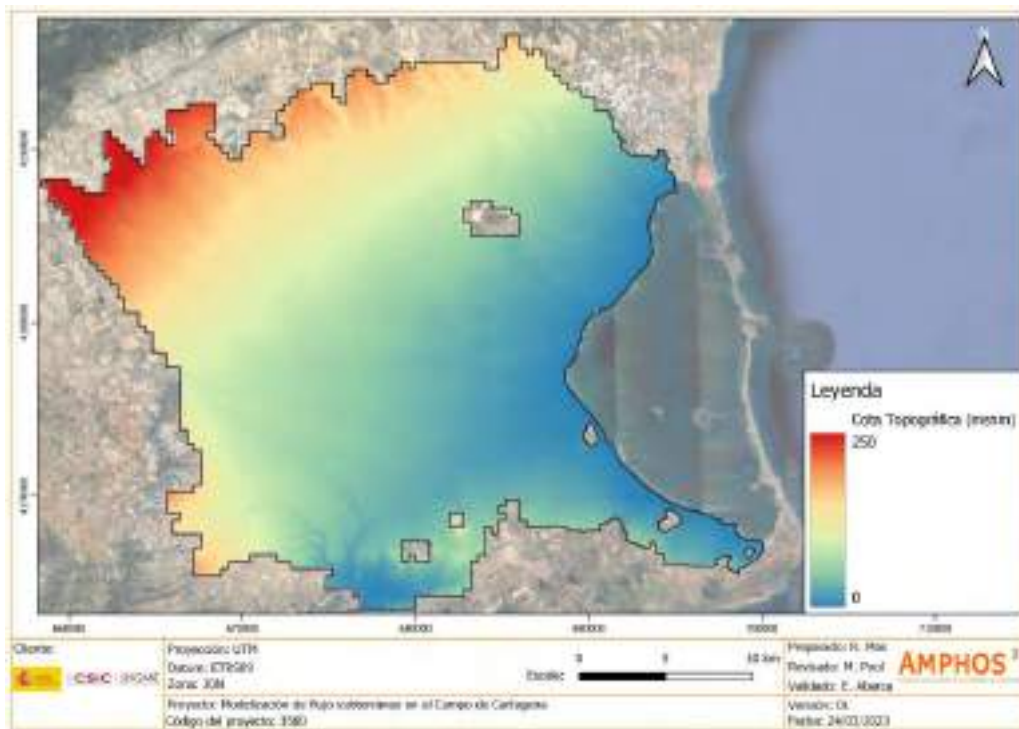


Figura 4-5: Topografía definida en el modelo numérico.

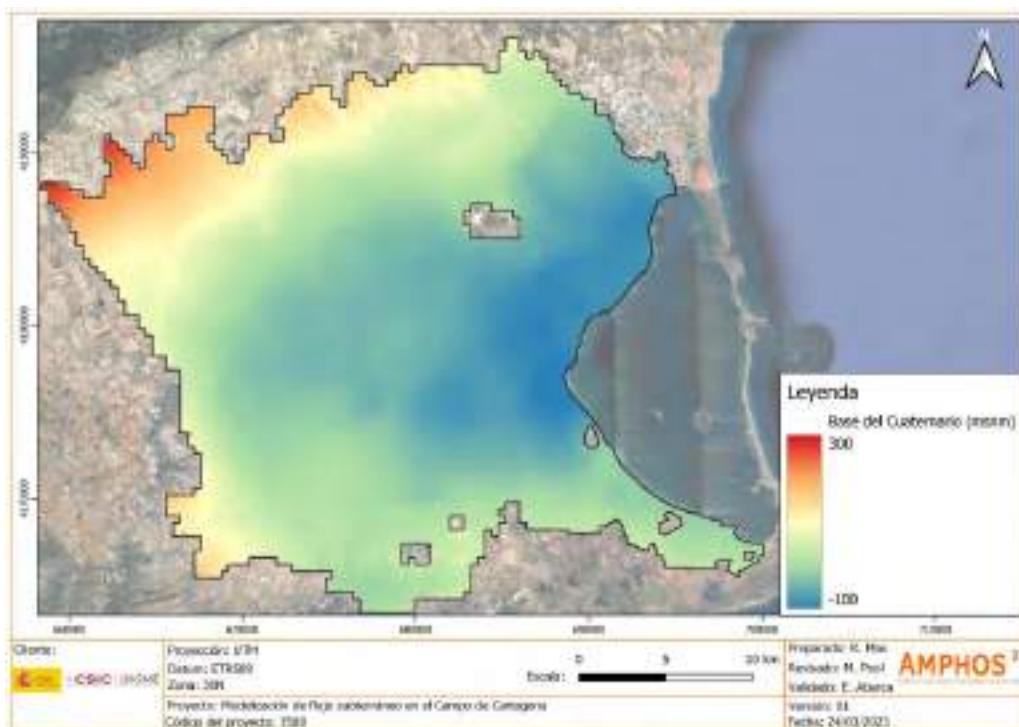


Figura 4-6: Cota de fondo de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definida en el modelo numérico.

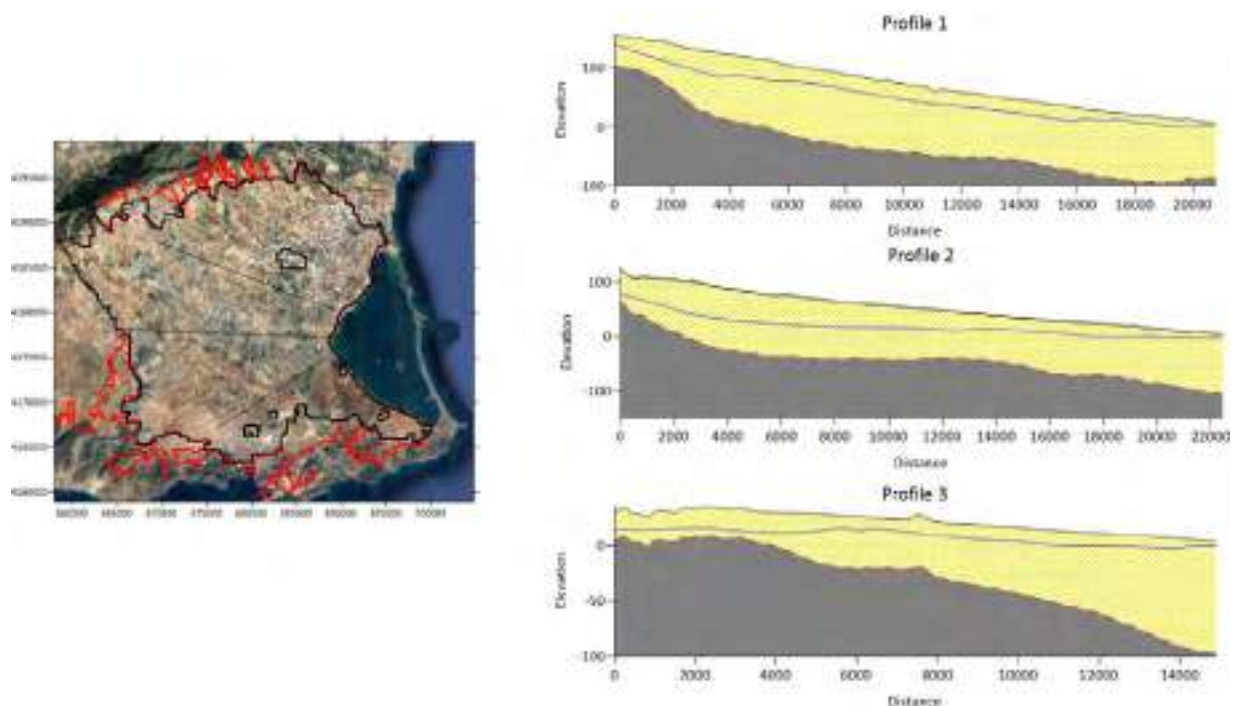


Figura 4-7: Secciones verticales de norte (profile 1) a sur (profile 3) indicando la potencia de los materiales cuaternarios y pliocuaternarios definidos en el modelo numérico.

4.3 Discretización espacial

Tanto la extensión como la orientación de la malla del modelo numérico se han definido con el objetivo de simplificar el análisis, mejorar la precisión de los resultados y contribuir a la convergencia y estabilidad numérica.

De forma específica, el modelo numérico considera únicamente una capa para representar los materiales cuaternarios y pliocuaternarios. La orientación de la malla es N-S (sin rotación) con un tamaño máximo de celdas en la horizontal de 400 x 400 m. En la franja costera, sector con mayor densidad de puntos de observación, se ha realizado una disminución del tamaño de elementos de forma gradual hasta alcanzar celdas de 50 x 50 m para obtener una mayor precisión en los resultados obtenidos de la modelación numérica. Para ello se utilizó el tipo de refinado *Quadtree Refinement* de MODFLOW USG el cual permite refinar sólo en el entorno de interés, con una malla no estructurada minimizando el número de celdas del modelo. El número total de celdas activas es de 67.635, ver Figura 4-8.

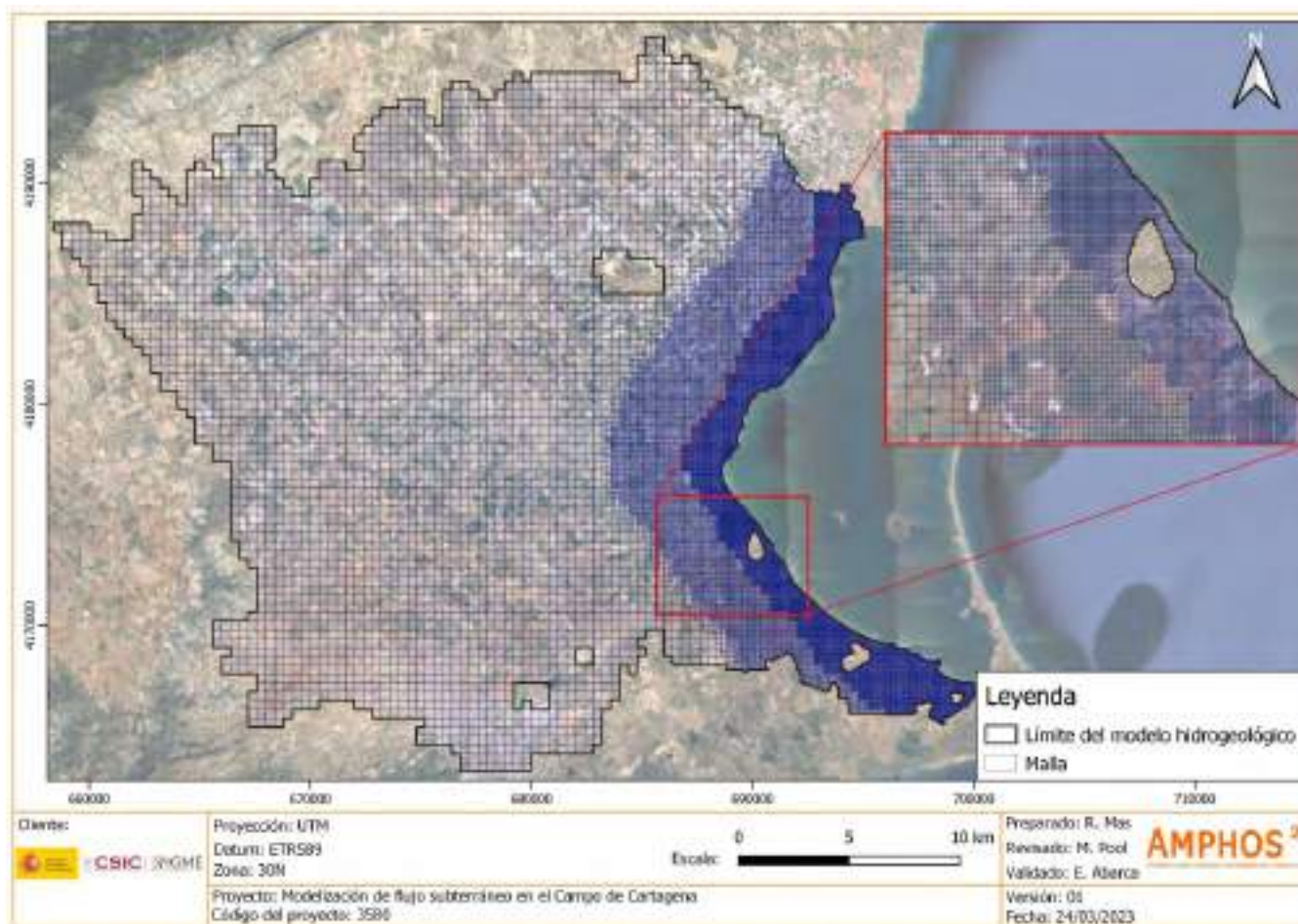


Figura 4-8: Malla definida en el modelo numérico y zoom en la franja costera con el refinamiento horizontal implementado.

4.4 Régimen y discretización temporal

El modelo numérico resuelve el flujo en medio saturado y pretende reproducir la evolución piezométrica del acuífero cuaternario desde que se encontraba en régimen natural hasta la actualidad. Para ello, la simulación considera un periodo de aproximadamente un siglo, con 1213 periodos de stress definidos. El primer paso de tiempo simula el régimen estacionario natural que representa el estado equilibrio previo al año 1920. Del paso de tiempo 2 al 1213 se simula el régimen transitorio con una discretización temporal mensual desde enero de 1920 a diciembre de 2020. El hecho de incluir el régimen estacionario y transitorio en la misma simulación ha permitido una realizar una calibración conjunta de ambos regímenes.

4.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definidas en el modelo numérico se describen detalladamente en los siguientes subapartados.

4.5.1 Flujo nulo

Primeramente, esta condición de borde se ha implementado en el modelo numérico mediante la imposición de celdas inactivas. Dichas celdas han sido definidas en base a los afloramientos volcánicos identificados en el modelo conceptual y en los bordes del acuífero a través de los cuales se asume que no existen flujos laterales. Dicha hipótesis se ha adoptado en base a que las aportaciones laterales de los acuíferos colindantes son muy pequeñas en comparación con la recarga por precipitación e infiltración de excedentes de riego. Por otro lado, en la base del modelo numérico no se ha definido ninguna condición de contorno, y, por tanto, por defecto se impone flujo nulo, considerando que no existe conexión con unidades acuíferas más profundas.

4.5.2 Nivel constante

Para representar la interacción del acuífero con la laguna, en todas las celdas que definen el contorno este se ha impuesto una condición de nivel prescrito (Dirichlet) igual a 0 m.s.n.m. Dicha condición de contorno se ha dividido en 15 segmentos para evaluar en detalle la descarga/recarga del acuífero a la laguna. Dicha división se ha realizado en base a las 'zonas de captura' definidas en Contreras et al. (2017), que integran la superficie que recarga y drena a una sección/frente de descarga subterránea codificadas según su lejanía a la desembocadura de la Rambla del Albuñón (Figura 4-9).



Figura 4-9: Celdas definidas y segmentos con condición de contorno de nivel prescrito para representar la conexión entre el acuífero y la laguna.

4.5.3 Condición mixta no lineal: Dren

En el modelo conceptual se ha definido una cierta descarga del acuífero al mar por el sector de la ciudad de Cartagena. Esta descarga se ha representado en el modelo mediante una condición de contorno de tipo mixta no lineal (paquete de Dren), la cual se ha asignado a 5 celdas del contorno sur del modelo, con un nivel prescrito de 0 m.s.n.m y una conductancia elevada (>9000 m²/d).

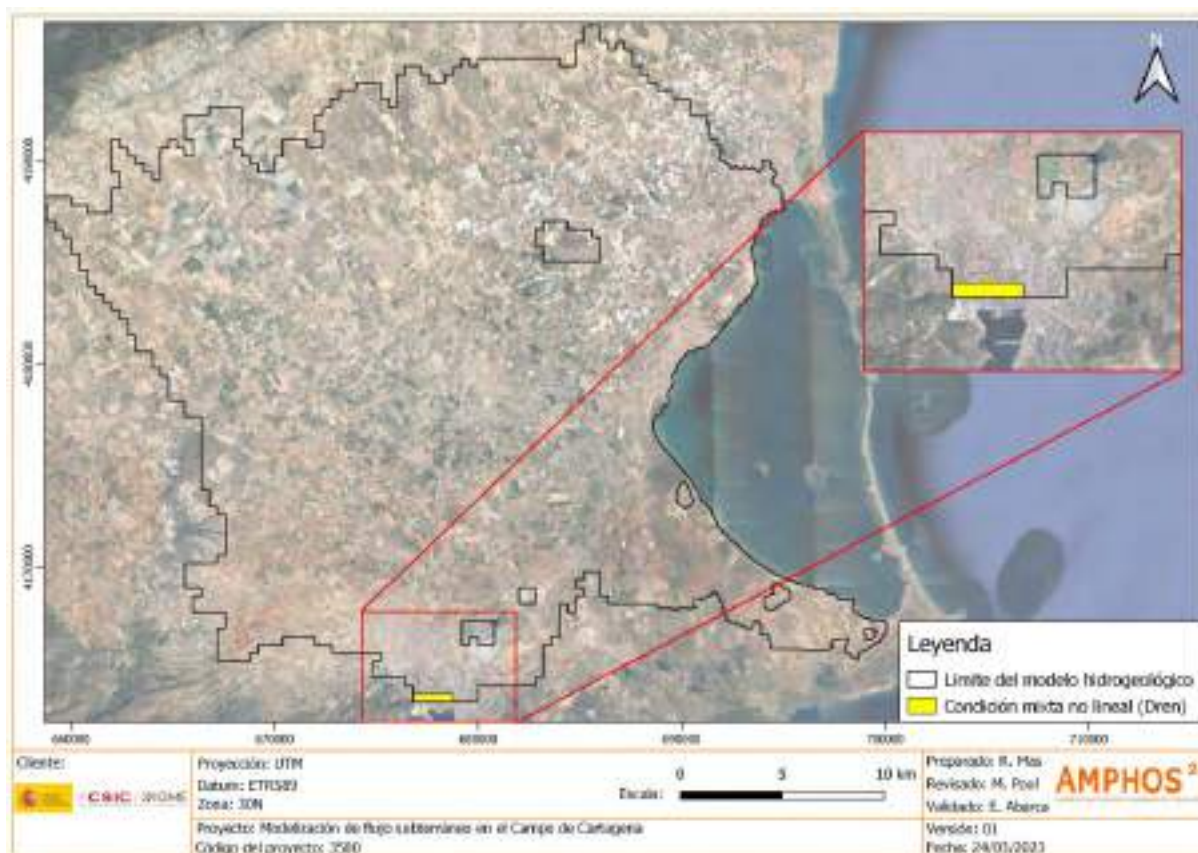


Figura 4-10: Celdas definidas en el límite sur con condición de contorno mixta no lineal para representar la descarga por el sector de Cartagena.

4.5.4 Recarga

La cuantificación de la recarga se ha realizado dentro de la actividad A1.3 del Proyecto AQUIFER. Dicha cuantificación se ha realizado mediante el código SPHY (*Spatial Processes in Hydrology*) que simula el balance de agua en el suelo. SPHY es un modelo hidrológico de libre acceso desarrollado por FutureWater usando lenguajes de código abierto (PCRaster, QGIS) (Terink et al., 2015).

SPHY-CC adopta un esquema tipo *bucket* que simula el balance de agua en la zona radicular, ver Figura 4-11. El modelo se aplica de manera espacialmente distribuida con un paso de tiempo diario. SPHY-CC resuelve el balance de agua mediante la ecuación de conservación de masas.

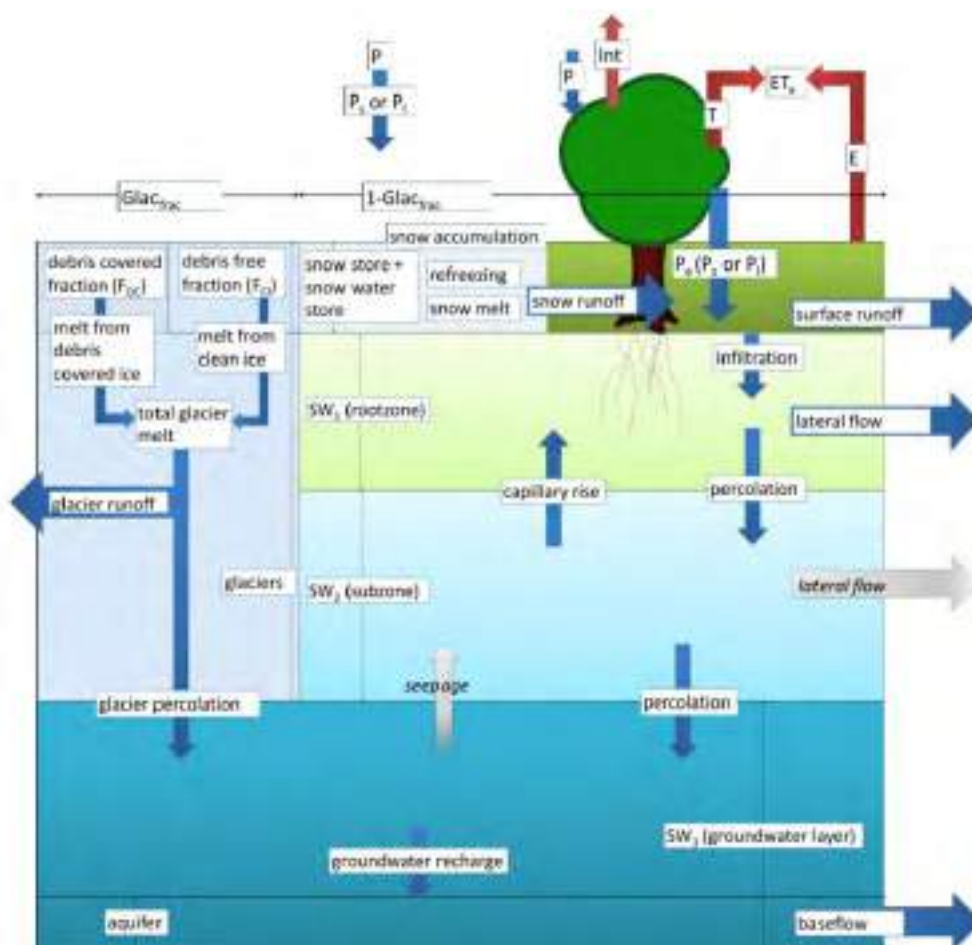


Figura 4-11: Conceptualización del balance en SPHY.

En el cálculo de la recarga se ha considerado primeramente la saturación (SAT) que se refiere al punto en el que el movimiento del agua está controlado principalmente por fuerzas gravitatorias. El agua fluye a través de los macroporos del suelo y hacia abajo a lo largo del perfil del suelo o lateralmente cuesta abajo. Por otro lado, se considera la capacidad de campo (FC) que representa el contenido de agua del suelo retenido contra la fuerza de la gravedad por fuerzas matriciales (en microporos y mesoporos) a una tensión de -0,033 MPa. El agua retenida entre la saturación suele estar sujeta a drenaje libre durante períodos cortos de tiempo y generalmente se considera no disponible para las plantas. Esta agua libre se denomina porosidad drenable. En contraste, gran parte del agua retenida en la capacidad de campo está disponible para la absorción y uso de las plantas a través de la evapotranspiración. El punto de marchitez permanente (PWP) representa el estado en el que las fuerzas matriciales retienen el agua con demasiada fuerza para la extracción de las plantas (-1,5 MPa). El agua retenida entre la FC y el PWP está retenida contra la fuerza de la gravedad, pero no con tanta fuerza como para impedir su extracción por las plantas. Sin embargo, el agua retenida a potenciales por debajo de PWP (< -1,5 MPa) no está disponible

para la mayoría de las plantas. Una condición de humedad del suelo intermedia entre la FC y el PWP, llamada punto DRY, determina el umbral de humedad del suelo por debajo del cual las plantas comienzan a sufrir estrés y la evapotranspiración se reduce por un factor de agotamiento del estrés. Desde DRY hasta FC, la evapotranspiración se lleva a cabo a su máxima tasa impulsada por la evapotranspiración potencial.

En el modelo SPHY de Campo de Cartagena, los cuatro parámetros mencionados anteriormente, es decir, SAT, FC, DRY y PWP, se estimaron utilizando funciones de pedotransferencia que utilizan la textura del suelo (fracción relativa de arena, limo y arcilla), la densidad aparente y la materia orgánica como principales predictores.

Finalmente, otro parámetro clave que controla el flujo de agua en el suelo se refiere a la conductividad hidráulica saturada, Ksat. Este parámetro también fue calculado utilizando una función de pedotransferencia que toma la textura del suelo, la densidad aparente y la materia orgánica como principales predictores.

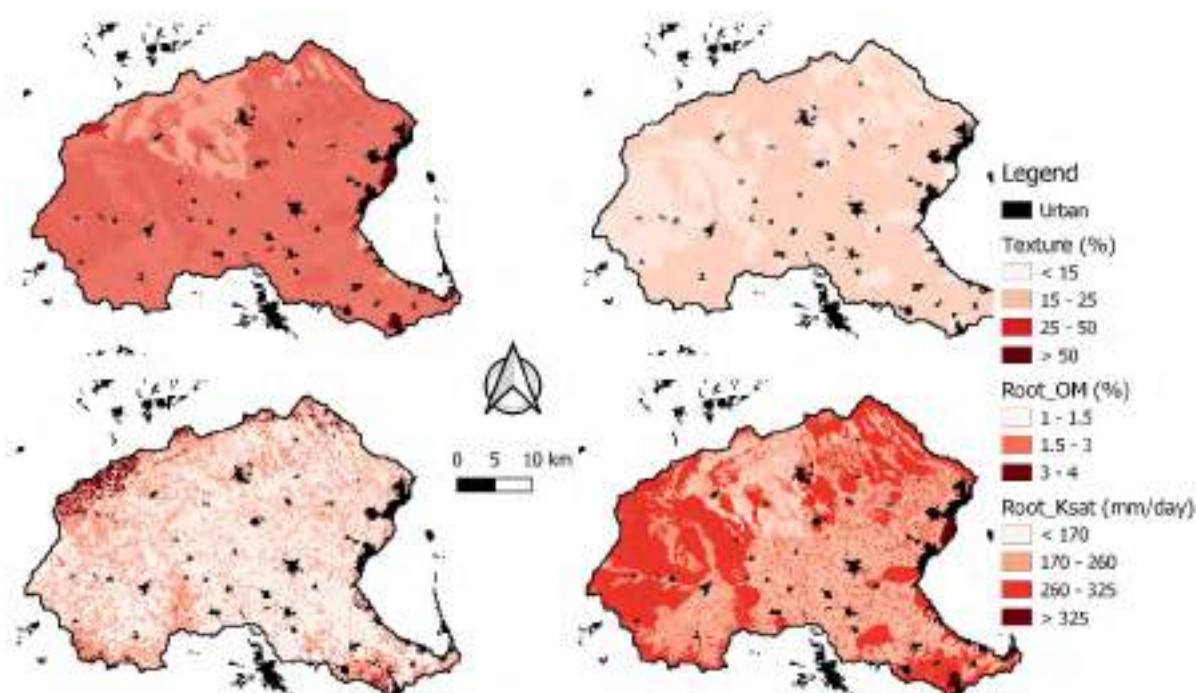


Figura 4-12: Parámetros de suelo y raíces utilizados en el modelo SPHY de Campo de Cartagena. Arriba a la izquierda: contenido de arena (%); arriba a la derecha: contenido de arcilla (%); abajo a la izquierda: contenido de materia orgánica (%); abajo a la derecha: conductividad hidráulica saturada (mm/día).

Para el cálculo se han recopilado y preparado tres mapas de uso de suelo y cobertura vegetal correspondientes a los años 1977, 2000 y 2020 para los propósitos de este estudio. Estos mapas se han considerado como representativos suficientes de los períodos de 1951-1980,

1981-2000 y 2001-2020. Los datos espaciales se han recopilado de tres fuentes: 1) para 1977, el Mapa de Cultivos y Usos a escala 1:50.000 desarrollado por MAGRAMA; 2) para 2000, el mapa de cobertura vegetal elaborado por Carreño et al. (2015) mediante la clasificación de imágenes del satélite Landsat, y 3) para 2020, el proyecto CEBAS SIOSE.

Finalmente se han definido 45 zonas en el modelo numérico con una tasa de recarga variable desde enero de 1951 a diciembre de 2020, ver Figura 4-13. Como la simulación abarca el periodo desde 1920 a 2020, para el relleno de la serie previo a 1951 se han repetido décadas húmedas y secas. De este modo, para la década de 1920 a 1930 se ha adoptado la recarga evaluada para la década de 1960 a 1970. Para la década de 1930 a 1940 se ha adoptado la recarga evaluada para la década de 1950 a 1960. Finalmente, para la década de 1940 a 1950 se ha adoptado la recarga evaluada para la década de 1960 a 1970. Para la simulación estacionaria previa a 1920 se ha tomado para cada zona la tasa promedio de toda la serie calculada, ver Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Recarga promedio (tasa en mm/año) para todo el periodo simulado en cada zona de recarga.

Zona	Tasa promedio	Zona	Tasa promedio	Zona	Tasa promedio	Zona	Tasa promedio
1	131	13	99	25	77	39	73
2	102	14	99	26	91	40	58
3	124	15	106	27	91	41	175
4	157	16	91	28	80	42	77
5	124	17	106	29	102	43	80
6	84	18	124	30	99	44	117
7	95	19	113	31	157	45	102
8	110	20	128	32	157	46	102
9	102	21	131	33	99	47	69
10	95	22	135	34	84		
11	95	23	113	37	77		
12	95	24	84	38	84		

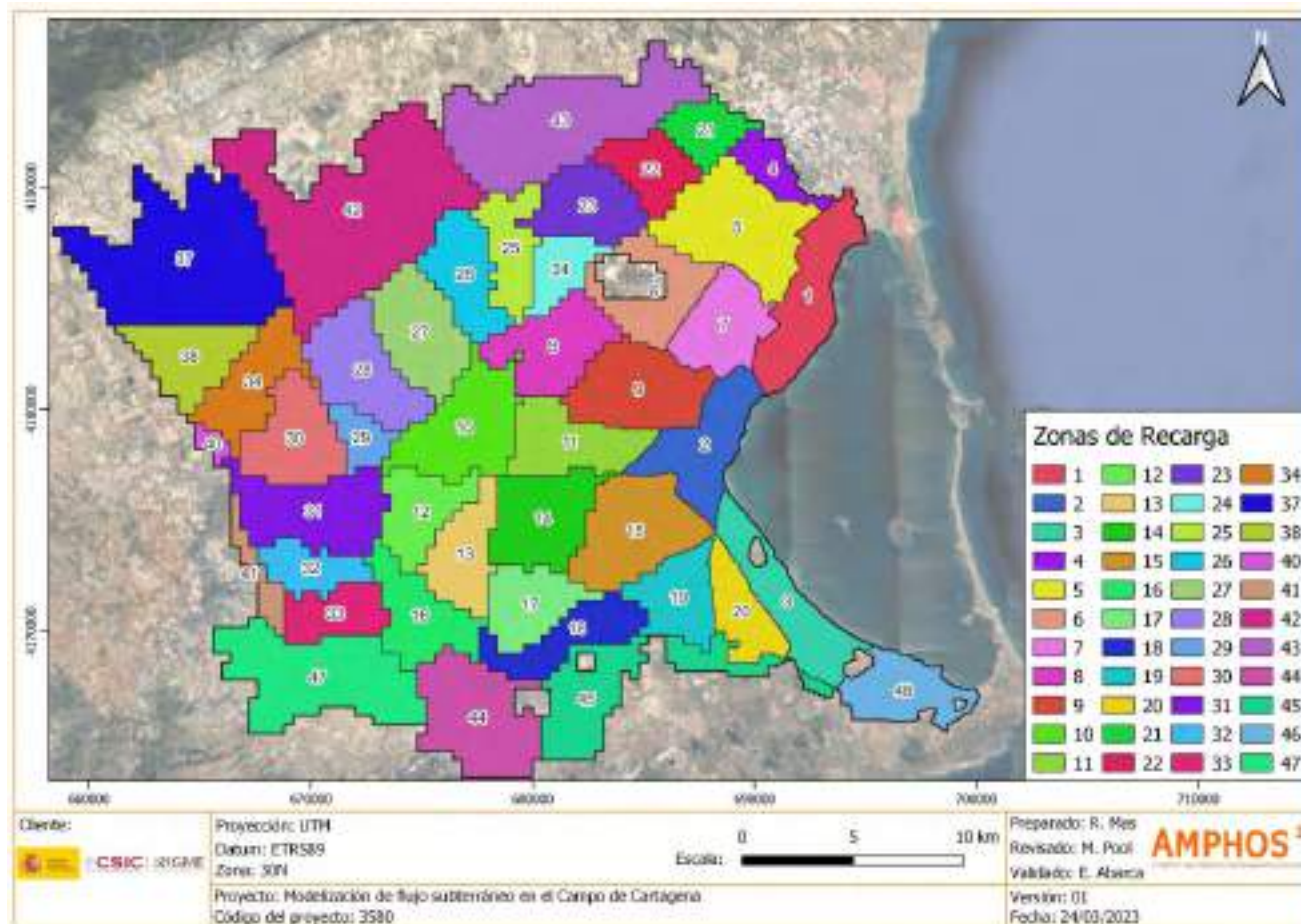


Figura 4-13: Zonas de recarga definidas en el modelo numérico.

4.5.5 Extracciones

Existe muy poca información detallada sobre el bombeo histórico en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena. Es por ello, y porque consideran periodos de simulación menores que los considerados en este proyecto, que los modelos numéricos recientes no han considerado dicha extracción como parte de la descarga del acuífero (Contreras et al., 2017; CHS-Tragsatec, 2020).

En este proyecto se ha considerado la reconstrucción temporal de la explotación por bombeo presentada por Domingo-Pinillos (2019). Dicha reconstrucción se realizó a partir de los PHCS (1998, 2007, 2014, 2016) de la CHS, de estudios del IGME (1989, 1991, 1994), de datos estadísticos de la CRCC y otros datos históricos contenidos en diversas fuentes. Con todos estos antecedentes, Domingo-Pinillos (2019) presentaron la demanda bruta teórica tanto para el acuífero cuaternario como para los acuíferos más profundos. Para establecer la demanda real satisfecha y los volúmenes extraídos del acuífero cuaternario, se estimó porcentaje medio de demanda satisfecha del 85%.

Con estas consideraciones, se obtuvo la extracción por bombes en el Cuaternario desde 1925 a 2018, ver Figura 4-14. Como se observa en la figura, la extracción en el Cuaternario aumentó hasta los años 50. A partir de esta fecha, las nuevas tecnologías permitieron la profundización de los pozos y, consecuentemente, comenzaron a bombearse los acuíferos de mejor calidad del Plioceno y Mesiniense, decreciendo el bombeo de la capa cuaternaria, excepto en varios periodos de sequía posteriores.

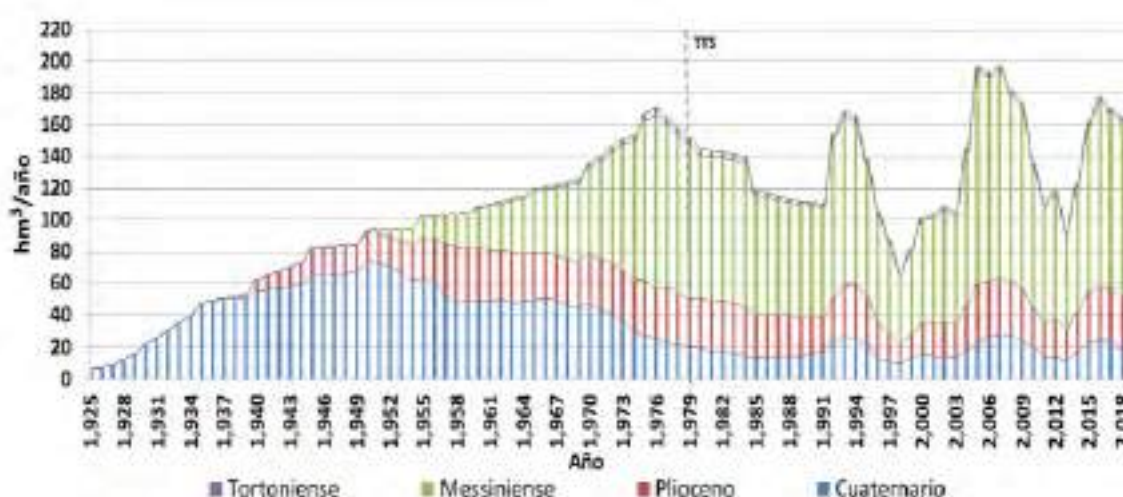


Figura 4-14: Evolución temporal de las extracciones en los acuíferos del Campo de Cartagena (Domingo-Pinillos, 2019).

Para distribuir este bombeo, se considera la distribución actual a partir de la información del Registro de Aguas de la CHS para el año 2020/2021. Esta información permite observar los sectores con mayor densidad de puntos de agua, ubicados principalmente en la zona sur del sistema (Figura 4-15).

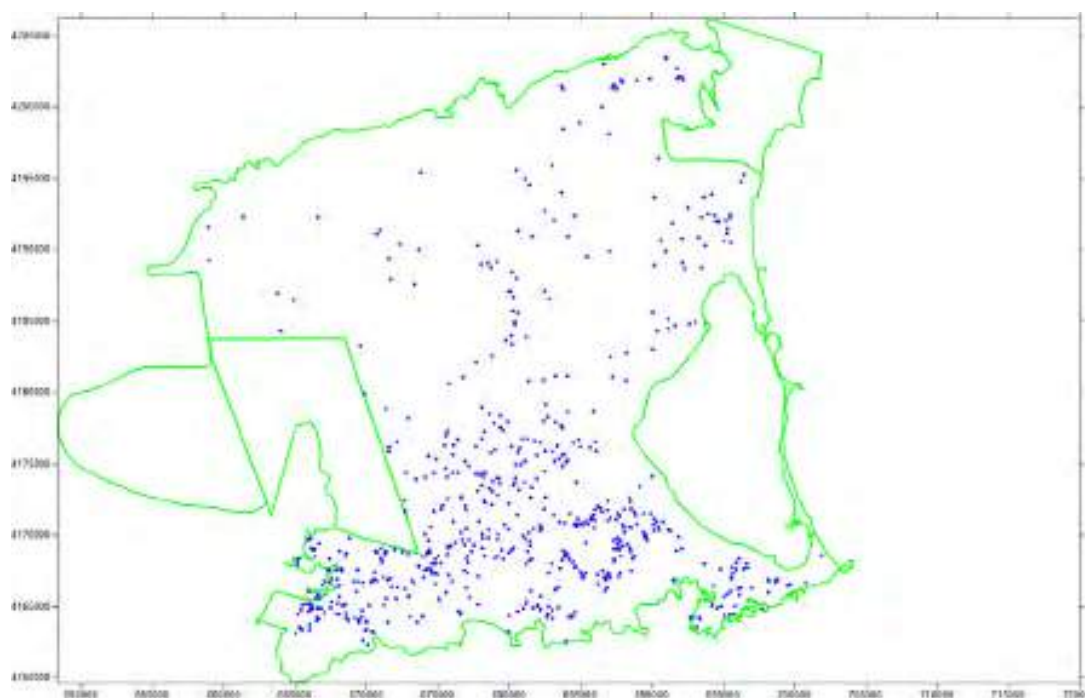


Figura 4-15: Pozos de extracción en el Cuaternario a partir del registro de Aguas de la CHS para el año 2020/2021.

En el modelo numérico se han distinguido distintas zonas de extracción y se ha aplicado una condición de contorno de flujo prescrito. La delimitación de zonas en el sector sur se ha definido en función de las diferentes zonas de recarga. En la franja costera tanto al sur, en la zona central y en el norte, se han distinguido ciertas zonas en función de la densidad de puntos del Registro de Aguas de la CHS. Finalmente se ha definido una zona de extracción central y una zona norte ubicada en el sector del pozo Los Tomases, ver Figura 4-3.

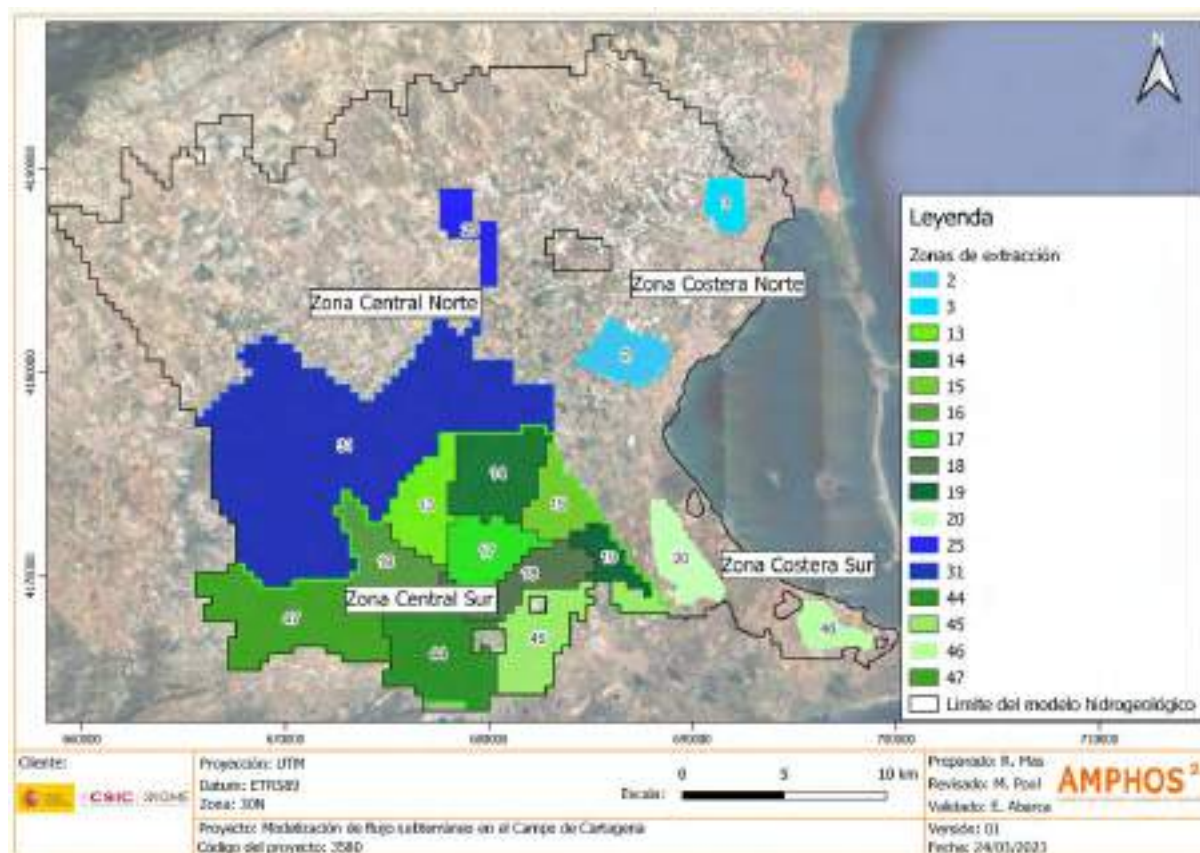


Figura 4-16: Zonas de extracción definidas en el modelo numérico.

El sector sur integra más del 50% de la extracción total del Cuaternario y engloba 12 zonas diferentes. En cada zona se impuso un cierto porcentaje de explotación evaluado con respecto a los derechos totales considerados para el año 2021. Es decir, debido a la falta de información histórica, se ha considerado que la extracción en el pasado sigue una distribución y reparto similar al observado actualmente en el Registro de Aguas de la CHS. De este modo, para el sector sur, el porcentaje de reparto considerado muestra las zonas 19, 18, 46, 14, 20 y 45 con una mayor proporción de extracción, según derechos (Tabla 4-2). Tanto para la zona central, como para la franja costera, se calibró un porcentaje de toda la serie propuesta por Domingo-Pinillos (2019), repartida de forma uniforme.

Tabla 4-2: Zonas de extracción dentro del sector sur y porcentaje de explotación en función de los derechos obtenidos a partir del registro de Aguas de la CHS.

Zona	Porcentaje de explotación (%)	Zona	Porcentaje de explotación (%)
18	14,6	15	8,7
19	13,8	17	6,3
46	12,4	16	3,4
14	11,8	13	2,6
20	11,6	47	1,7
45	11,6	44	1,4

Para la imposición de la condición de contorno de flujo prescrito en cada zona, se han considerado posibles pérdidas de carga dentro del pozo. Así, el caudal de extracción puede disminuir con respecto al impuesto si el nivel freático disminuye dentro del pozo. Para ello, se ha implementado la condición “*Automated flux reduction for well modflow*” (MODFLOW-USG). Dicha condición compara la cota del nivel freático con la cota superior e inferior de la rejilla definida para el pozo. De este modo, (i) si el nivel piezométrico dentro del pozo está por debajo de la cota superior de la rejilla, el caudal de extracción disminuye con respecto al impuesto mediante una fórmula cúbica y su derivada, (ii) si el nivel piezométrico dentro del pozo está por encima de la cota superior de la rejilla, el caudal de extracción es igual al impuesto, y (iii) si el nivel piezométrico dentro del pozo está por debajo de la cota inferior de la rejilla (representando un secado del pozo) el caudal de extracción considerado es cero. Debido a la escasez de información sobre las profundidades de los tramos de filtro, todos los pozos en el modelo numérico se han simulado como totalmente penetrantes. De este modo, la cota superior de la rejilla corresponde con la topografía y la cota inferior con la base del acuífero simulado.

4.6 Condiciones iniciales

Aunque la simulación en estado estacionario requiere de una condición de niveles inicial como punto de partida, el resultado es independiente de la misma. Por otro lado, para la simulación transitoria la condición inicial se corresponde con la solución de distribución de niveles obtenida a partir de la simulación en régimen estacionario.

4.7 Parámetros

Para obtener los parámetros hidráulicos del área de estudio, se ha efectuado la revisión e interpretación de las pruebas de bombeo disponibles de estudios anteriores (IGME, 1991; CHS-Tragsatec, 2020) concentradas fundamentalmente en la franja costera.

Existe una fuerte dispersión de valores de parámetros hidráulicos de los materiales que constituyen el acuífero cuaternario y pliocuaternario. Esto es debido al grado de heterogeneidad que presenta con sedimentos tipo margas con intercalaciones de calizas, areniscas y conglomerados de diferentes propiedades hidráulicas. Los valores de transmisividad muestran una dispersión de hasta 3 órdenes de magnitud, con valores entre 1 m²/d y hasta 1500 m²/d (CHS-Tragsatec, 2020). Para el coeficiente de almacenamiento se han obtenido valores entre 0,1 y 0,01 propios de acuífero libre y que caracterizan a materiales sedimentarios superficiales.

4.8 Puntos de observación

Para la calibración del modelo numérico se han incluido un total de 48 puntos de observación, de los cuales 4 disponen de un registro de medidas de larga duración (Figura 4-17 y Tabla 4-3).

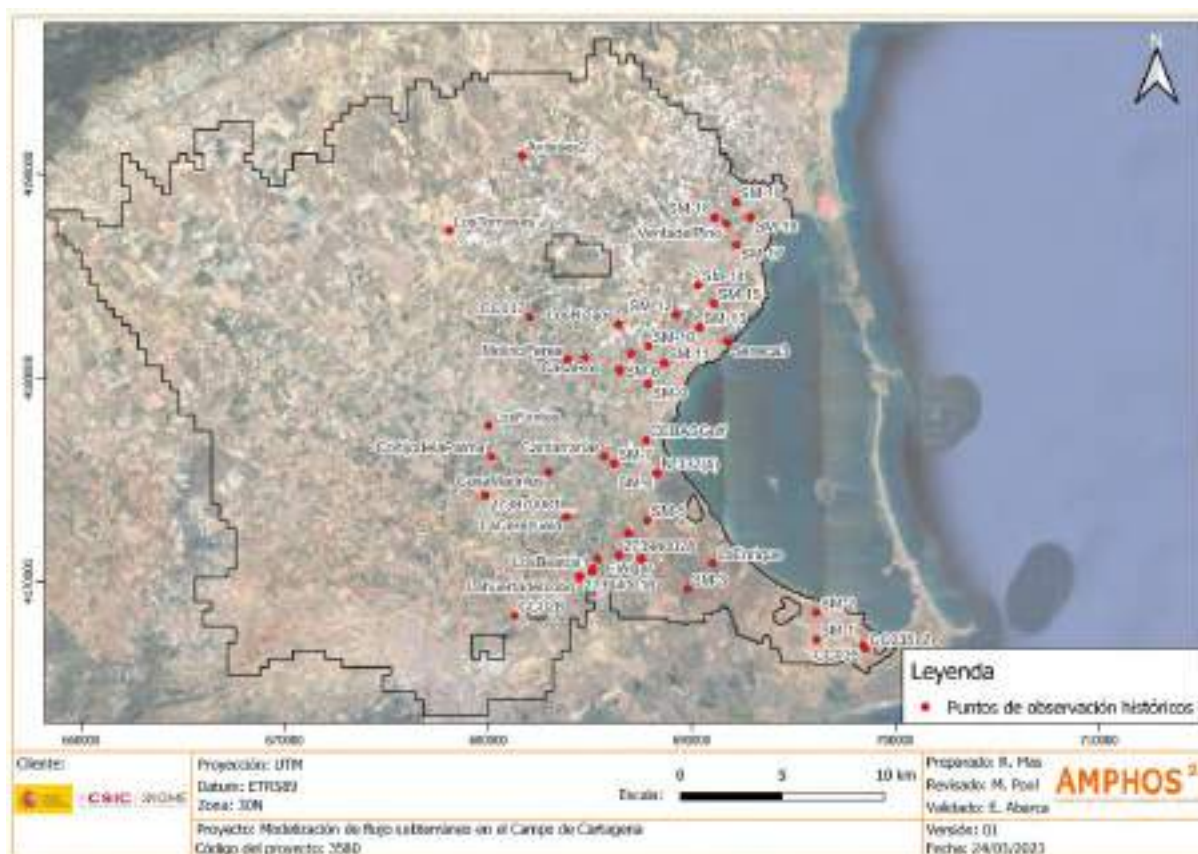


Figura 4-17: Puntos de observación del modelo numérico.

Tabla 4-3: Pozos de observación incluidos en el modelo numérico (ETRS89 UTM30N).

Nombre	X	Y	Nombre	X	Y
SM-1	696114	4167157	Los Blases	686436	4180431
SM-2	696118	4168478	Casa Carrión	687021	4181184
SM-3	689807	4169643	Casa Ros	684744	4180944
SM-5	687820	4173006	273870081	679856	4174237
SM-6	688301	4175307	Cortijo de Palma	680142	4176139
SM-7	686183	4175778	Casa Madriles	682965	4175392
SM-8	686524	4180315	CEBAS Golf	687747	4176933
SM-9	687858	4179694	273940016	684492	4170270
SM-10	687866	4181534	Los Beatos1	685111	4170514
SM-11	688633	4180717	273940021Bis	685138	4170618
SM-12	689231	4183083	273940028	686443	4171301
SM-13	690383	4182461	El Algar	687538	4171093
SM-14	690314	4184531	Los Beatos2	685374	4171119
SM-15	691086	4183647	VentadelPino	691717	4187562
SM-16	691130	4187866	Los Rizaos	686397	4182641
SM-17	692202	4186529	LahuertadelLobo	684493	4170184
SM-18	692176	4188621	Cantarranas	685692	4176140
SM-19	692896	4187871	CC028	681306	4168339
N-332(4)	688323	4175318	CC035	698405	4166857
Seneca3	691746	4181767	CC035_2	698531	4166709
Los Fontes	680021	4177650	CC037	682021	4182964
MolinoPerea	683897	4180900	Los Castillos	686884	4172378
Avileses2	681690	4190909	La Cerezuela	683827	4173180
LosTomases	678098	4187234	Lo Enrique	691036	4170900

Adicionalmente, se dispone de una piezometría definida para el año 1961 facilitada por el IGME. Con el objetivo de incluir esta información en el ejercicio de calibración, se han incluido en el modelo numérico un total de 68 puntos de observación virtuales con una distribución homogénea cuya medida de nivel se ha inferido a partir de la digitalización de dicha piezometría, ver Figura 4-18.



Figura 4-18: Puntos de observación virtuales incluidos en el modelo numérico con medida de nivel a partir de la piezometría del año 1961.

4.9 Calibración

El objetivo de la calibración de un modelo numérico consiste en caracterizar y cuantificar los parámetros hidráulicos del sistema, en este caso la conductividad hidráulica y el almacenamiento, de modo de reproducir las variables observadas, en este caso los niveles piezométricos.

Para el proceso de calibración se ha adoptado un enfoque estocástico por puntos piloto. Esta metodología, consiste en ingresar una serie de puntos piloto, a los cuales se les asigna un valor estimado y un rango de la variable a calibrar. La variable en cada punto piloto es calibrada minimizando el error entre los niveles calculados y medidos, para luego ser interpolada mediante kriging para generar un campo heterogéneo de la variable en cuestión.

Para la calibración estocástica se utilizó el código PEST (Doherty et al., 2010a, 2010b). En PEST, la calibración se implementa a través de la minimización de una función objetivo de mínimos cuadrados (suma al cuadrado de residuales ponderados entre niveles calculados y medidos). En esta aplicación, la estimación de parámetros se llevó a cabo utilizando tanto la

Descomposición en Valores Singulares truncada (SVD-Assist) (Doherty, 2004) como la regularización de Tikhonov (Doherty, 2003) para proporcionar estabilidad y unicidad a la aproximación matemática. La técnica SVD-Assist permite reducir el número de parámetros a estimar a un número específico de 'súper parámetros'. Para acelerar el proceso de calibración, se utilizó el código BeoPEST. BeoPEST es una versión paralela del software de calibración PEST para ejecutar múltiples simulaciones simultáneas.

En primer lugar, para realizar la calibración estocástica, se debe definir una malla de puntos piloto. Para cada punto piloto, se especifica un valor máximo y mínimo para la variable a calibrar. Se definió una mayor densidad de puntos piloto en las zonas del dominio del modelo donde se encuentran los pozos de observación y teniendo al menos dos o tres puntos piloto por rango de correlación (Gómez-Hernández et al., 1997). La densidad de puntos piloto se relajó en áreas donde hay pocos datos disponibles.

Los parámetros que se han calibrado han sido la permeabilidad y el almacenamiento. Para la calibración de la permeabilidad, ciertos puntos piloto se ubicaron entre los pozos de medición y las condiciones de contorno en la dirección del flujo de agua subterránea. Para la calibración del almacenamiento se adoptó la misma malla de puntos definida para la permeabilidad, incluyendo nuevos puntos piloto localizados en la misma localización de los pozos de observación (Doherty et al., 2010a).

En segundo lugar, se debe definir como información previa un variograma ajustado a las mediciones de las variables a estimar, especificando el rango, la relación de anisotropía y la orientación. Adicionalmente, se deben especificar el radio de búsqueda y los puntos mínimo y máximo para la interpolación espacial por kriging.

Debido a la escasez de medidas in situ de permeabilidad, se definió un variograma teórico isotrópico y exponencial. El rango, que es la distancia en la que el variograma alcanza su valor máximo, representa la máxima distancia a la que la variable está correlacionada espacialmente. En este caso, se asumió un rango amplio para obtener patrones geológicos elongados y conectados, que son comunes en este tipo de ambientes sedimentarios. Para el kriging, se definió un número mínimo de 2 y un máximo de 7 puntos piloto.

La Figura 4-19 muestra la distribución espacial de los puntos piloto con un total de 217 para la calibración de la permeabilidad. Como se observa, existe una alta densidad de puntos piloto en la parte central del sistema y franja costera, donde se ubican la mayoría de las observaciones.

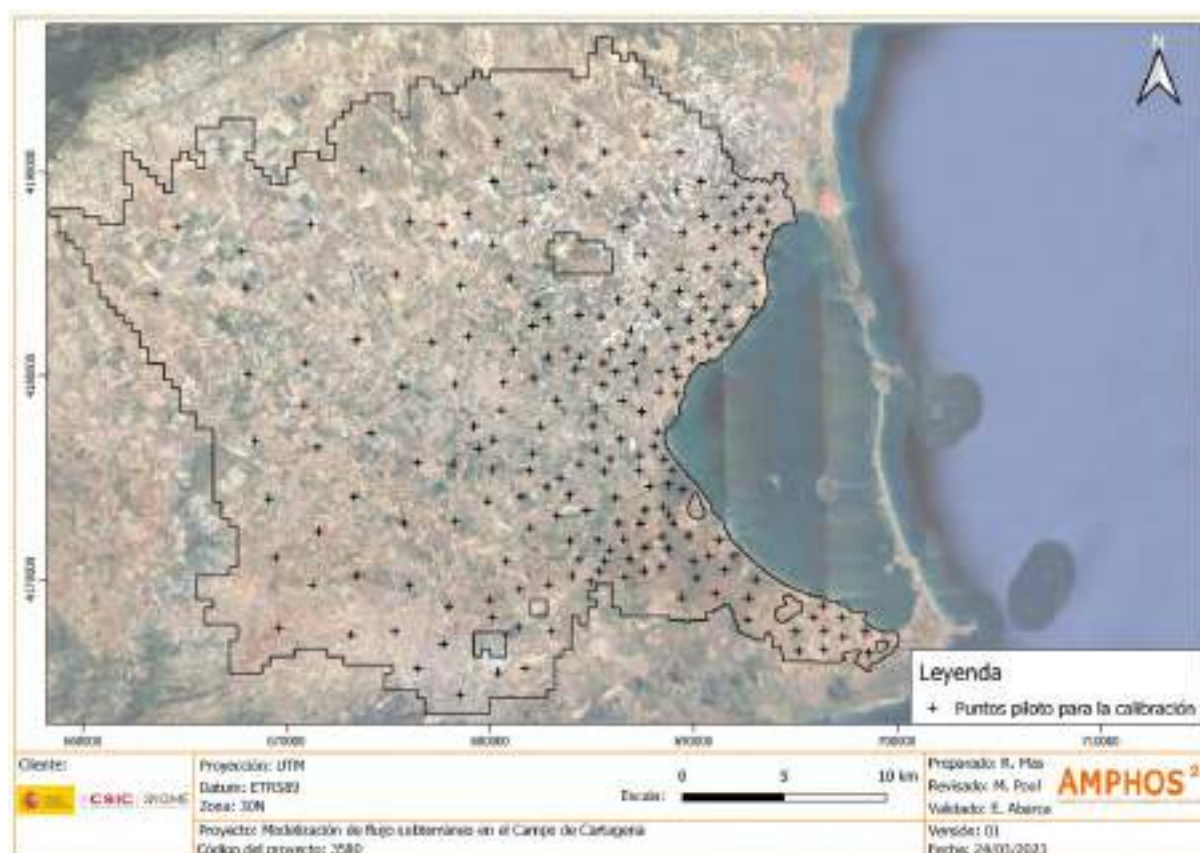


Figura 4-19: Malla de puntos piloto definida para el proceso de calibración estocástica.

4.9.1 Indicadores de calibración

La evaluación del resultado de la calibración del modelo de flujo se ha realizado mediante la cuantificación de diferentes estadísticos, la coherencia de los parámetros calibrados y el balance hídrico con el modelo conceptual, así como la evaluación cualitativa de niveles observados versus simulados.

Los principales estadísticos utilizados para evaluar el ajuste de un modelo hidrogeológico son:

- El coeficiente de determinación (R^2):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i^{sim} - \overline{h^{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (h_i^{obs} - \overline{h^{obs}})^2}$$

Donde:

h_i^{sim} : Nivel simulado en la medición i .

h_i^{obs} : Nivel observado en la medición i .

$\overline{h^{obs}}$: Media de los niveles observados.

n : Número total de mediciones.

- El error medio:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{obs} - h_i^{sim})$$

- Máximo residual:

$$Max R = \max\{h_i^{obs} - h_i^{sim} / \forall i \in 1, \dots, n\}$$

- Mínimo residual:

$$Min R = \min\{h_i^{obs} - h_i^{sim} / \forall i \in 1, \dots, n\}$$

- Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n ((h_i^{obs} - h_i^{sim}) - ME)^2}$$

- La raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{obs} - h_i^{sim})^2}$$

- El error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i^{obs} - h_i^{sim}|$$

- La raíz del error cuadrático medio normalizado (nRMSE):

$$nRMSE (\%) = RMSE \cdot 100 / (h_{max}^{obs} - h_{min}^{obs})$$

Donde:

h_{max}^{obs} : Máximo nivel observado en el total de mediciones.

h_{min}^{sim} : Mínimo nivel observado en el total de mediciones.

- El error absoluto medio normalizado (nMAE):

$$nMAE (\%) = MAE \cdot 100 / (h_{max}^{obs} - h_{min}^{obs})$$

4.9.2 Parámetros de calibración

Los valores de los parámetros hidráulicos (permeabilidad y coeficiente de almacenamiento) disponibles en el Campo de Cartagena en los materiales cuaternarios suelen derivarse de la interpretación de ensayos de bombeo. Generalmente, este tipo de ensayos son de corta duración y, por tanto, tienen un carácter local y un alcance de unas pocas decenas de metros. Es por esto que los valores de los parámetros obtenidos a partir de este tipo de ensayos suelen proporcionar información muy puntual del entorno del pozo y son difícilmente extrapolables a escala regional.

Debido al alto grado de heterogeneidad en los materiales cuaternarios, para la calibración de la permeabilidad se adoptó un valor inicial para los puntos piloto de 6 m/d. Debido a la incertidumbre asociada a la geometría del acuífero, se definieron unos rangos muy altos (dos órdenes de magnitud tanto para el mínimo como para el máximo) para aumentar los grados de libertad en el proceso de calibración.

Para el almacenamiento o porosidad drenable, se adoptó un valor de 0,01 con un rango mínimo y máximo de 0,1 y 0,001, respectivamente, valores acordes a los antecedentes para el Campo de Cartagena (Contreras et al., 2017, CHS-Tragsatec, 2020) y coherentes con acuíferos libres costeros.

5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados del modelo numérico en términos de estadísticos (estacionario y transitorio), residuales, piezometría, niveles observados versus simulados, parámetros calibrados y balance hídrico.

5.1 Estadísticos

En la Figura 5-1 se muestra el ajuste entre niveles simulados y medidos para el periodo transitorio simulado tanto para los puntos de observación reales como para los puntos virtuales de la piezometría de 1961, y la distribución de residuales obtenida. Como se observa, el modelo reproduce satisfactoriamente las medidas de nivel, quedando todos los puntos de observación reales y virtuales alineados con la línea de ajuste perfecto 1:1. Es importante mencionar que los niveles negativos máximos observados (correspondientes al pozo de observación Los Beatos) son subestimados por el modelo numérico. Sin embargo, esto es debido a que las medidas en dicho pozo probablemente representen los niveles de acuíferos inferiores (acuífero plioceno) que no se han considerado en la modelación numérica. Por otro lado, el grado de ajuste se ha analizado a partir del histograma de residuales que muestra una distribución normal centrada en torno a cero, con el 88,5% de la distribución con errores entre -2 y 2 m.

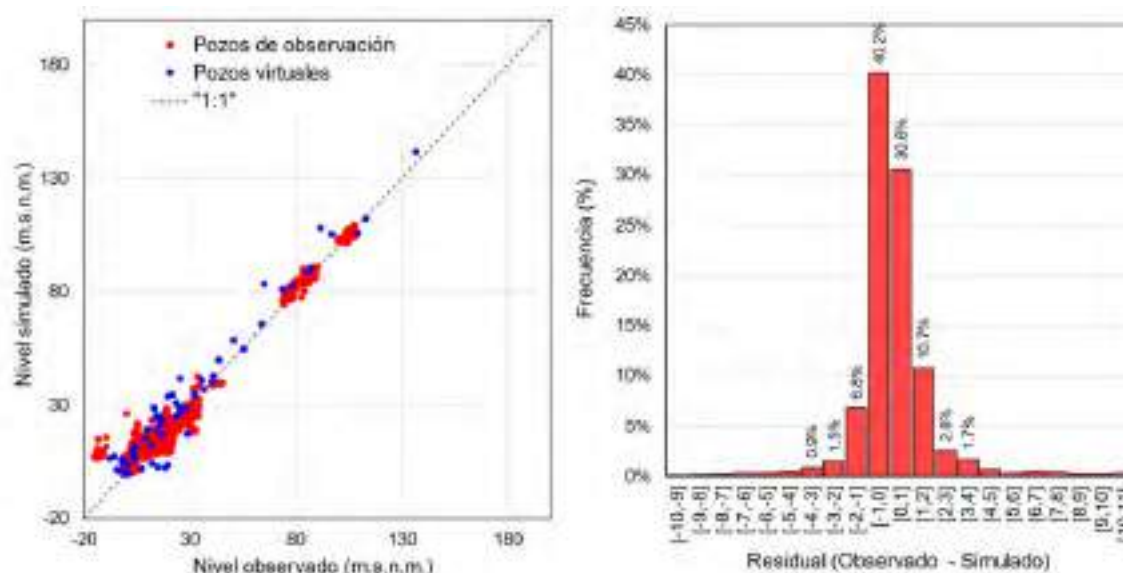


Figura 5-1: Puntos de observación virtuales con medida de nivel a partir de la piezometría del año 1961.

En la Tabla 5-1 se presentan los resultados de los estadísticos para el periodo de calibración del modelo transitorio comprendido entre el 01/01/1920 y el 31/12/2020. Se obtiene un ajuste

satisfactorio en términos de estadísticos, con un error medio absoluto de 1,1 m y un RMSE y MAE normalizados de 1,1% y 0,7% respectivamente, muy inferiores al 5% lo que indica una calibración óptima para un modelo de agua subterránea. El mínimo residual se corresponde con el punto de observación de Los Beatos, cuyos niveles están asociados a descensos locales y medidas de niveles acuíferos más profundos.

Tabla 5-1: Estadísticos del periodo de calibración del modelo numérico de flujo.

Estadístico	Valor
Número de observaciones	26.271
Coefficiente de Determinación (R2)	0,97
Error Medio (m)	0,13
Error Absoluto Medio (m)	1,1
Máximo Residual (m)	16,4
Mínimo Residual (m)	-41,0
Desviación Estándar (m)	2,0
RMS (m)	2,1
RMS Normalizado (%)	0,97%
MAE Normalizado (%)	0,53%

5.2 Niveles observados vs simulados

De la Figura 5-2 a la Figura 5-6 se muestra la evolución temporal de nivel medida y calculada tanto en los puntos de observación como en ciertos pozos virtuales incluidos en el modelo numérico.

De forma generalizada el modelo reproduce de forma satisfactoria la historia de niveles en los puntos de observación con mayor registro de medida. De este modo, el modelo reproduce de forma óptima el descenso de 10 m en los años 90 en el punto de observación de Los Tomases, y la recuperación de 15 m en el año 2000 hasta alcanzar un nivel estabilizado en la última década. Por otro lado, también logra reproducir el ascenso medido en el pozo de Los Blases y en Venta del Pino de aproximadamente 7 y 10 m, respectivamente, desde 1980 al año 2000 (Figura 5-2). Por otro lado, el modelo subestima el descenso observado en el pozo Los Beatos1. Sin embargo, el descenso medido en este pozo, con niveles de hasta 22 m bajo el nivel del mar, está asociado por un lado a bombeos locales localizados en la cercanía de dicho pozo, como a medidas representativas de niveles acuíferos más profundos (acuífero Plioceno) que no están considerados en el modelo numérico.

Adicionalmente, el modelo captura de forma satisfactoria las fluctuaciones observadas en la mayoría de los pozos de observación en la última década (2010-2020). Así, se obtiene un buen ajuste en los pozos Avileseles 2, Cantarranas, Cortijo de Palma y el Algar que muestran un ascenso a comienzos del año 2010, seguido de un descenso y un ascenso mayor a partir de 2015, ver Figura 5-3.

Con respecto a los pozos virtuales incluidos con medidas para el año 1961, el modelo logra reproducir el descenso generalizado en la mayoría de los pozos, ver Figura 5-4 y Figura 5-5. A partir de estos puntos se observa que el sistema tanto en la franja costera como en el sector norte (por ejemplo, los pozos 1961-16 y 1961-57) al final de la simulación alcanza prácticamente los niveles iniciales previos al bombeo del Cuaternario. Sin embargo, en el sector central, aunque se observa un claro ascenso en los niveles debido a la disminución de la extracción a partir del año 1970, los niveles no muestran al final de la simulación un estado en equilibrio similar a la situación estacionaria previa a los bombeos (ver, por ejemplo, puntos 1961-12 y 1961-20 en Figura 5-5).

Finalmente, el modelo reproduce adecuadamente los niveles de base de los pozos SM con registros más actuales, ver Figura 5-6. Sin embargo, en estos pozos de observación las fluctuaciones inducidas por las variaciones en la recarga no siempre son capturadas por el modelo numérico. Para mejorar el ajuste en dichos pozos sería necesario (i) recalibrar las funciones temporales de las zonas de recarga de los dos últimos años y (ii) disminuir el paso de tiempo de mensual a diario.

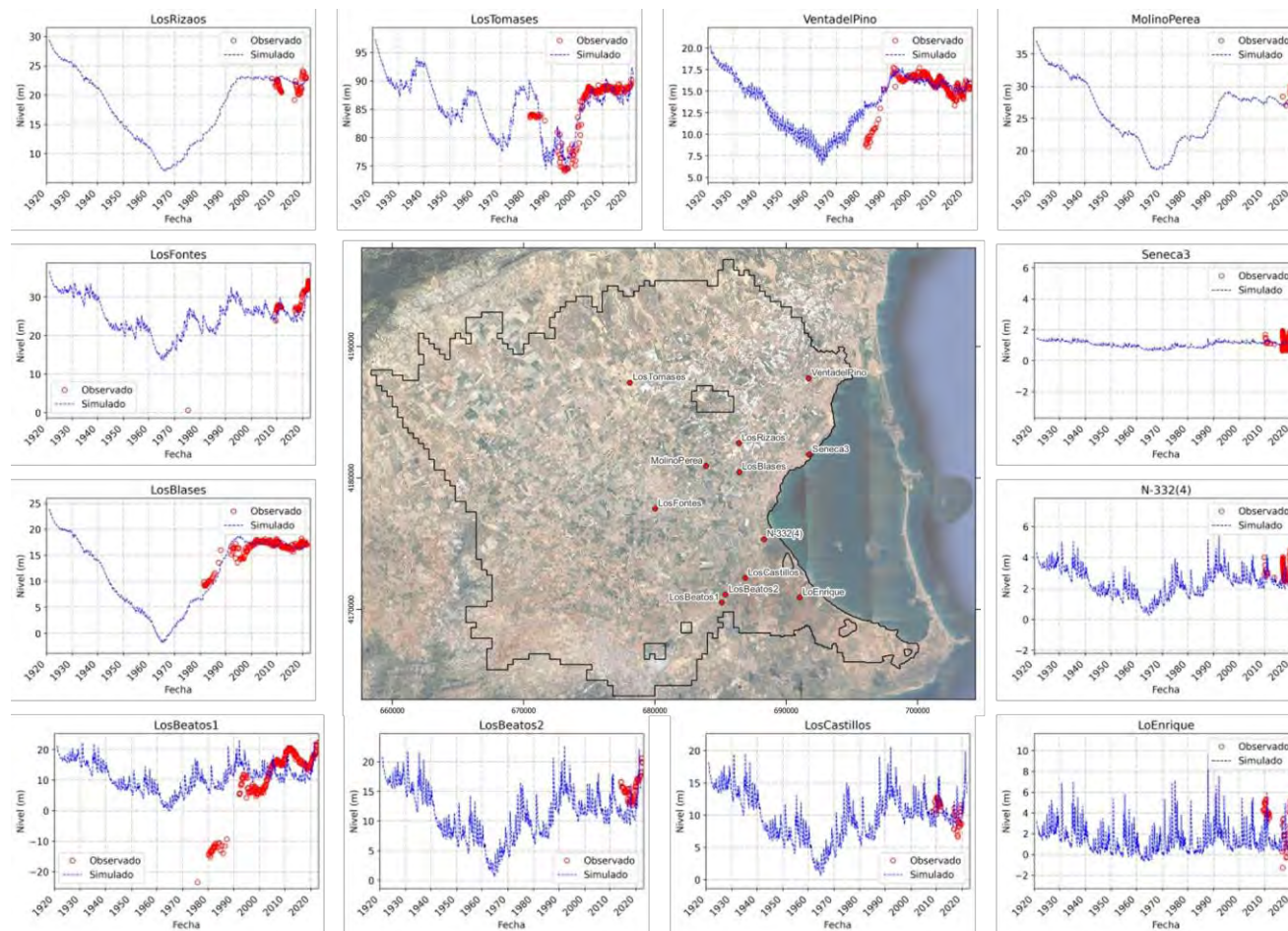


Figura 5-2: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación.

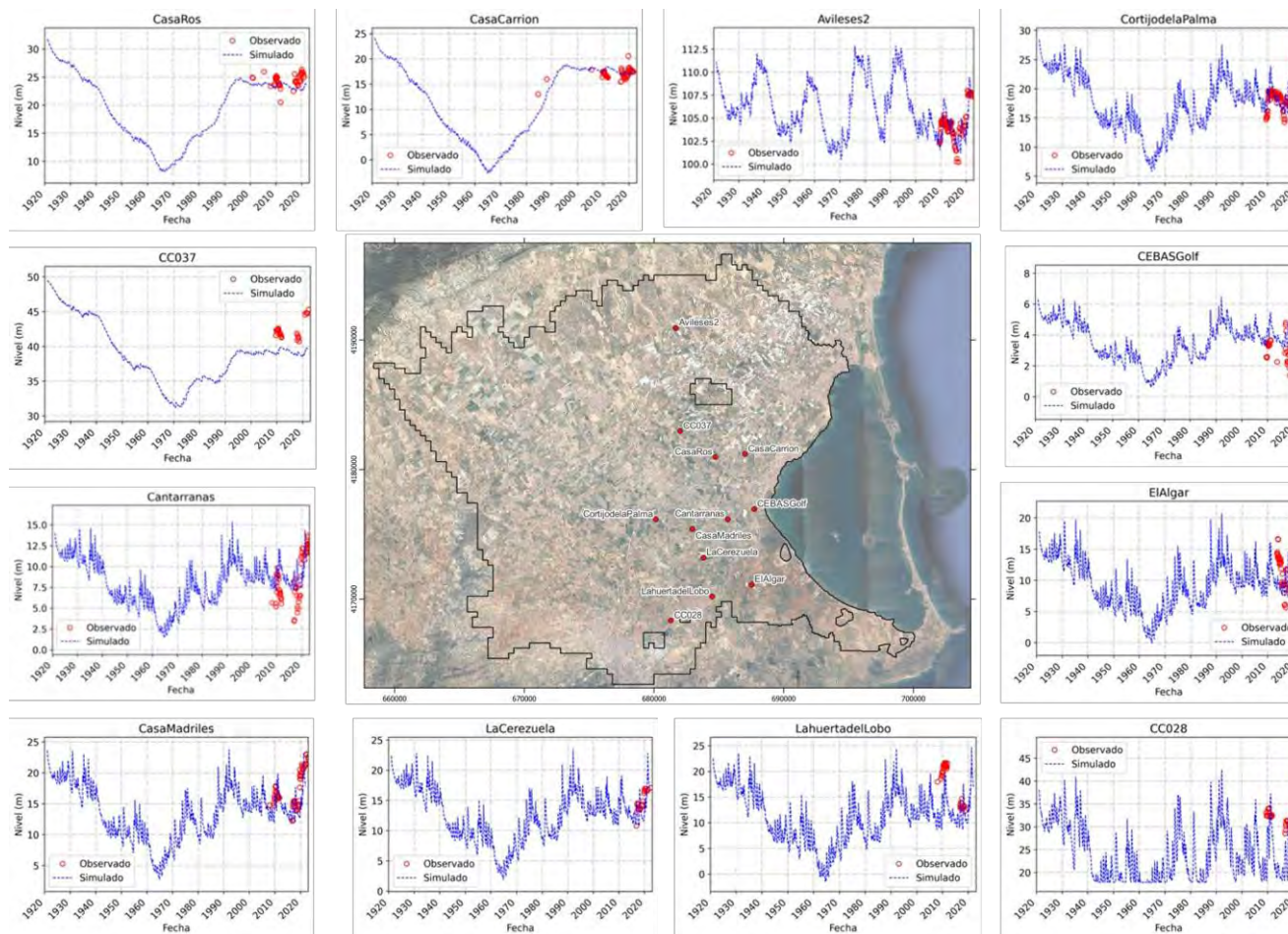


Figura 5-3: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación.

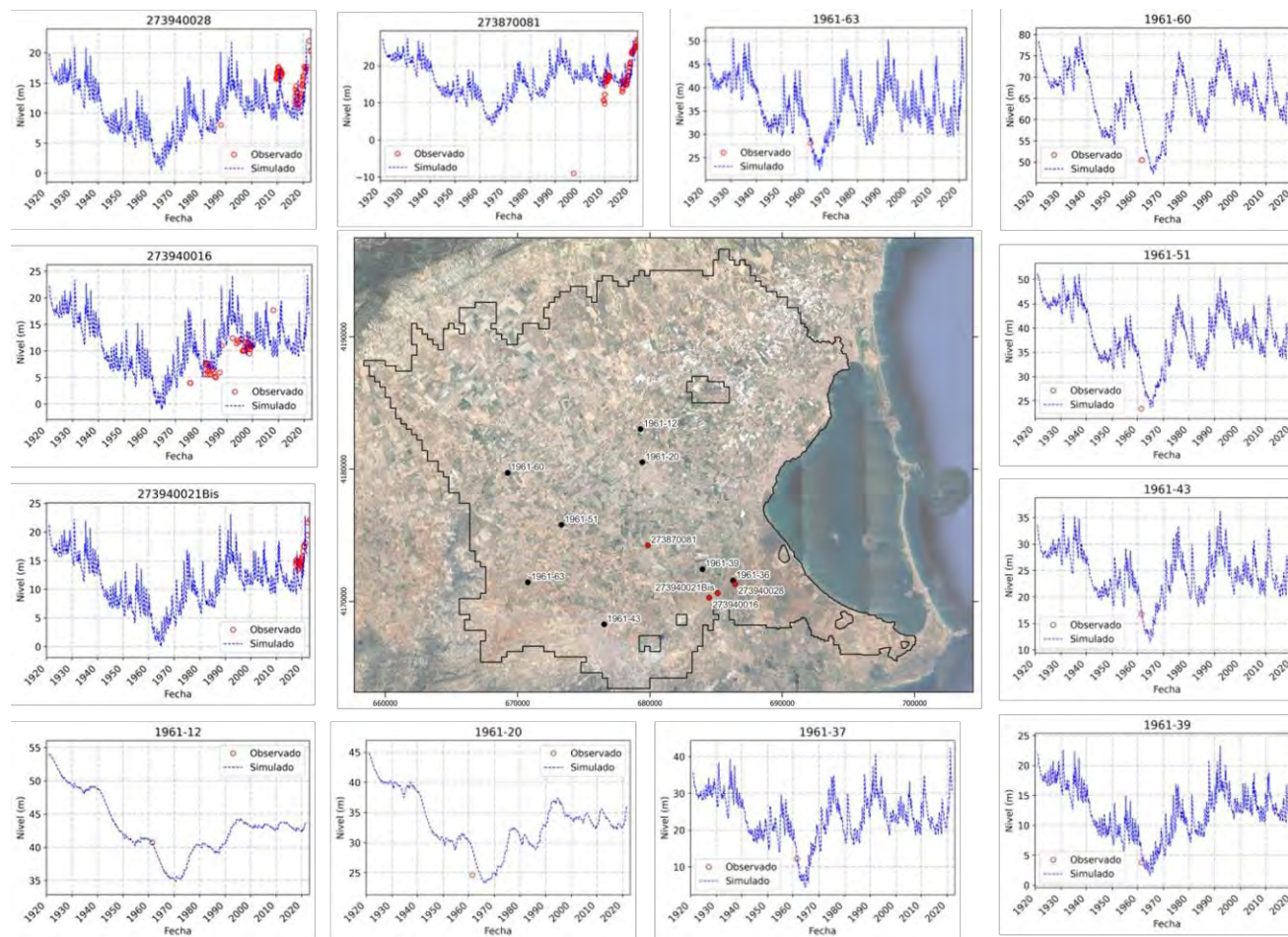


Figura 5-4: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos pozos de observación y puntos virtuales.

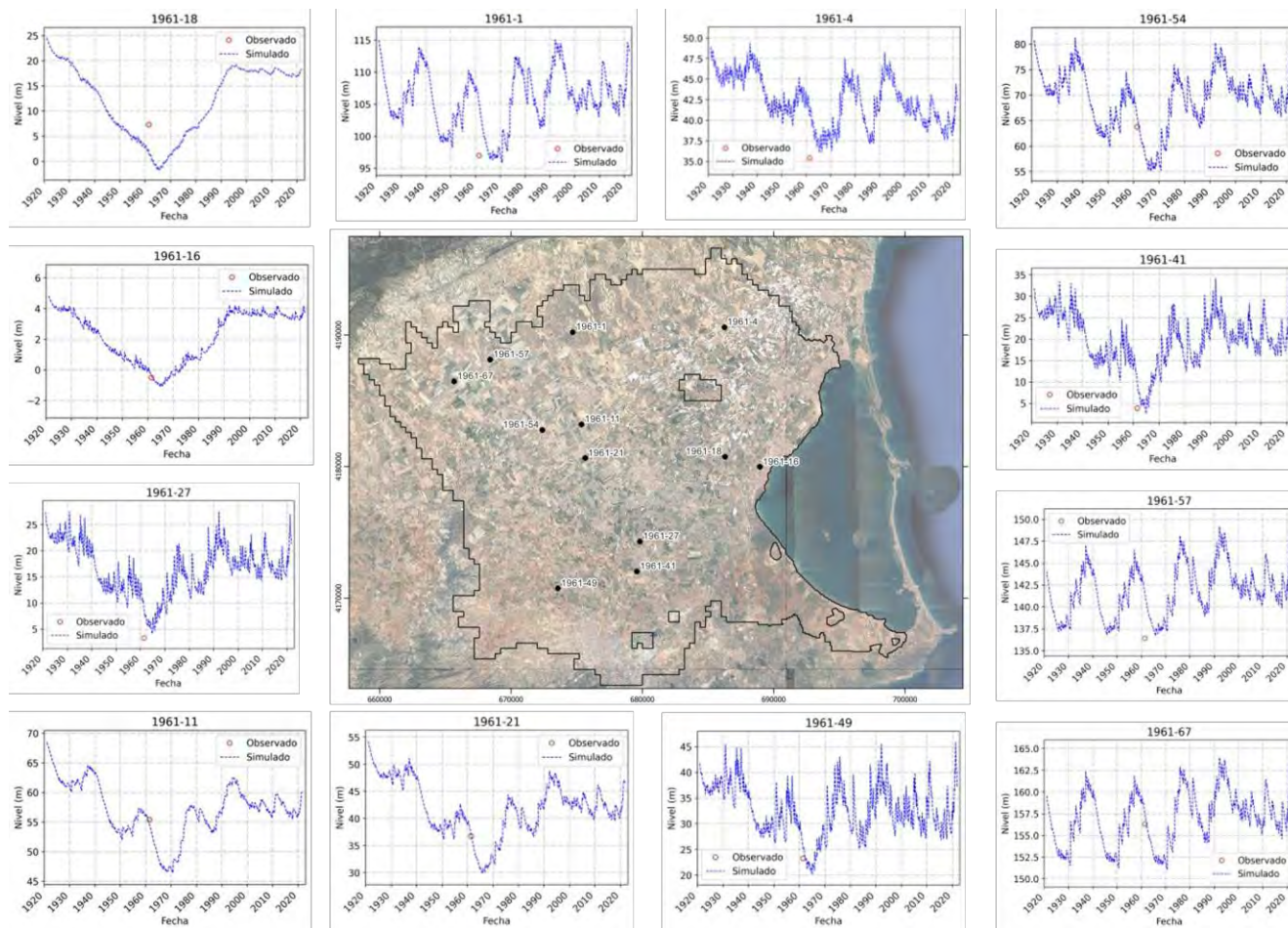


Figura 5-5: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 1920 a 2020 para ciertos puntos virtuales incluidos en el modelo numérico.

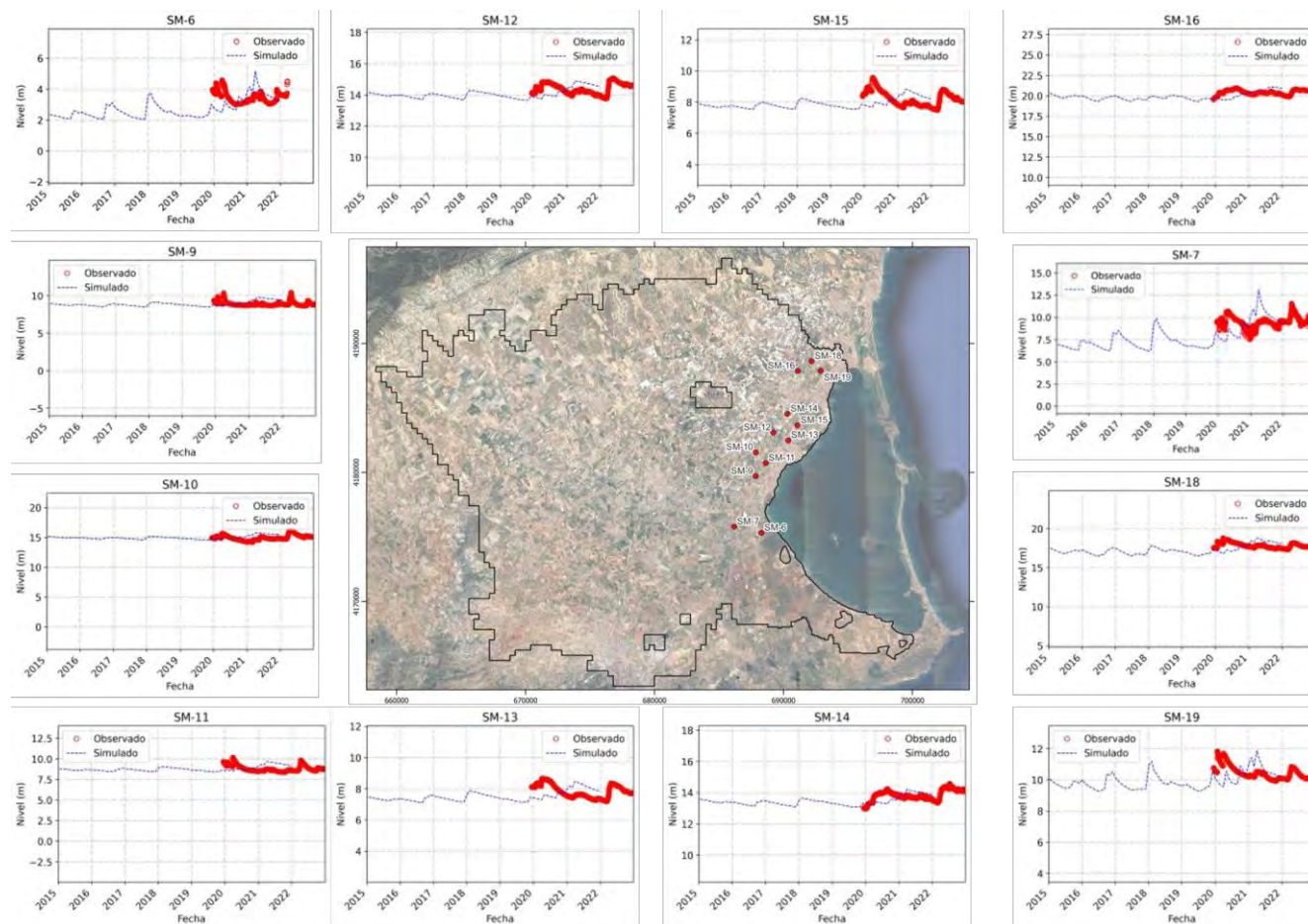


Figura 5-6: Evolución temporal de los niveles medidos y calculados desde 2015 a 2020 para los pozos de observación SM incluidos en el modelo numérico.

5.3 Piezometría

La Figura 5-7 muestra la piezometría resultante y medida para el año 1961. En general, y en concordancia con el modelo conceptual, el modelo numérico reproduce la distribución de isopiezas medida con un flujo preferente oeste-este con descarga hacia la laguna con mayor potencial hidráulico en las zonas más elevadas del sector, disminuyendo a medida que la topografía alcanza cotas más bajas. Es importante mencionar que en la década de los 60 la extracción en el acuífero cuaternario era máxima, lo cual indujo un descenso de niveles generalizado en toda la zona central de la cuenca, con niveles muy bajos e incluso negativos en ciertos sectores cercanos a la franja costera. En dicho periodo el descenso generalizado de niveles provocó problemas de intrusión marina en el acuífero cuaternario.

La Figura 5-8 y la Figura 5-9 presentan la piezometría resultante para el primer paso de tiempo correspondiente a la simulación estacionaria del año 1920 y para el último periodo de simulación correspondiente a diciembre del año 2020, respectivamente. En ambas piezometrías se observan niveles mayores en el sector central y hacia la laguna en comparación con la situación de la década de los 60. Por otro lado, la distancia entre isopiezas es menor hacia la laguna, indicando mayor gradiente de nivel en este sector. Como se observa en la figura, en el año 2020 la distribución de niveles es similar a la obtenida para la simulación estacionaria previa a los bombeos en la mayoría de los sectores del sistema, excepto en la zona central donde los niveles son algo menores. Este resultado indica que, en la situación actual, con la disminución de las extracciones en el acuífero cuaternario, los niveles están subiendo y evolucionado hacia la situación natural de equilibrio previa a los bombeos en la mayoría del sistema. De hecho, actualmente existen pozos de observación cercanos a la franja costera que son surgentes. El ascenso actual de niveles en el sistema ha provocado problemas en infraestructuras y una mayor descarga a partir de los drenajes y la Rambla del Albuñón (no considerada en el modelo numérico).

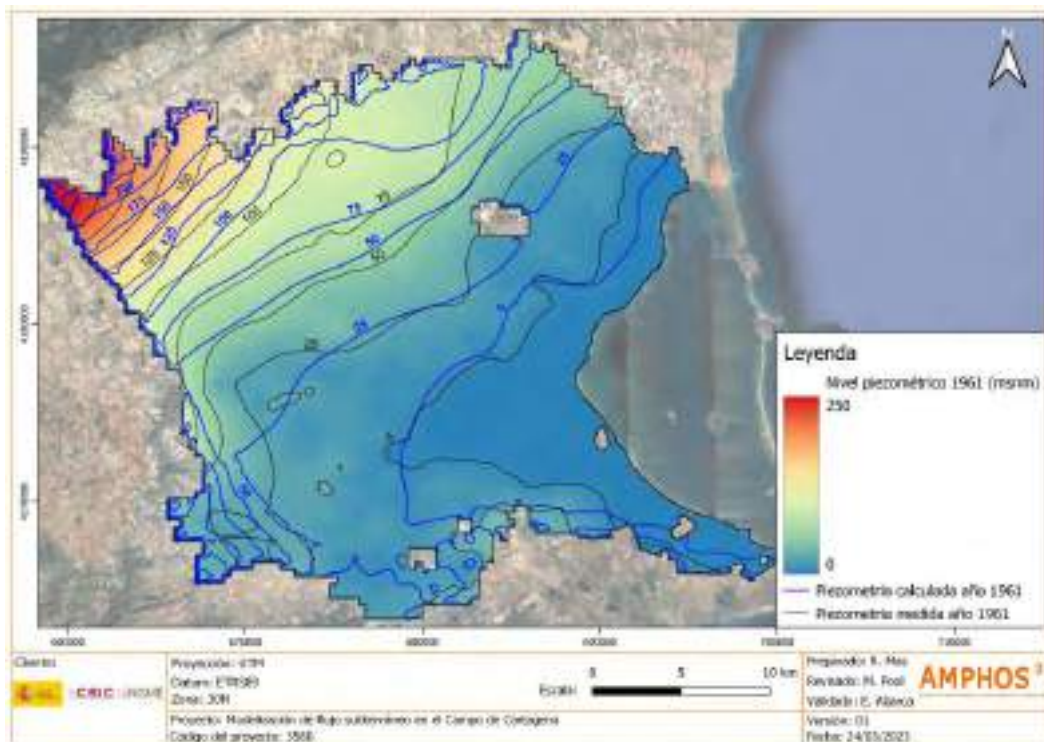


Figura 5-7: Piezometría medida y simulada para el año 1961.

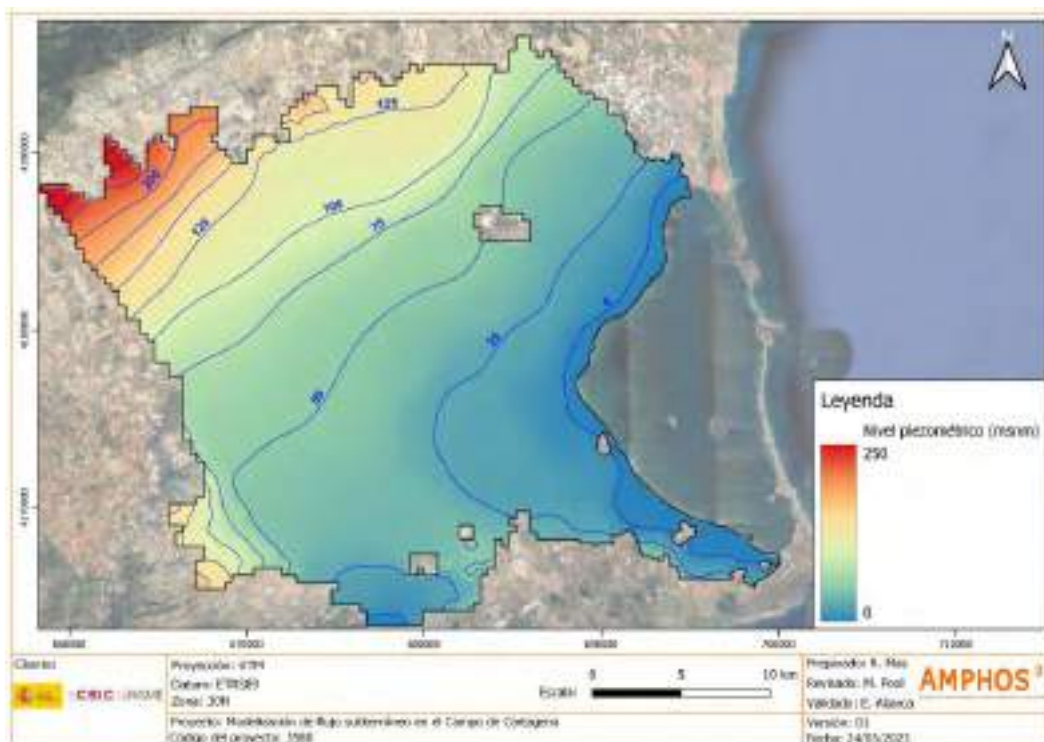


Figura 5-8: Piezometría simulada para la simulación estacionaria correspondiente al año 1920.

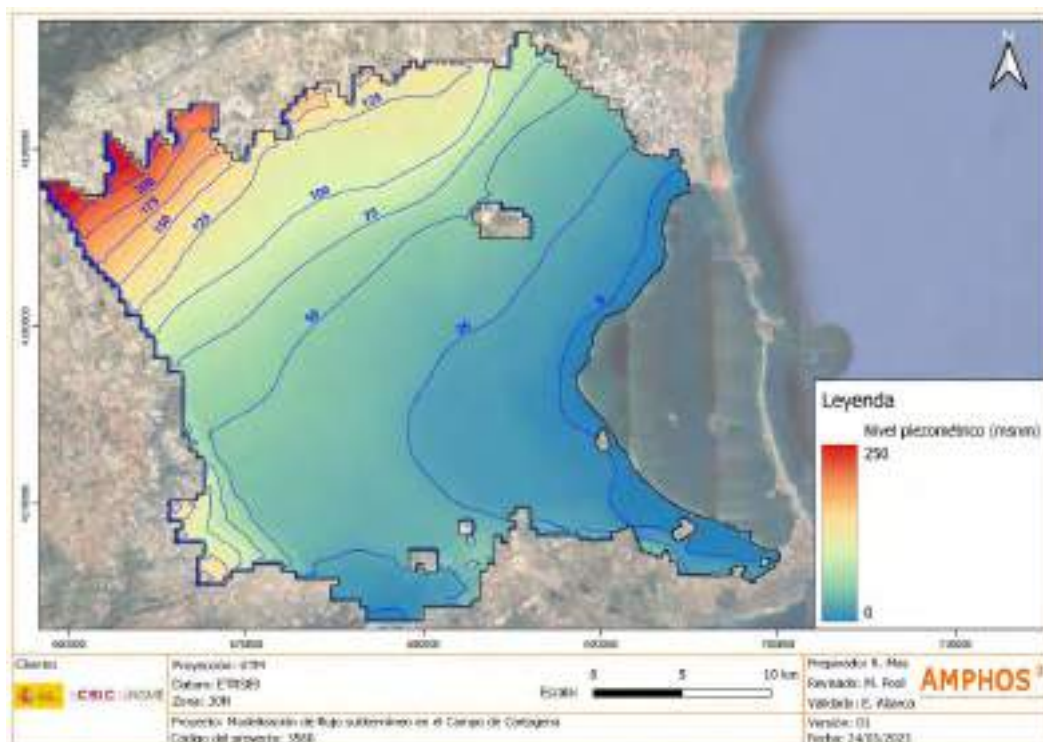


Figura 5-9: Piezometría simulada para la simulación estacionaria correspondiente al año 1920 y al final de simulación correspondiente a diciembre de 2020.

5.4 Balance hídrico del modelo numérico

5.4.1 Recarga

En la Figura 5-10 se representa la variación anual (obtenida por integración de valores mensuales) de la recarga en el modelo numérico. La recarga media anual para toda la serie se ha estimado en 71,8 hm³/año, si bien se observan eventos de recarga mensual superiores a 140 hm³/año. Así, considerando el periodo de 2002 a 2004 como periodo promedio, de 2008 a 2010 como periodo húmedo y de 2013 a 2015 como periodo seco, con precipitaciones respectivas de 590 mm/año, 922 mm/año y 313 mm/año (Contreras et al., 2017), la recarga promedio obtenida para estos períodos es de 73,4 hm³/año, 101,6 hm³/año y 45,5 hm³/año, respectivamente.

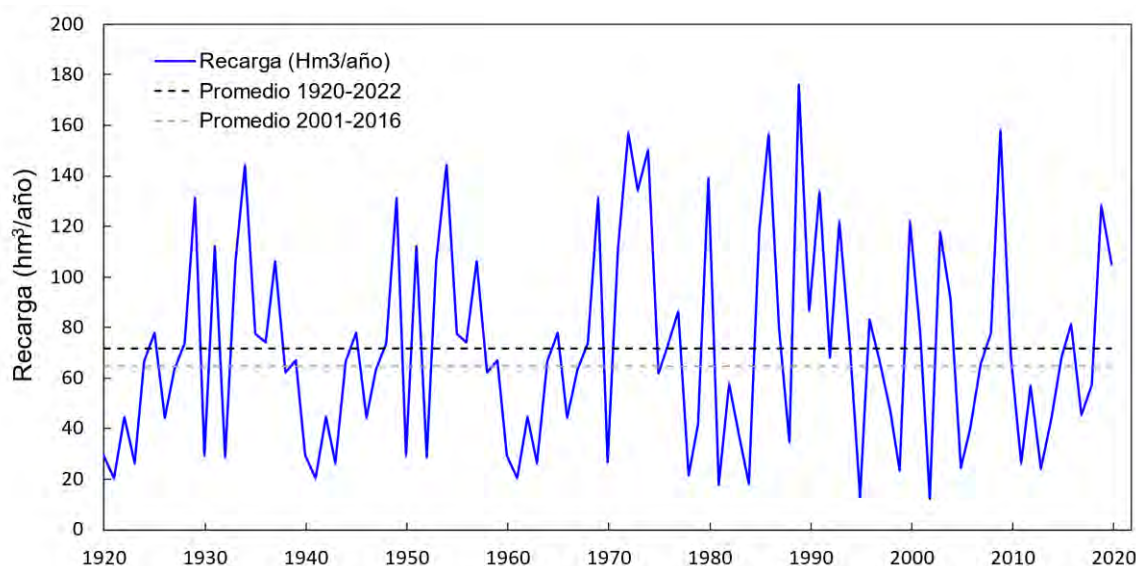


Figura 5-10: Recarga anual ($hm^3/año$) impuesta en el modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020).

Por otro lado, la Figura 5-11 muestra la recarga anual ($mm/año$) en comparación con la precipitación, con una recarga promedio para toda la serie simulada (1920-2020) de $146,2 mm/año$.

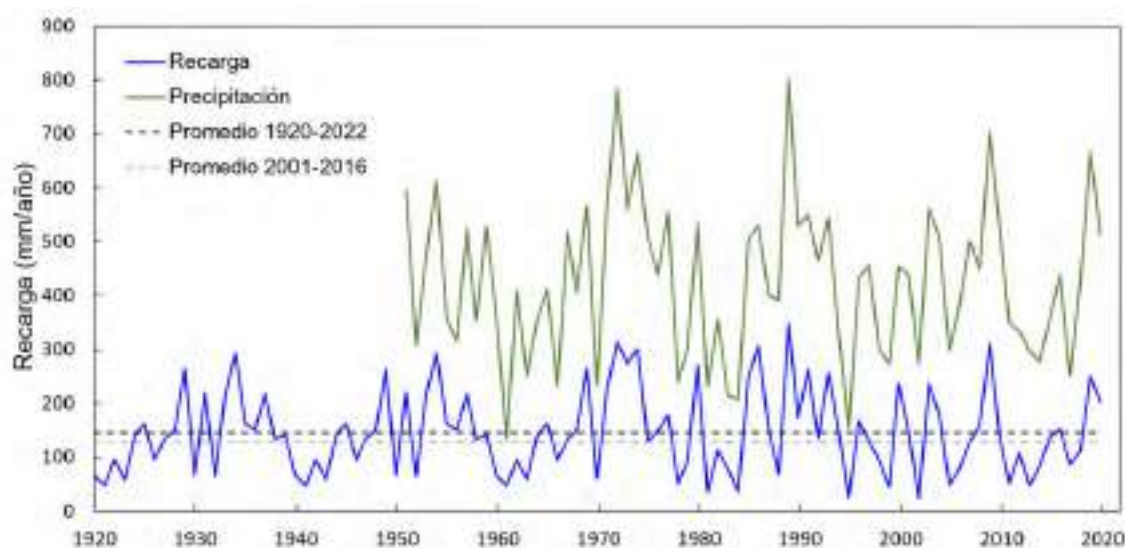


Figura 5-11: Recarga ($mm/año$) impuesta en el modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020) y precipitación medida ($mm/año$) para el periodo 1951-2020.

5.4.2 Descarga al mar

La Figura 5-12 muestra la descarga anual por el contacto con el Mar Menor en los 15 segmentos definidos en base a las ‘zonas de captura’ (Contreras et al., 2017). De forma coherente a lo obtenido en los antecedentes, prácticamente el 80% de la descarga se concentra en los sectores S1-S2, N1-N2 y N6-N7, siendo el sector Sur 1 el que presenta una descarga mayor. Esto es debido a que estos sectores, y en particular el sector Sur 1, presentan un espesor mayor a lo largo de la franja costera, favoreciendo así la descarga, y mayores permeabilidades calibradas (ver apartado 5.5.1).

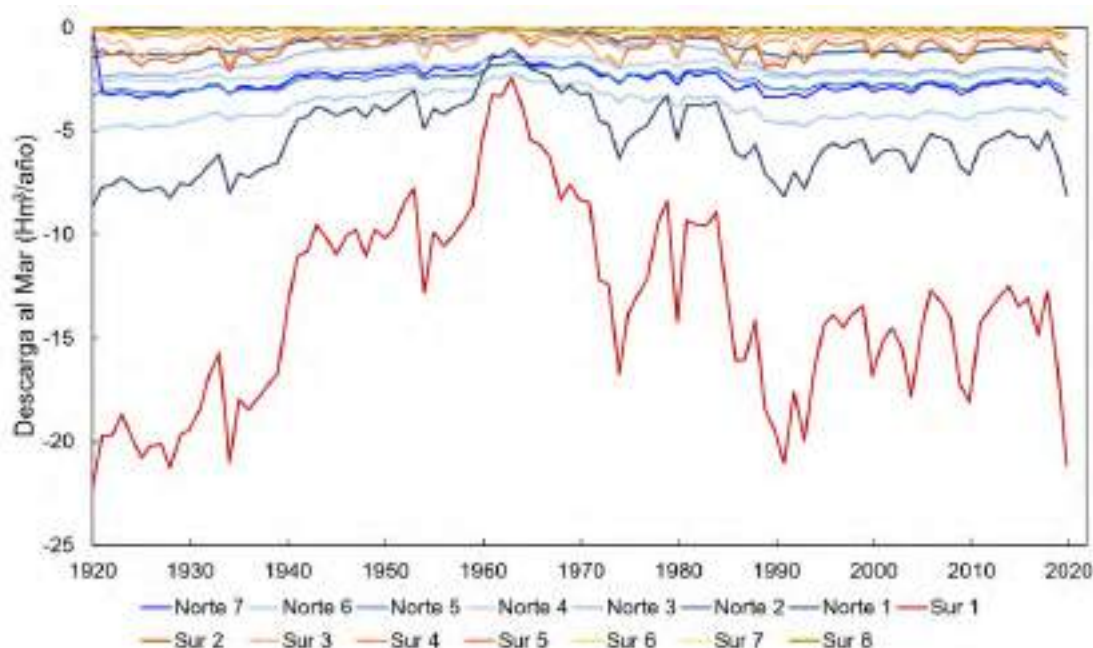


Figura 5-12: Descarga anual al Mar Menor ($hm^3/año$) para cada segmento definido en el contorno obtenida a partir del modelo numérico para todo el periodo simulado (1920-2020).

La Tabla 5-2 muestra la descarga promedio por década para cada segmento definido en el contorno correspondientes a las zonas de captura. Para todos los segmentos, se observa una disminución de la descarga en la década de los 60 correspondiendo al periodo de máxima extracción del acuífero cuaternario, y un ligero aumento y estabilización hacia el final de la simulación. Los segmentos que muestran una descarga menor son el Sur 7 y Sur 8, debido a que hacia el sur (i) la extracción del acuífero cuaternario es mayor con respecto a otros sectores, y (ii) el espesor a lo largo de la franja costera disminuye considerablemente hacia el sur debido a la proximidad de las elevaciones de la Sierra de Cartagena – La Unión. Por otro lado, en ciertos sectores del sur, debido a las extracciones y al descenso de los niveles, este contorno funciona como entrada de flujo al sistema en lugar de descarga.

Tabla 5-2: Descarga promedio al Mar Menor ($hm^3/año$) en los sectores definidos en el contorno.

sector	1920-1930	1930-1940	1940-1950	1959-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020
Norte 7	-3,3	-2,9	-2,3	-2,0	-1,7	-2,3	-2,6	-3,1	-3,0	-2,8
Norte 6	-4,8	-4,3	-3,5	-3,1	-2,6	-3,2	-3,8	-4,5	-4,3	-4,1
Norte 5	-3,1	-3,0	-2,5	-2,3	-1,9	-2,2	-2,3	-2,8	-2,8	-2,7
Norte 4	-2,6	-2,4	-2,0	-1,8	-1,5	-1,7	-1,9	-2,3	-2,3	-2,2
Norte 3	-2,3	-1,9	-1,1	-0,7	-0,2	-0,7	-1,4	-2,2	-2,1	-2,1
Norte 2	-1,3	-1,1	-0,6	-0,4	-0,1	-0,5	-0,8	-1,3	-1,2	-1,1
Norte 1	-7,8	-7,0	-4,2	-3,8	-2,0	-4,4	-5,0	-6,5	-6,0	-5,9
Sur 1	-20,2	-18,0	-10,7	-9,7	-5,1	-11,5	-12,9	-16,5	-15,2	-14,9
Sur 2	-1,5	-1,4	-0,8	-0,8	-0,5	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,0
Sur 3	-1,0	-1,1	-0,6	-0,8	-0,5	-0,9	-0,8	-0,8	-0,9	-0,7
Sur 4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3
Sur 5	-0,1	0,1	0,4	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1
Sur 6	-0,2	0,2	0,5	0,6	0,6	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2
Sur 7	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Sur 8	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
Total	-48,8	-43,4	-27,8	-24,8	-15,4	-28,2	-32,8	-41,1	-39,3	-37,7

La Figura 5-13 muestra la descarga anual total obtenida a partir del modelo numérico para todo el periodo simulado. Como se observa, la descarga disminuye considerablemente desde la década de 1940 a 1970. Esto es debido al aumento en las extracciones del acuífero cuaternario durante este periodo. La descarga promedio obtenida para toda la serie simulada es de $33,9 \text{ hm}^3/año$, y aumenta ligeramente para la última década (2001-2016) hasta alcanzar valores de $37,2 \text{ hm}^3/año$ debido a la reducción de las extracciones. Las fluctuaciones temporales se corresponden con la recarga directa del sistema, obteniendo mayor descarga en los años húmedos con una recarga mayor.

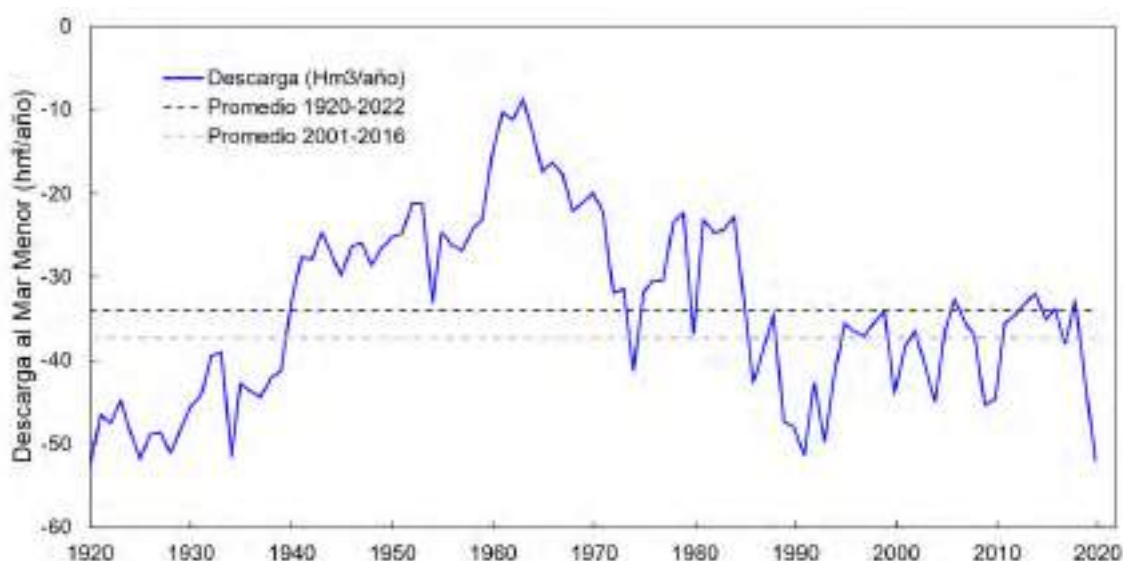


Figura 5-13: Descarga anual total al Mar Menor ($hm^3/año$) para todo el periodo simulado (1920-2020).

5.4.3 Extracciones del acuífero cuaternario

La Figura 5-14 muestra la extracción anual obtenida para las diferentes zonas de extracción en todo el periodo simulado. Como se observa, la extracción es mayor en el sector sur del sistema (Zona Central y Costera Sur), alcanzando en esta zona un máximo de extracción de $28 \text{ hm}^3/año$ a principio de la década de los 60. La extracción en la zona Norte es máxima también para la década de los 60, y luego disminuye a aproximadamente $0,5$ y $2 \text{ hm}^3/año$ al final de la simulación en la zona Costera y Central, respectivamente.

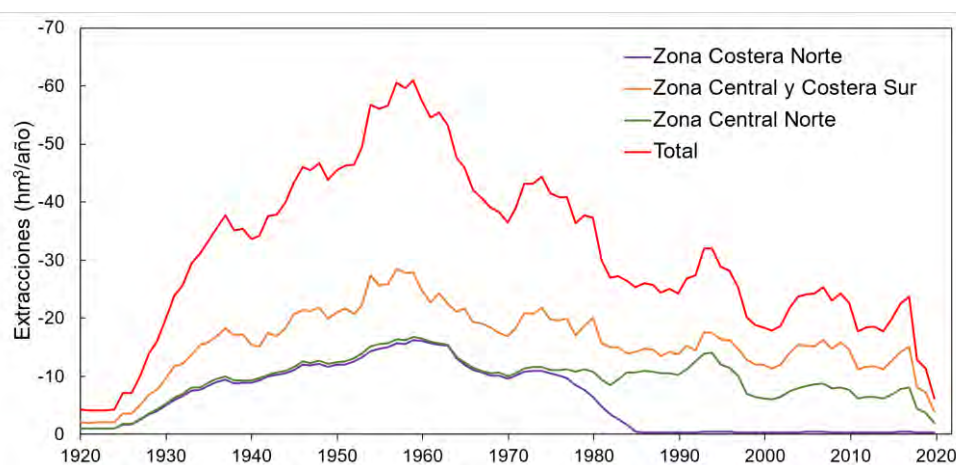


Figura 5-14: Extracciones del acuífero cuaternario ($hm^3/año$) en las diferentes zonas definidas para todo el periodo simulado (1920-2020).

La extracción total promedio para todo el periodo simulado es de 31 hm³/año, con un valor promedio de 51 hm³/año para el periodo comprendido entre 1950 y 1960. Al final de la simulación la extracción total es de aproximadamente 6 hm³/año, valor coherente con Registro de Aguas de la CHS. La Figura 5-15 muestra la extracción total obtenida a partir del modelo numérico y la extracción definida por Domingo-Pinillos (2019). Como se observa, la función obtenida a partir del modelo numérico es coherente con la extracción definida en los antecedentes, y las pequeñas diferencias están sujetas a (i) el paquete utilizado de *Automated flux reduction for well modflow* que disminuye el caudal conforme el nivel en las celdas disminuye, y (ii) un proceso de calibración para mejorar el ajuste en pozos de observación con mayor registro histórico de medidas.

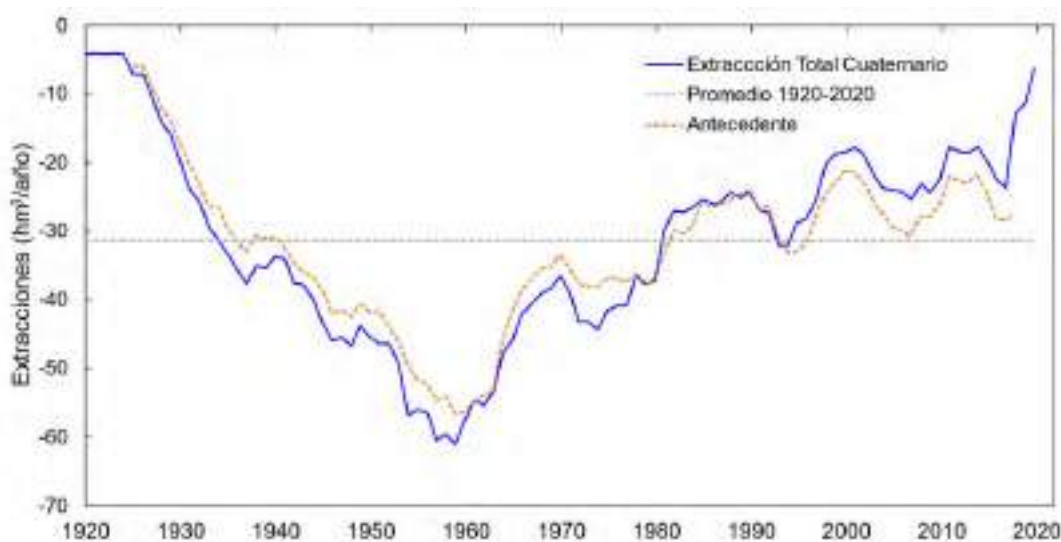


Figura 5-15: Extracción total del acuífero cuaternario (hm³/año) simulado para todo el periodo simulado (1920-2020) y función obtenida a partir de antecedentes (Domingo-Pinillos, 2019).

5.4.4 Descarga a Cartagena

Para simular una descarga hacia el mar por Cartagena, en el modelo numérico se definió una condición de contorno mixta no lineal (apartado 4.5.3). La descarga anual obtenida para todo el periodo de simulación por este contorno se muestra en la Figura 5-16. Como se observa, la descarga hacia Cartagena es prácticamente nula en la década de los 60 debido a las extracciones del acuífero cuaternario. Una vez las extracciones disminuyen, la descarga a Cartagena aumenta hasta alcanzar un valor promedio de -7,4 hm³/año para el periodo de 2001-2016. Por otro lado, y al igual que con la descarga al Mar Menor, los años de mayor descarga se corresponden con años de mayor recarga al acuífero.

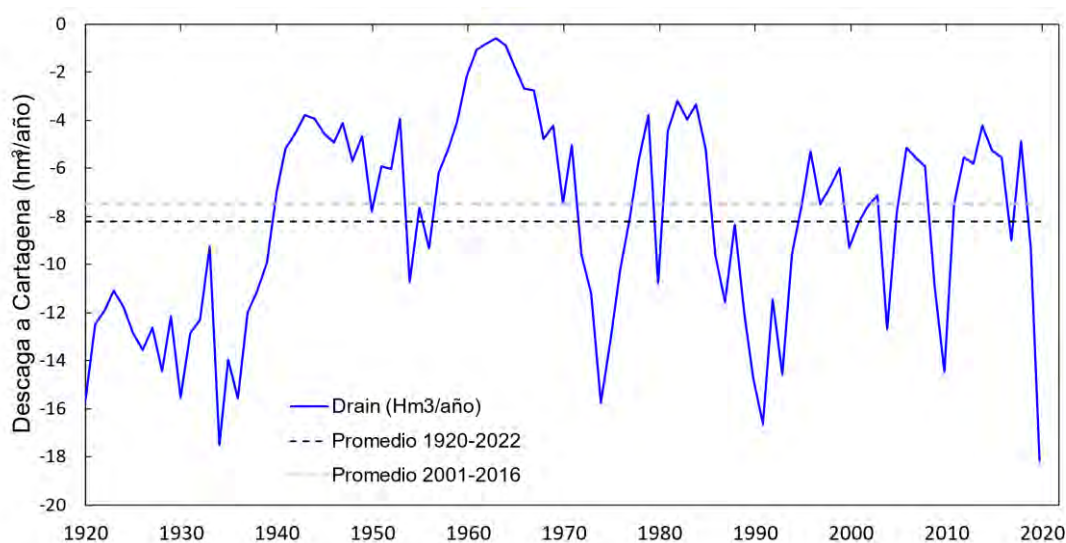


Figura 5-16: Descarga anual hacia Cartagena ($hm^3/año$) para todo el periodo simulado (1920-2020).

5.4.5 Balance global

En la Figura 5-17 se presenta el balance global con todas las componentes consideradas para todo el periodo simulado. La única entrada al sistema se corresponde a la recarga directa con un valor promedio para toda la serie de $71,8 \text{ hm}^3/año$. Las descargas principales se corresponden con la salida al Mar Menor, con un promedio de $33,9 \text{ hm}^3/año$, y la extracción del acuífero cuaternario, con un promedio para toda la serie de $31,2 \text{ hm}^3/año$. Finalmente, existe una pequeña descarga hacia Cartagena de $8,1 \text{ hm}^3/año$. Sin embargo, cabe destacar que la descarga al Mar Menor puede ser menor que la obtenida debido a que no se ha considerado en la modelación la transferencia de agua subterránea del acuífero cuaternario hacia los acuíferos inferiores.

Como se observa, en el periodo de máxima extracción en la década de los 60, tanto la descarga hacia el Mar Menor como la salida hacia Cartagena disminuyen, siendo la extracción la principal salida del sistema. Una vez las extracciones en el Cuaternario disminuyen debido a la profundización de los pozos y consecuente extracción de los acuíferos más profundos, la descarga hacia el Mar Menor aumenta representando la descarga principal del sistema.

La Tabla 5-3 muestra las entradas y salidas del sistema por décadas. Desde el comienzo de la simulación la variación del almacenamiento resulta negativa, siendo la descarga del sistema hacia el Mar Menor y la extracción del Cuaternario superior a la recarga. En la década de los 80 y 90, la recarga aumenta, y disminuye la extracción del Cuaternario, resultando la variación del almacenamiento positiva. Hacia el final de la simulación la recarga disminuye ligeramente, al igual que las extracciones, resultando una variación del almacenamiento cercana a 0.

Sin embargo, la evolución de los niveles indica que, aunque el acuífero se está recuperando, al final de la simulación no ha alcanzado la situación de equilibrio natural.

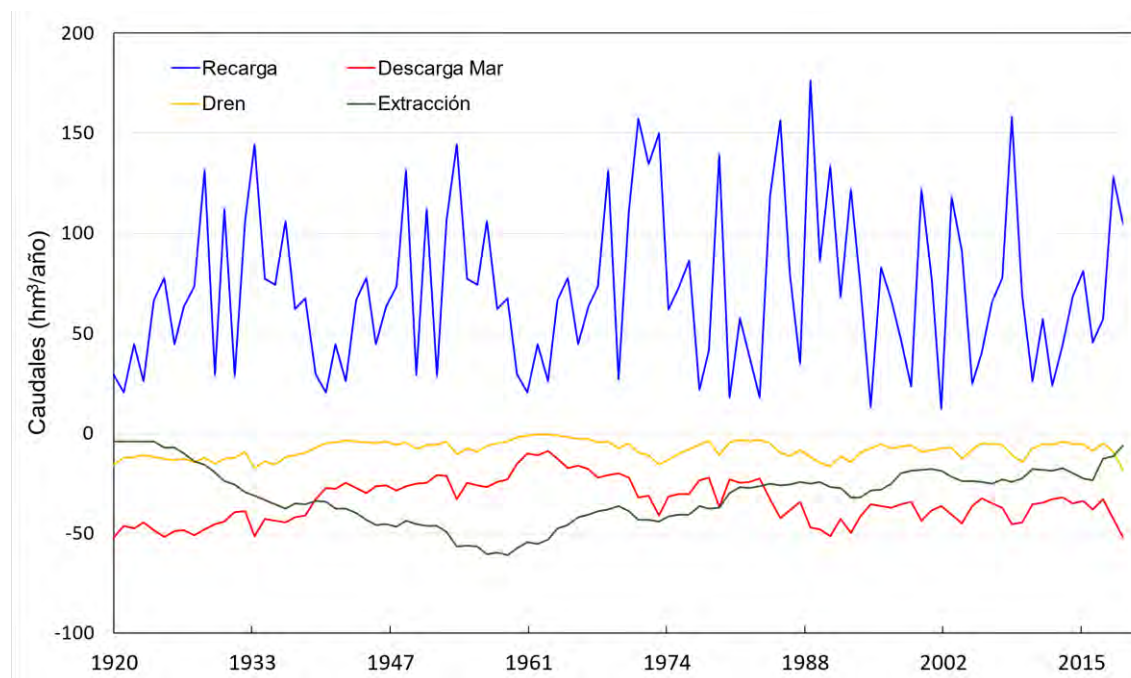


Figura 5-17: Balance global en el Campo de Cartagena ($hm^3/año$) para todo el periodo simulado (1920-2020).

Tabla 5-3: Descarga promedio al Mar Menor ($hm^3/año$) en los sectores definidos en el contorno.

Periodo	Recarga	Descarga Mar Menor	Descarga Cartagena	Extracción	Almacenamiento
1920-1930	57,7	-48,8	-12,9	-7,5	-11,5
1930-1940	80,8	-43,4	-13,0	-30,7	-6,3
1940-1950	57,7	-27,8	-4,8	-40,9	-15,7
1950-1960	80,8	-25,1	-6,7	-53,8	-4,8
1960-1970	57,7	-15,3	-2,2	-47,4	-7,2
1970-1980	86,4	-28,5	-9,0	-40,3	8,6
1980-1990	83,6	-32,8	-7,3	-27,4	16,1
1990-2000	71,6	-41,2	-10,0	-26,4	-6,0
2000-2010	78,7	-39,1	-8,0	-22,1	9,4
2010-2020	64,2	-37,7	-8,2	-17,4	0,9

5.5 Parámetros calibrados

5.5.1 Conductividad hidráulica

La distribución espacial de la permeabilidad obtenida a partir del proceso de calibración se muestra en la Figura 5-18. Existe una dispersión importante en los valores, mostrando un alto grado de heterogeneidad en el sistema. Las permeabilidades menores se localizan en el sector norte del sistema, mientras que las permeabilidades mayores se encuentran en el sector central de la franja costera y en el sector de Cartagena. Sin embargo, aunque el patrón espacial obtenido es coherente con los antecedentes (Contreras et al., 2017), se obtienen permeabilidades elevadas (>400 m/d) tanto en el sector de Cartagena como en el sector central costero al sur de la rambla del Albuñón. En primer lugar, cabe mencionar, que los modelos numéricos previos del sector (CHS-Tragsatec, 2020 y Contreras et al., 2017 (i) simulaban la situación reciente del sistema, y, por tanto, (ii) no incluían las extracciones históricas del Cuaternario. Por otro lado, o tomaban un dominio limitado del sistema (CHS-Tragsatec, 2020) o no incluían los materiales pliocuaternarios como parte del acuífero (Contreras et al., 2017). Por tanto, ciertas diferencias en los valores con respecto a los antecedentes son esperables debido a una definición del modelo conceptual diferente. Sin embargo, los valores máximos de permeabilidad obtenidos pueden indicar errores geométricos que son, de algún modo, corregidos durante en el proceso de calibración, arrojando valores de permeabilidad elevada en sectores en los cuales se ha subestimado el espesor del sistema.

5.5.2 Almacenamiento

La distribución espacial del coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable obtenida a partir del proceso de calibración se presenta en la Figura 5-19. Los valores obtenidos son coherentes tanto con los antecedentes previos numéricos como con los valores obtenidos a partir de ensayos hidráulicos en el sector. La distribución muestra valores menores (del orden de 0,01) en el sector sur, que aumentan hacia el norte y en particular hacia la zona central y franja costera, alcanzando valores de hasta 0,1 en los sectores con mayor espesor del acuífero.

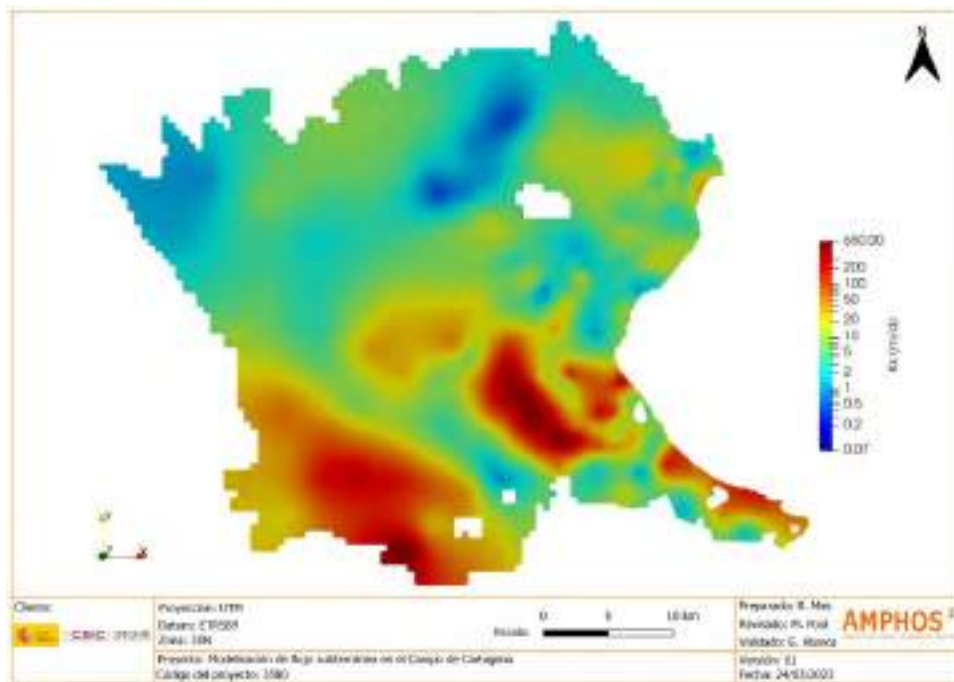


Figura 5-18: Distribución espacial de la permeabilidad (m/d) obtenido a partir del proceso de calibración.

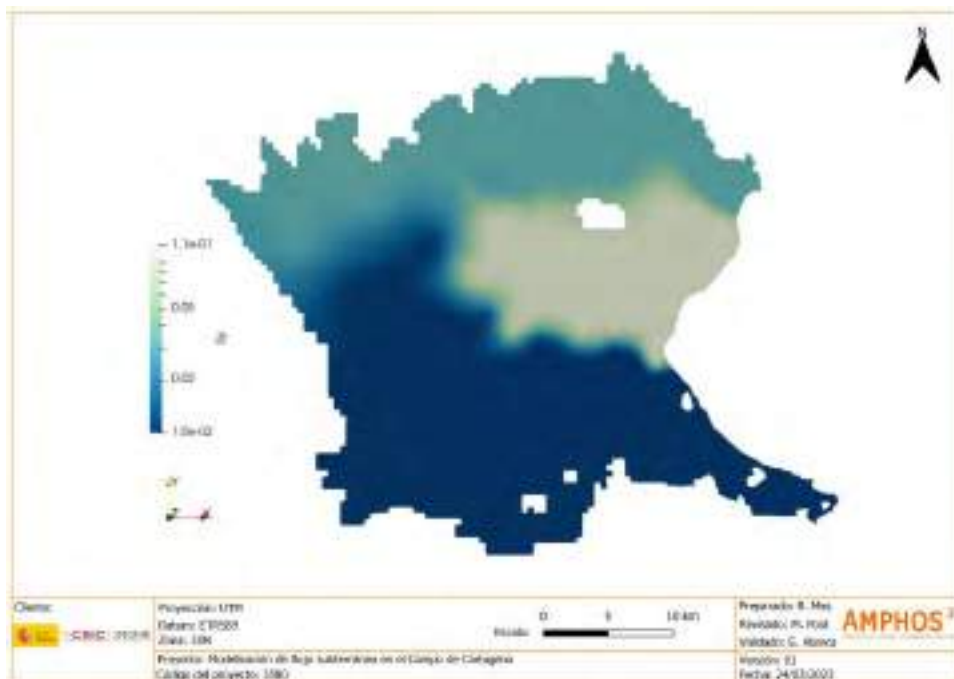


Figura 5-19: Distribución espacial del almacenamiento (porosidad drenable) obtenido a partir del proceso de calibración.

5.6 Velocidad del agua subterránea

La Figura 5-20 muestra la distribución espacial del logaritmo de la velocidad de Darcy (m/d) para el último paso de tiempo correspondiente a diciembre de 2020. Como se observa, las menores velocidades, con valores entre 0,3 y 1,5 m/d se localizan en gran medida en el sector central y norte del sistema. Coherente con los resultados obtenidos en Contreras et al. (2017) existe una zona de flujo preferencial con mayores velocidades en el sector sur hacia la franja costera, uniendo, aproximadamente, los puntos de observación de Los Fontes y Cortijo de la Palma, con Los Beatos 2 y el N-332(4). Finalmente, existe otra zona de mayores velocidades hacia Cartagena, que se corresponde a la zona de menor espesor del sistema y mayor permeabilidad obtenida a partir del proceso de calibración. En esta zona, como se ha comentado previamente, tanto los valores elevados de permeabilidad obtenidos a partir de la calibración como las altas velocidades pueden indicar errores geométricos asociados a una subestimación del espesor en ese sector que pueden resultar en valores irrealistas con respecto al modelo conceptual.

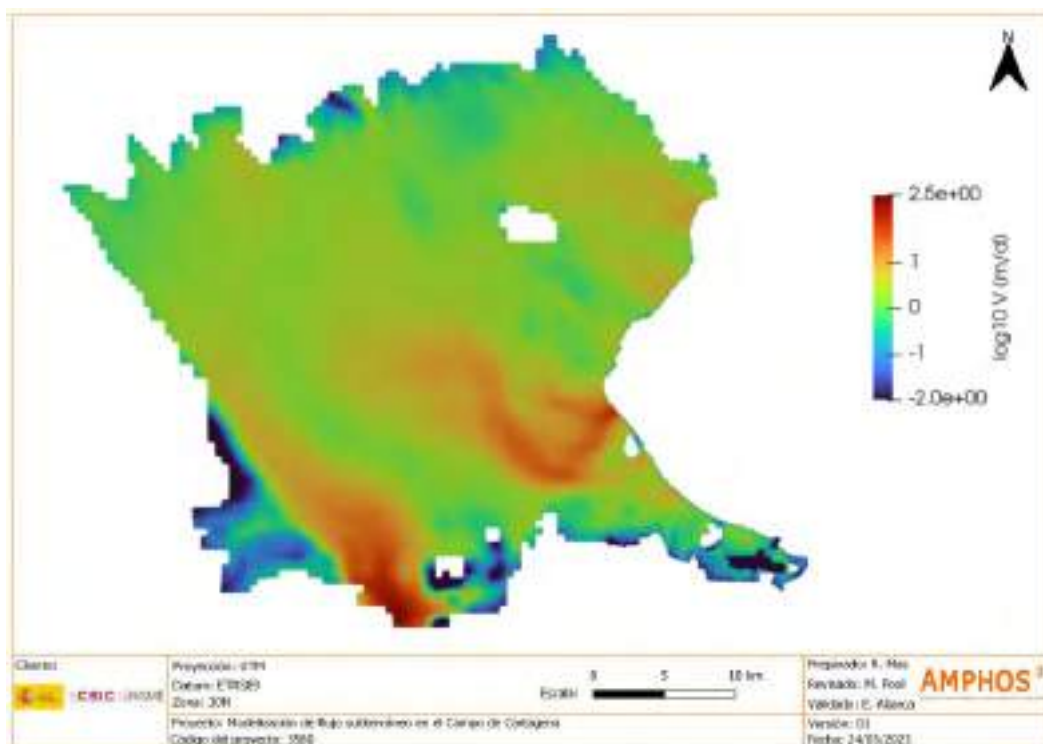


Figura 5-20: Distribución espacial de la velocidad obtenida para el último paso de tiempo de la simulación correspondiente a diciembre de 2020.

5.7 Transporte de partículas

Finalmente, una vez calibrado el modelo numérico, se ha realizado una simulación de transporte de partículas para evaluar los tiempos de tránsito desde la zona central y norte de la cuenca al Mar Menor. Para ello, se ha utilizado el código MODPATH incluyendo un total de 23 partículas en una línea con dirección NE-SO tomando como campo de velocidad el obtenido a partir del último paso de tiempo de la simulación (diciembre de 2020).

El resultado de la simulación de transporte de partículas se muestra en la Figura 5-21. Se ha incluido el campo de permeabilidad calibrado para entender más fácilmente las diferentes trayectorias de las partículas. Como se observa, las partículas presentan unos tiempos de tránsito variables hasta alcanzar el contorno del Mar Menor, con valores entre 35 años al norte del sistema hasta 225 y 130 años hacia el sector sur. Por otro lado, ciertas partículas al sur del cerro Cabezo Gordo nunca alcanzan el contorno debido a la existencia de zonas de baja permeabilidad donde se quedan atrapadas. Por otro lado, las partículas inyectadas más al sur de la línea siguen una trayectoria NO-SE preferente, y al llegar al sector del pozo Los Beatos cambian su trayectoria hacia el NE siguiendo las zonas de mayor permeabilidad (y velocidad) de la franja costera y con tiempos de tránsito de aproximadamente 15 años.

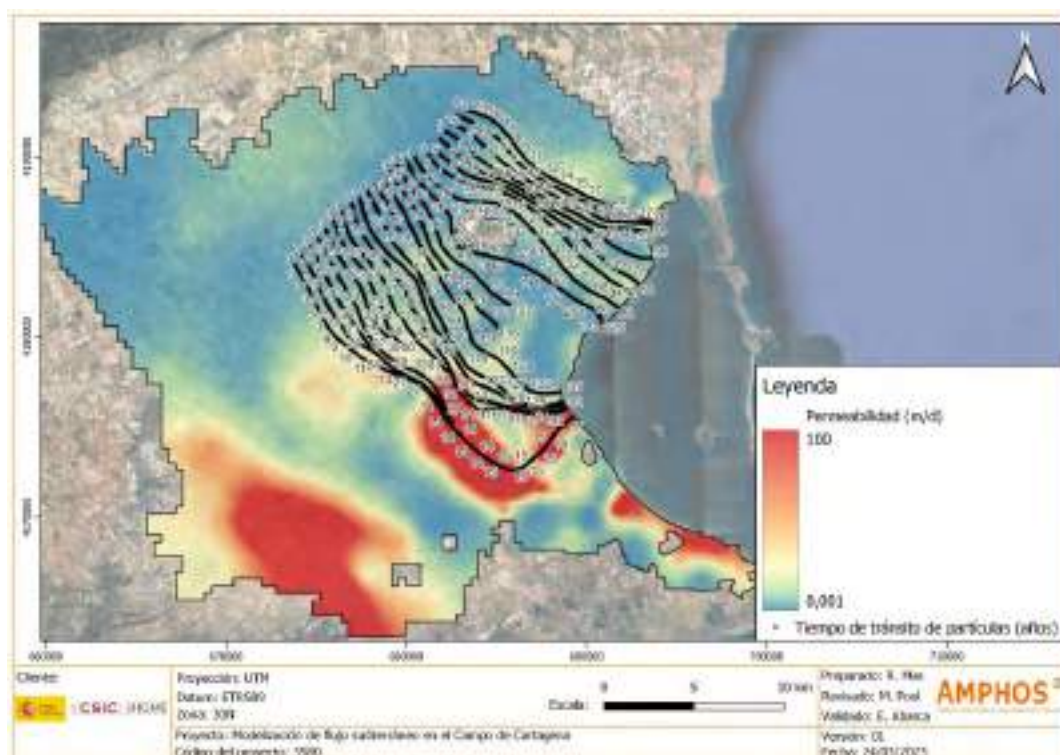


Figura 5-21: Simulación de partículas con tiempo de tránsito (años) y trayectorias hasta el Mar Menor. Campo de permeabilidad obtenido a partir del proceso de calibración.

6 Resumen y conclusiones

El principal objetivo del presente estudio es avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena mediante realización de un modelo conceptual y matemático de flujo subterráneo que simule desde el régimen natural (previo a 1920) hasta la actualidad.

El modelo conceptual definido considera una recarga por precipitación e infiltración de excedentes de riego como entradas al sistema, y la descarga al Mar Menor, las extracciones históricas del acuífero cuaternario y descarga al sector de Cartagena como salidas. No se ha considerado la transferencia de agua subterránea del acuífero Cuaternario a unidades acuíferas inferiores debido a que se asume que su magnitud es pequeña en comparación con los otros elementos del balance hídrico.

El modelo numérico se ha desarrollado en el software MODFLOW con la interfaz gráfica Groundwater Vistas versión 8.23 (GWV8). El dominio del modelo numérico considera como límites laterales hacia el norte, sur y suroeste, los afloramientos cuaternarios presentes en la zona de estudio. El límite noroeste se ha tomado como límite una barrera geológica (elevación del sustrato), que se ha hecho coincidir, a efectos del modelo, con el límite oriental de la cuenca de la rambla de la Murta. El límite este viene definido por el contacto con la laguna del Mar Menor. La base del modelo está definida por materiales de baja permeabilidad del Plioceno en la parte norte, mientras que en la parte sur se han agrupado los materiales cuaternarios y pliocenos considerando el conjunto como pliocuaternarios, dado que presentan comportamiento hidráulico similar.

El espesor del acuífero se ha definido integrando todos los antecedentes disponibles, obteniendo un espesor promedio de 65 a 70 m, con espesores mayores en la franja más cercana al borde costero del Mar Menor y hacia el oeste, y menores hacia el sur alcanzando valores de hasta 5 m en el borde del modelo.

El modelo numérico considera una única capa para representar los materiales cuaternarios y pliocuaternarios, con un tamaño máximo de celdas en la horizontal de 400 x 400 m que disminuyen hacia la franja costera hasta celdas de 50 x 50 m para obtener una mayor precisión en los resultados obtenidos.

El modelo numérico resuelve el flujo en medio saturado y con un periodo de simulación entre 1920 y 2020. De este modo el modelo ha sido calibrado para un periodo largo representativo que incluye diferentes condiciones climáticas. La simulación numérica integra tanto el régimen estacionario (primer paso de tiempo) como el régimen transitorio con una discretización temporal mensual.

Se han definido diferentes condiciones de contorno para representar las entradas y salidas del sistema: flujo prescrito para la recarga por precipitación e infiltración de excedentes de riego y la descarga por extracciones, nivel prescrito para representar el contacto con el Mar Menor, y condición mixta no lineal para representar la descarga hacia Cartagena.

Para ajustar y reproducir la dinámica del sistema, se ha realizado una calibración estocástica con puntos piloto con el código PEST, obteniendo una distribución espacial heterogénea para los parámetros hidráulicos (permeabilidad y almacenamiento).

A continuación, se resumen los principales resultados de la modelación:

- Ajustes de niveles. De forma general el modelo reproduce adecuadamente la dinámica del sistema, obteniendo un ajuste satisfactorio entre niveles medidos y calculados. El error cuadrático medio normalizado (nRMS) para toda la simulación es inferior 1%, con un error medio absoluto de 1,1 m, lo cual indica una calibración óptima en términos de estadísticos. Los residuales muestran una distribución normal, centrada en 0, con el 88,4% de residuales entre -2 y +2 m.
- Piezometría. En general, y en concordancia con el modelo conceptual, el modelo numérico reproduce tanto las tendencias de nivel medida en los puntos de observación como la distribución de isopiezas medida tanto para el año 1961 como la actual. El sistema presenta un flujo preferente oeste-este con descarga hacia la laguna con mayor potencial hidráulico en las zonas más elevadas del sector, disminuyendo a medida que la topografía alcanza cotas más bajas. El espesor saturado promedio obtenido para el año 2020 es de 53 m.
- Balance hídrico. La única entrada al sistema se corresponde a la recarga directa por precipitación e infiltración de excedentes de riego. La recarga promedio resultante para todo el periodo simulado de 1920 a 2020 se ha estimado en 72 hm³/año. Las descargas principales se corresponden con la salida al Mar Menor, con un promedio de 34 hm³/año, y la extracción del acuífero cuaternario, con un promedio para toda la serie de 31 hm³/año. Finalmente, existe una pequeña descarga hacia Cartagena de unos 8 hm³/año. Sin embargo, cabe destacar que la descarga al Mar Menor puede ser menor que la obtenida debido a que no se ha considerado en la modelación la transferencia de agua subterránea del acuífero Cuaternario hacia los acuíferos inferiores, aunque ésta correspondería a la parte norte y se estima reducida. Desde el comienzo de la simulación la variación del almacenamiento resultante es negativa, siendo la descarga del sistema hacia el Mar Menor y la extracción del Cuaternario superior a la recarga. En la década de los 80 y 90, la recarga aumenta, y disminuye la extracción del Cuaternario, obteniendo una variación del almacenamiento positiva. Hacia el final de la simulación la recarga y la extracción del Cuaternario disminuyen,

resultando una variación del almacenamiento cercana a 0. Sin embargo, la evolución de los niveles indica que, aunque el acuífero se está recuperando, al final de la simulación no ha alcanzado la situación de equilibrio natural similar a la que había antes de 1920.

- Los parámetros calibrados son coherentes con los antecedentes y modelos previos, obteniendo patrones similares tanto en la distribución de la permeabilidad como en el almacenamiento o porosidad drenable. Por otro lado, el proceso de calibración arroja en ciertos sectores valores elevados de permeabilidad que pueden indicar errores en la geometría, singularmente en la parte sur.
- Velocidad del agua subterránea. La distribución de velocidades obtenidas para el último paso de tiempo de la simulación muestra velocidades menores en el sector central y norte del sistema, con valores entre 0,3 y 1,5 m/d. Coherente con los antecedentes, existe una zona de flujo preferencial con mayores velocidades en el sector sur hacia la franja costera al sur de la rambla del Albuñón.
- Transporte de partículas. Una vez calibrado el modelo numérico, se ha realizado una simulación de transporte de partículas para evaluar los tiempos de tránsito desde la zona central y norte de la cuenca al Mar Menor. Las partículas presentan unos tiempos de tránsito variables hasta alcanzar el contorno del Mar Menor, con valores entre 35 años al norte del sistema hasta 225 y 130 años hacia el sector sur. Existe una trayectoria de mayor velocidad en la franja central costera, que coincide con el sector de mayor espesor y permeabilidad, con tiempos de tránsito de aproximadamente 15 años.

7 Recomendaciones

Con el objetivo de robustecer el modelo hidrogeológico conceptual y numérico definir la dinámica subterránea del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena, a continuación, se recomiendan las siguientes actividades.

- **Sistema de monitoreo del acuífero cuaternario.** El sistema acuífero del Campo de Cartagena ha sido altamente estudiado y monitorizado y existe una red de monitoreo extensa. Sin embargo, existe poca información que se localice únicamente en el acuífero cuaternario, y la existente se centra a lo largo de la franja costera, existiendo mucha incertidumbre en la zona central, sur y norte del sistema. Por ello se recomienda la ejecución de sondeos hasta el acuífero Plioceno. En cada uno de los sondeos a construir se debe realizar una completa caracterización litológica que permita conocer variaciones locales de los materiales. Estos sondeos deberán quedar habilitados como piezómetros de control y seguimiento.
- **Perfiles geofísicos:** con el objetivo de definir la geometría del acuífero cuaternario en las zonas con escasa información o de estimar de forma más precisa algunas de las áreas con moderada o alta incertidumbre.
- **Evaluación de escenarios futuros que consideren el cambio climático y regímenes de explotación.** Se recomienda realizar escenarios futuros que permitan evaluar la vulnerabilidad del acuífero cuaternario a eventos asociados al cambio climático (sequías extremas) y diferentes regímenes de extracción.
- **Simulación del transporte de nitratos.** Para investigar el transporte de nitratos y la cuantificar la descarga actual al Mar Menor, se debe desarrollar un modelo de transporte de solutos que reproduzca tanto la historia del sistema, como el estado actual. Dicha simulación deberá incluir los procesos en la zona no saturada del sistema. La calibración necesitará disponer de puntos realmente representativos de los procesos y la hidrodinámica.

Finalmente, debido a la escala espacial y temporal del modelo, éste no logra ajustar con precisión las fluctuaciones medidas en los pozos de observación más recientes localizados en la franja costera (red de sondeos CHS Mar Menor, SM), debido a que son fluctuaciones de corto periodo. Para mejorar el ajuste en estos puntos se recomienda (i) realizar una calibración de las funciones temporales de la recarga, y (ii) disminuir el paso de tiempo de mensual a diario.

8 Referencias

Alcalá, F.J. and Custodio, E. (2015). Natural uncertainty of spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 524: 642–661.

Alcolea, A., Contreras, S., Hunink, J. E., García-Aróstegui, J. L. and Jiménez-Martínez, J. (2019). Hydrogeological modelling for the watershed management of the Mar Menor coastal lagoon (Spain). *Science of the Total Environment*, 663, 901-914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.375>

Aragón, R., Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J.L. and Hornero, J. (2009). Hidrogeología y recursos hídricos subterráneos en el área Campo de Cartagena - Mar Menor, in: *El Mar Menor. Estado Actual Del Conocimiento Científico*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia, pp. 84–108.

Barnett, B., Townley, L. R., Post, V., Evans, R. E., Hunt, R. J, Peeters, L., Richardson, S., Werner, A. D., Knapp, A. and Boronkay, A. (2012). *Australian groundwater modelling guidelines*. Published by the National Water Commission June 2012. ISBN: 978-1-921853-91-3.

Baudron, P., Barbecot, F., García-Aróstegui, J.L., Leduc, C., Travi, Y. and Martínez-Vicente, D. (2014). Impacts of human activities on a semiarid multilayer aquifer recharge (Campo de Cartagena, Spain). *Hydrological Processes*, 28(4): 2223-2236.

Carreño, M. F. (2015). Seguimiento de los Cambios de Usos y su Influencia en las Comunidades y Hábitats Naturales en la Cuenca del Mar Menor, 1988-2009, con el Uso de SIG y Teledetección. Tesis doctoral. Universidad de Murcia, Departamento de Ecología e Hidrología.

CHS-Tragsatec (2020). Cuantificación, control de la calidad y seguimiento piezométrico de la descarga de agua subterránea del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor. Realizado por Tragsatec. Disponible en: <https://www.chsegura.es/static/marmenor/DescargasMarMenorCuaternarioCampoCartagena.zip>

Contreras, S., Alcolea, A., Jiménez-Martínez, J. y Hunink, J. E. (2017). Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario. Comunidad de Regantes Arco Sur Mar Menor S.L. FutureWater Report 176. Disponible en: <https://www.futurewater.es/projects/descarga-mar-menor/>

Doherty, J. E. (2003). Ground water model calibration using Pilot Points and regularization. *Ground Water* 41(2):170–177. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02580.x

Doherty J. E. (2004). PEST: model-independent parameter estimation user manual, 5th edn. Watermark, Brisbane, Australia

Doherty, J. E., Fienen, M. N., and Hunt, R. J. (2010a). Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-point theory, guidelines, and research directions: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5168, 36 p.

Doherty, J.E., Hunt, R.J., and Tonkin, M.J. (2010b). Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for model-parameter and predictive-uncertainty analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5211, 71 p.

Domingo-Pinillos, J. C. (2019). Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en un acuífero multicapa con explotación intensiva. Campo de Cartagena (SE España). Tesis doctoral Universidad Católica San Antonio. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10952/4253>

García-Aróstegui, J. L. (2021). Estado de las aguas subterráneas en el Campo de Cartagena: la contribución del proyecto INTERREG SUDOE (AQUIFER). Hacia una agricultura medioambientalmente compatible con el Mar Menor; 5 de julio de 2021. Cartagena, Murcia.

García-Aróstegui, J. L., Jiménez-Martínez, J., Baudron, P., Martínez-Vicente, D. and Guerra, J. (2012). Geometry of the Campo de Cartagena and implications in hydrogeological functioning. New contributions to the knowledge of coastal aquifers. Hydrogeology and Groundwater Series 29. Geological Survey of Spain, pp. 439–450.

García-Aróstegui, J. L., Marín Arnaldos, F. and Martínez Vicente, D. (2017). Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor, 1. Hidrogeología. Murcia.

Gómez-Hernández, J., Sahuquillo, A. and Capilla, J. (1997). Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data – I. Theory. J. Hydrol. 203 (1–4), 162–174. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(97\)00098-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(97)00098-x).

IGME (1991). Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena.

IGME (1994). Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena. (Murcia, España). Murcia: Instituto Geológico y Minero de España.

ITGE (1989). Geometría de los acuíferos del Campo de Cartagena (Murcia) Volumen 1/3 Memoria. Volumen 2/3 Mapas. Volumen 3/3 Anexos: inventario de puntos de agua. Informe Técnico. Murcia: Inst. Tecnológico Geominero de España.

Jiménez-Martínez, J., Candela, L., García-Aróstegui, J. L. and Aragón, R. (2012). A 3D geological model of Campo de Cartagena, SE Spain. Hydrogeological implications. *Geologica Acta*, 10: 49–62.

Rodríguez, T. (1995). Funcionamiento hidrogeológico del Campo de Cartagena. *Hidrogeología* 11, 21–38.

Senent-Alonso, M., Martínez-Vicente, D., Cabezas, F., García-Aróstegui, J. L. y Baudron, P. (2009). Aproximación mediante modelización matemática de las descargas del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor, Murcia. *El Mar Menor: Estado actual del conocimiento científico*. Murcia, España: Instituto Euromediterráneo del Agua, pp. 109–130.

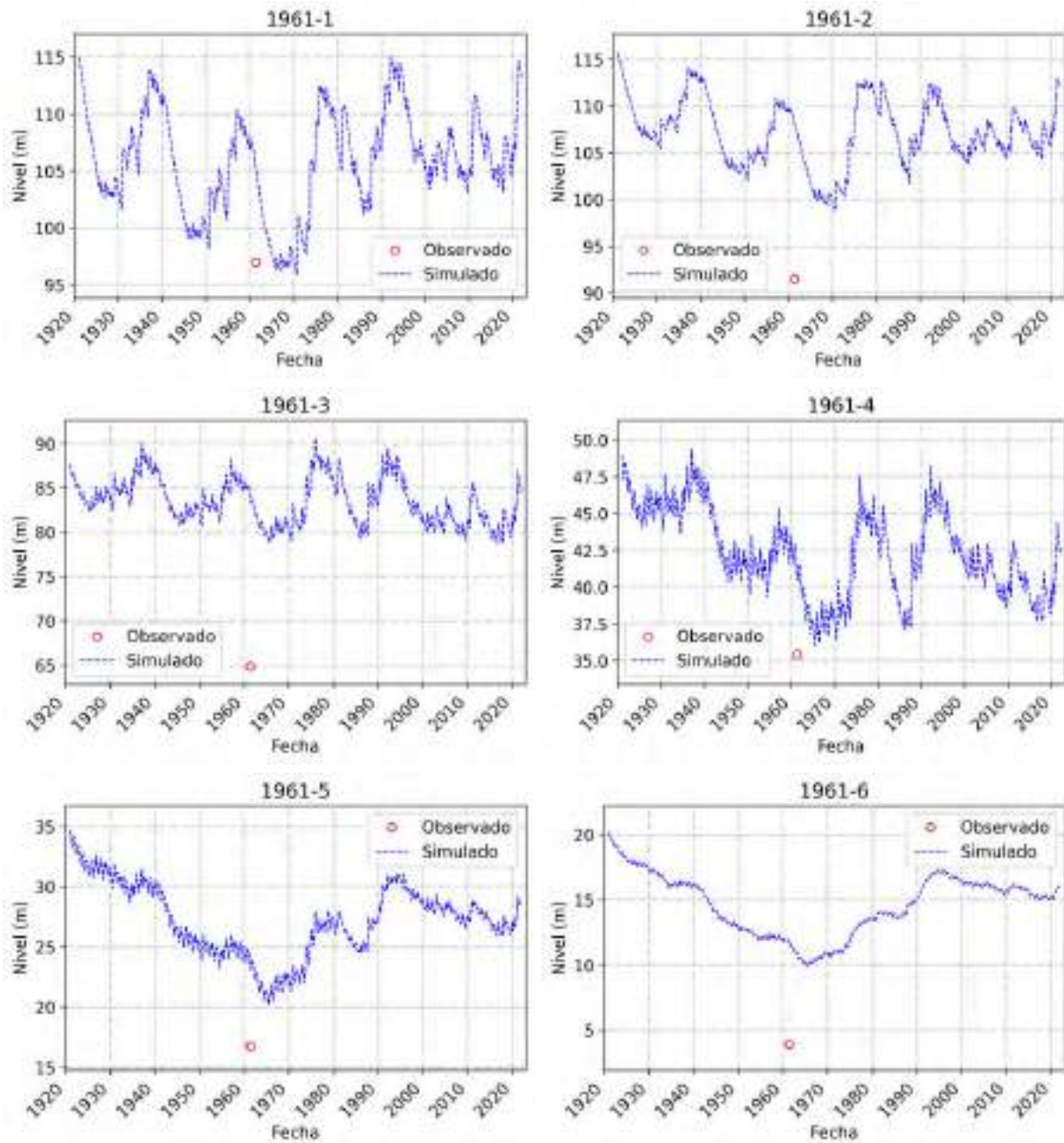
Terink, W., Lutz, A. F., Simons, G. W. H., Immerzeel, W. W. and Droogers, P. (2015). SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology. *Geosci. Model Dev.* 8, 2009–2034. doi:10.5194/gmd-8-2009-2015.

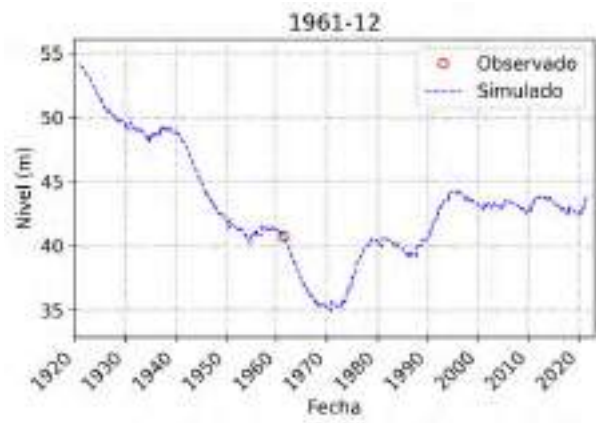
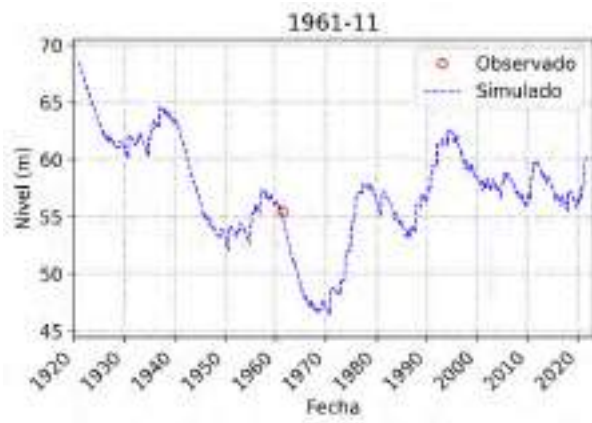
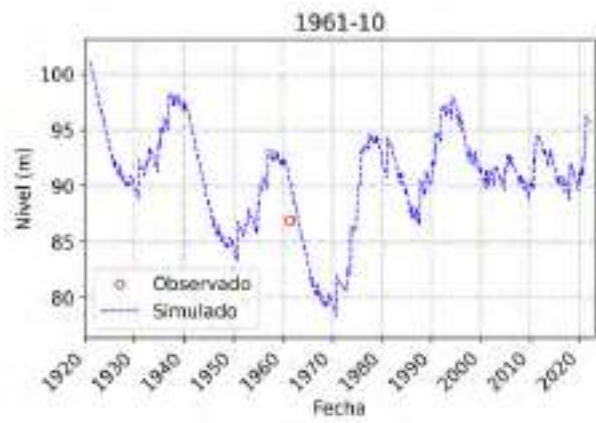
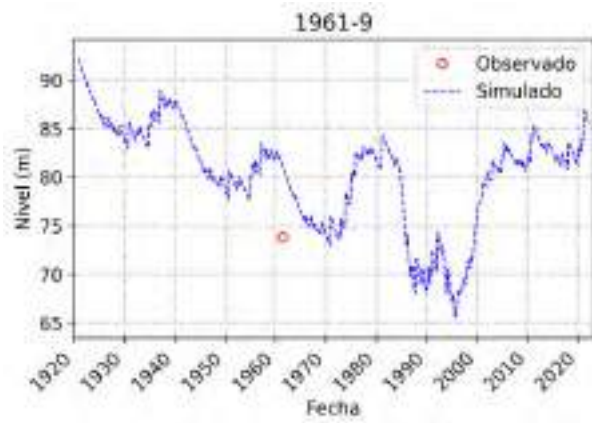
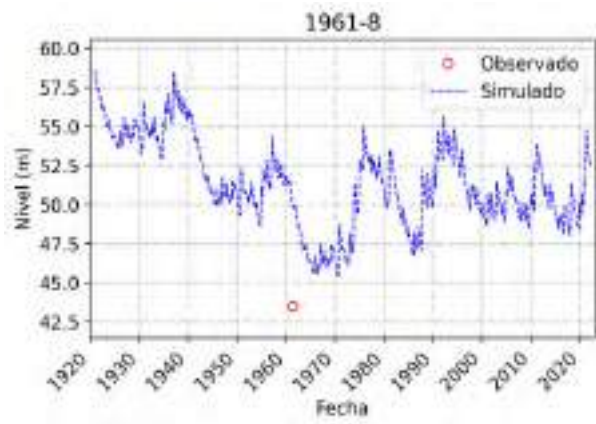
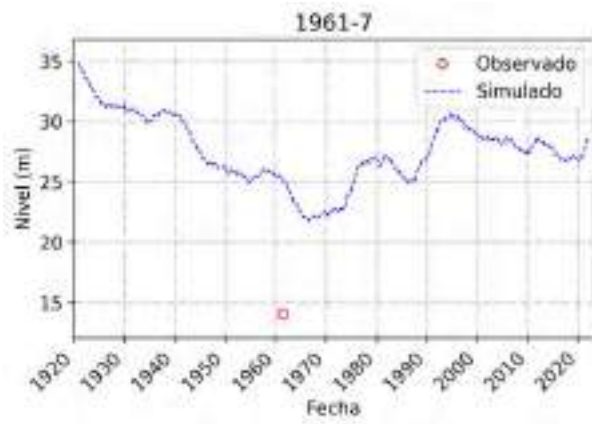
Tragsatec (2013). Informe hidrogeológico de la red de drenaje de aguas salobres del Campo de Cartagena. Cartagena.

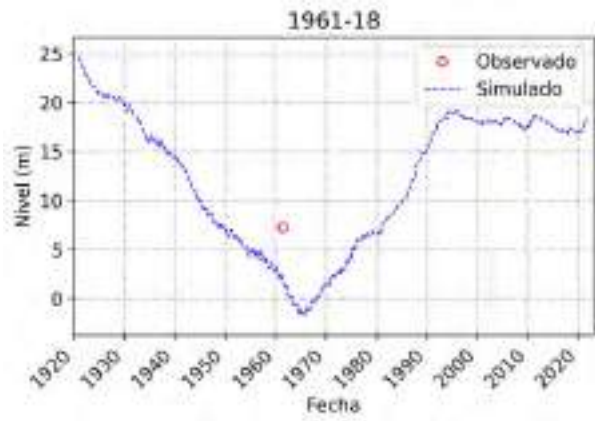
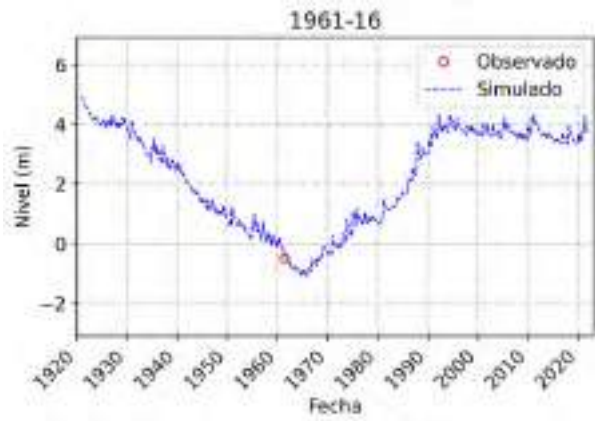
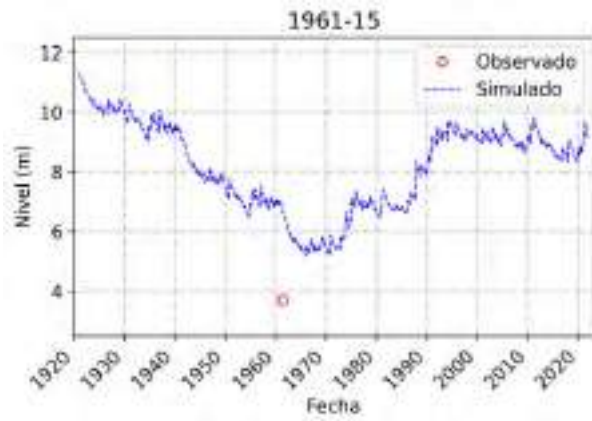
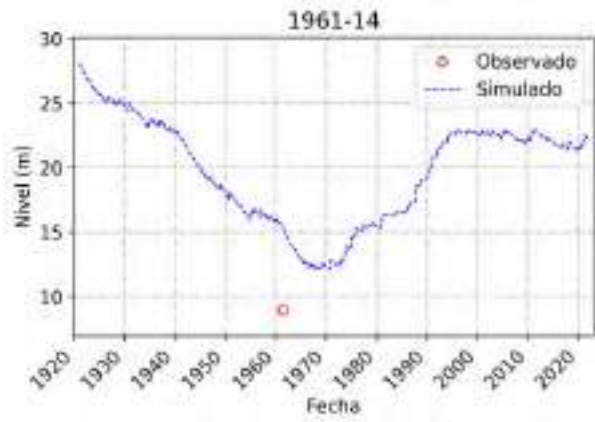
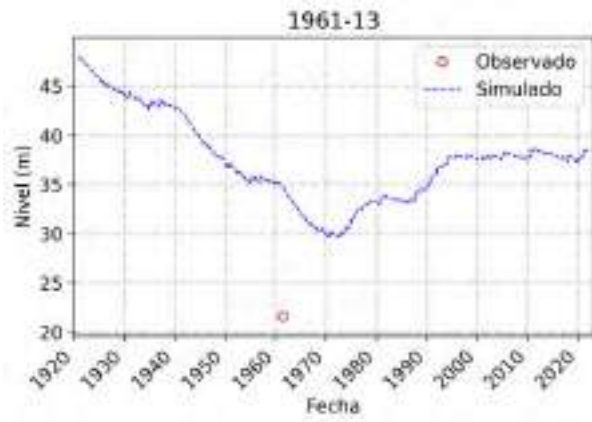
Apéndices

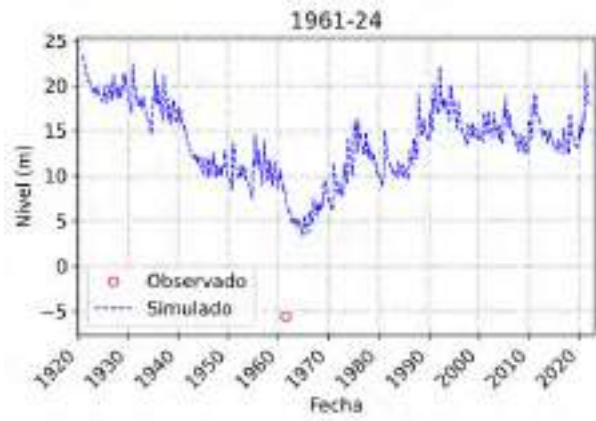
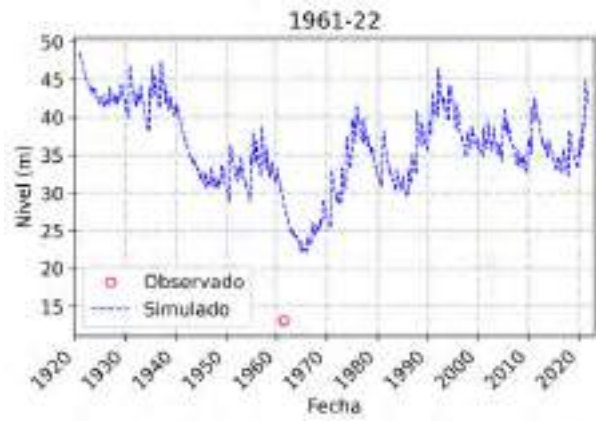
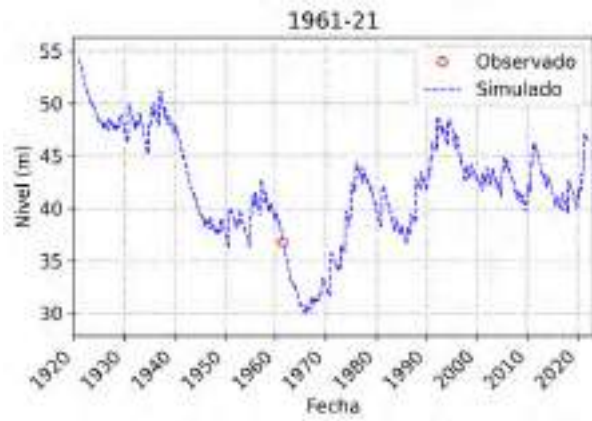
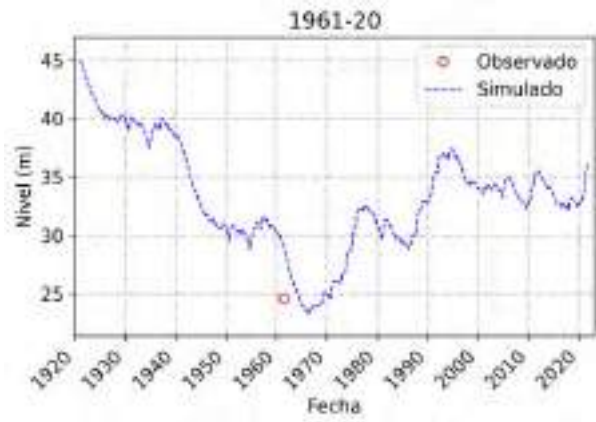
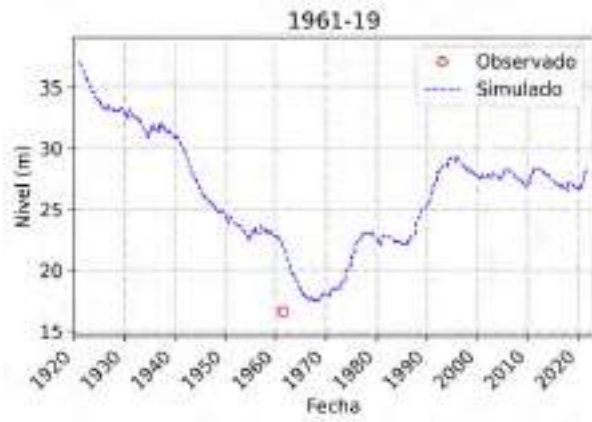
A. Niveles observados vs. simulados

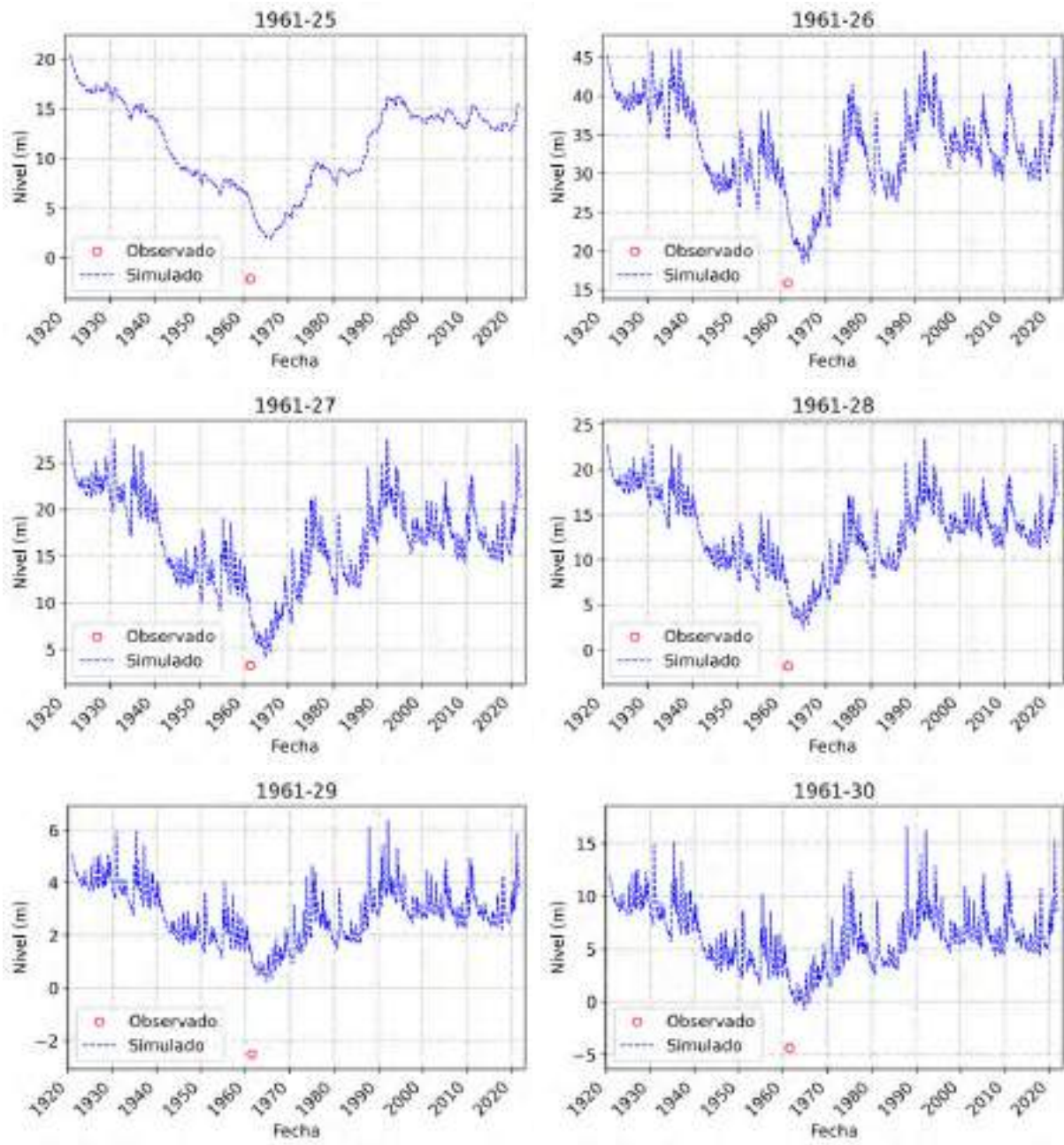
A.1 1920 – 2020

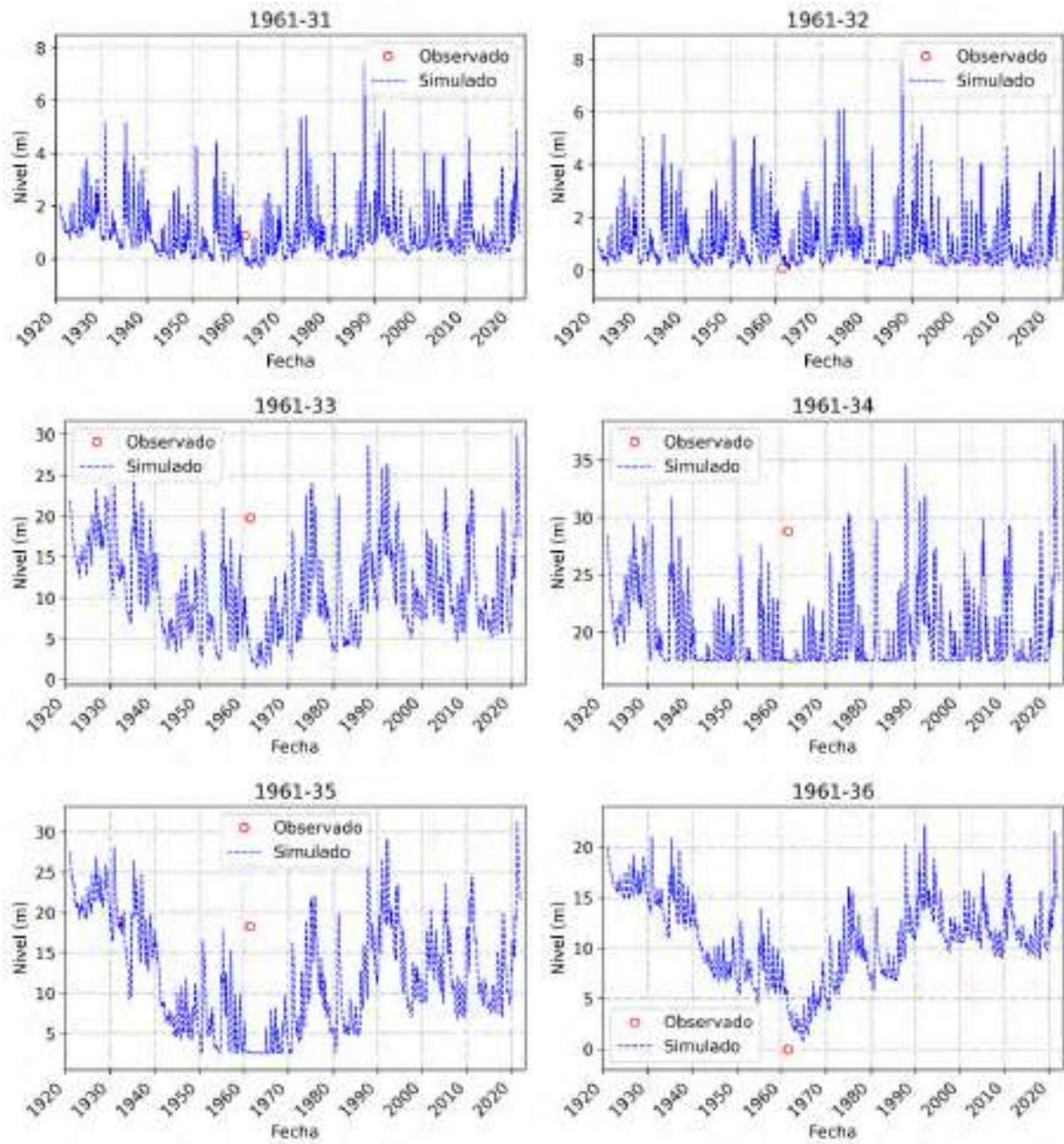


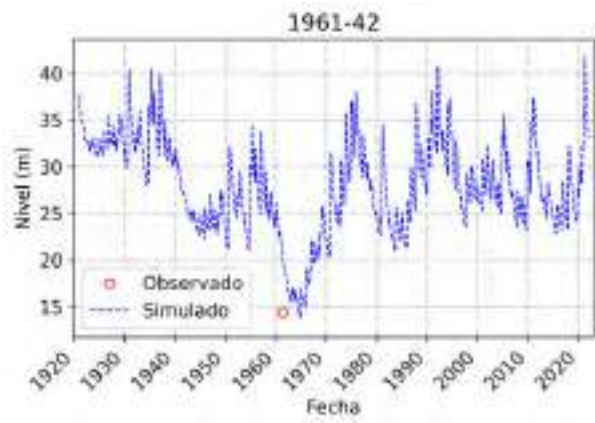
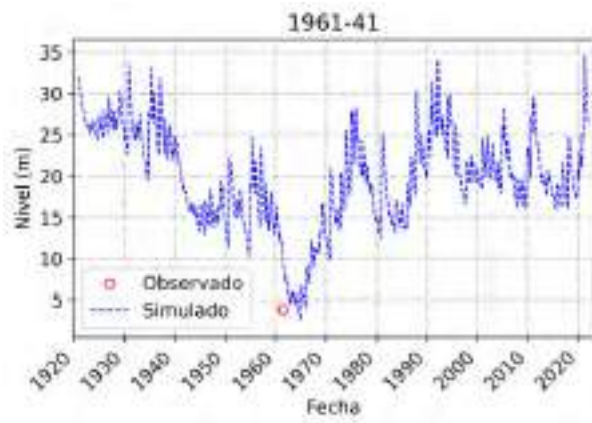
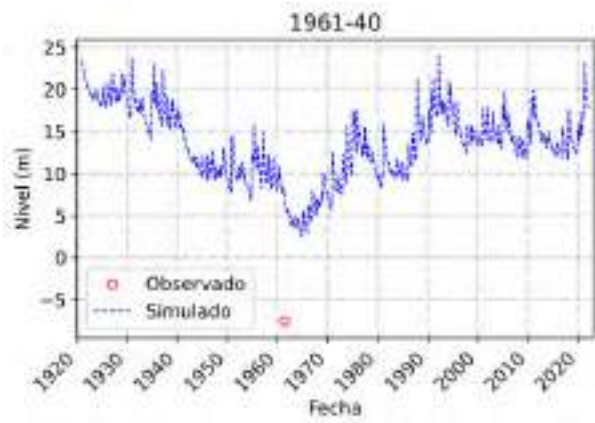
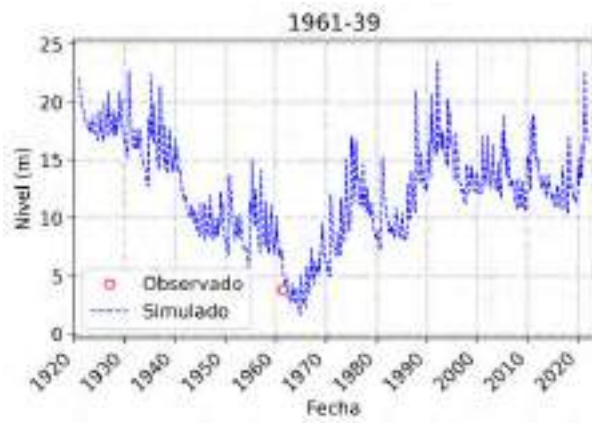
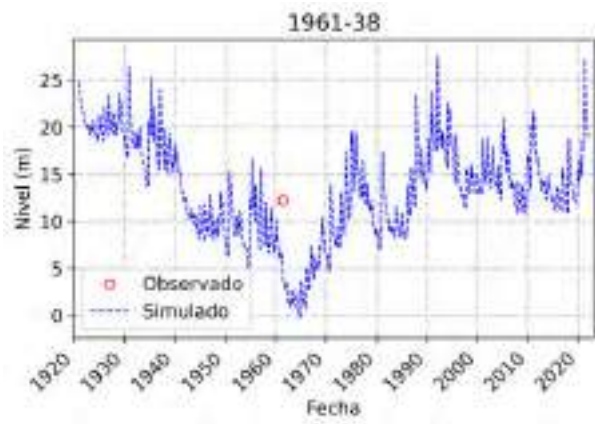
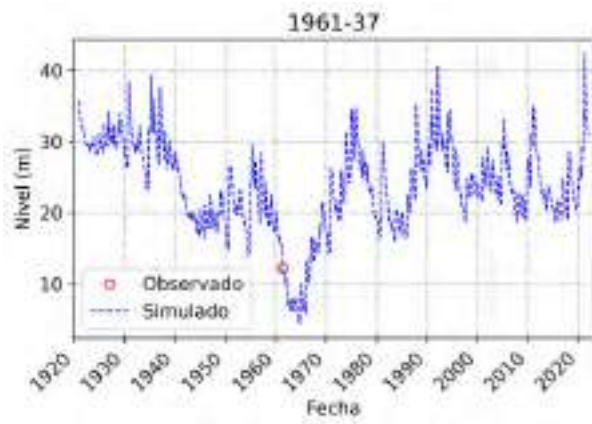


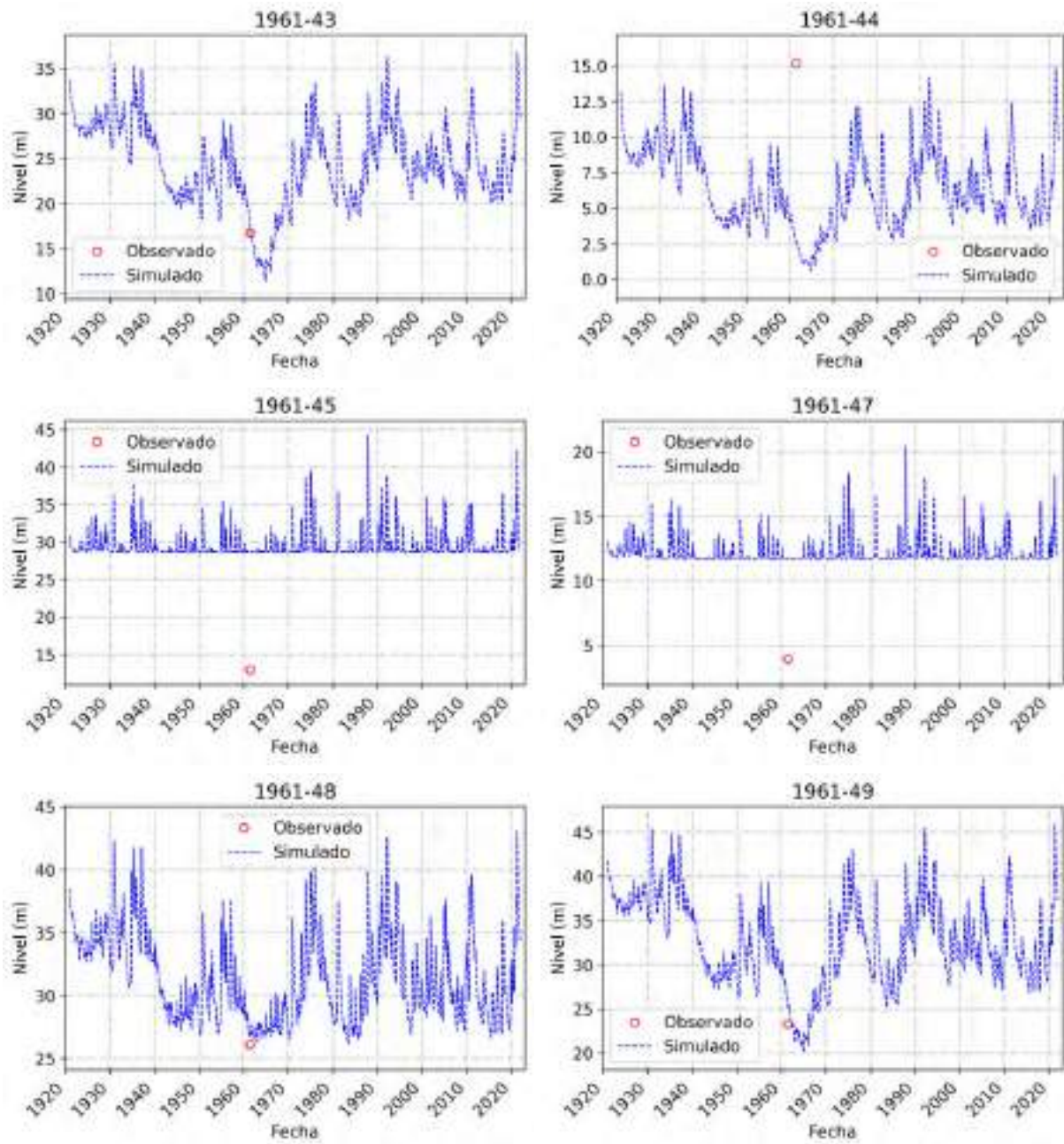


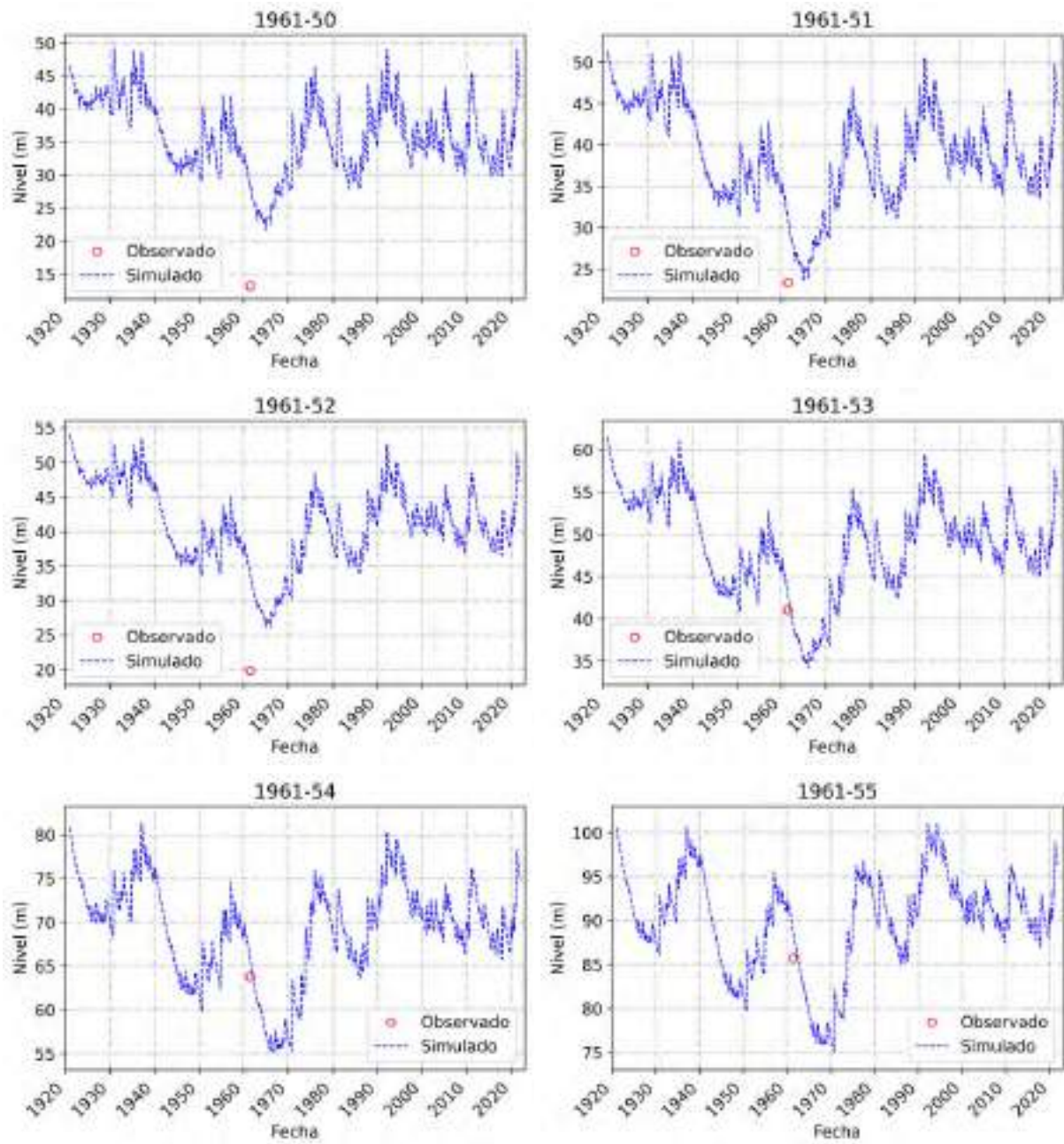


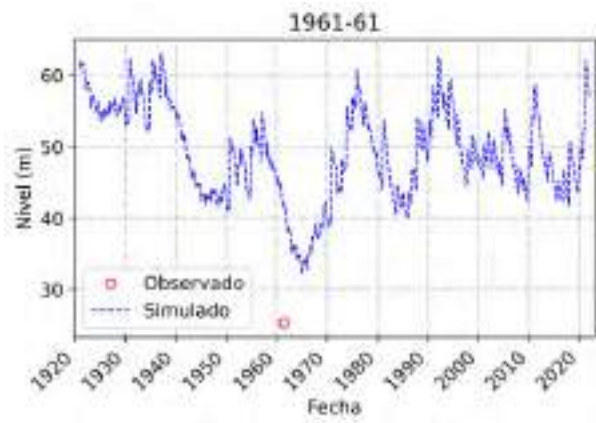
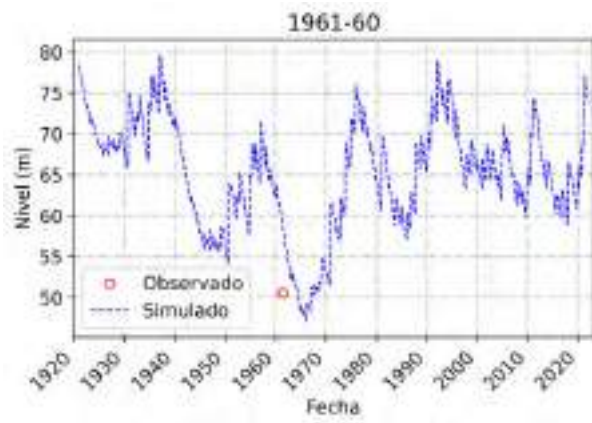
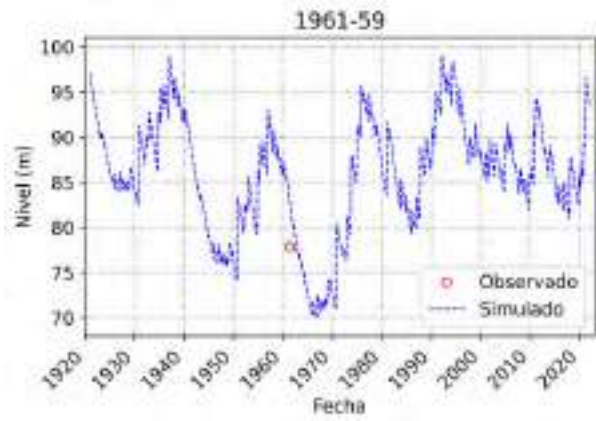
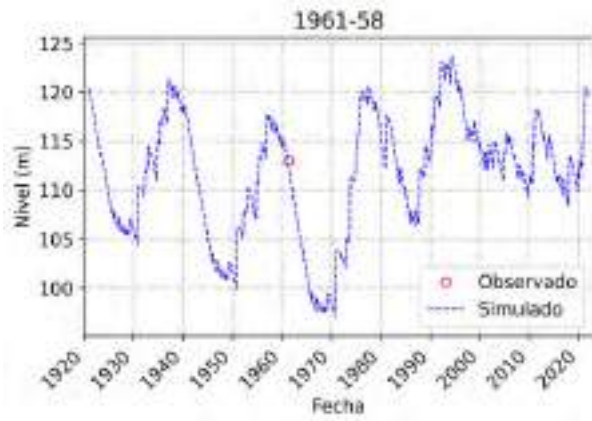
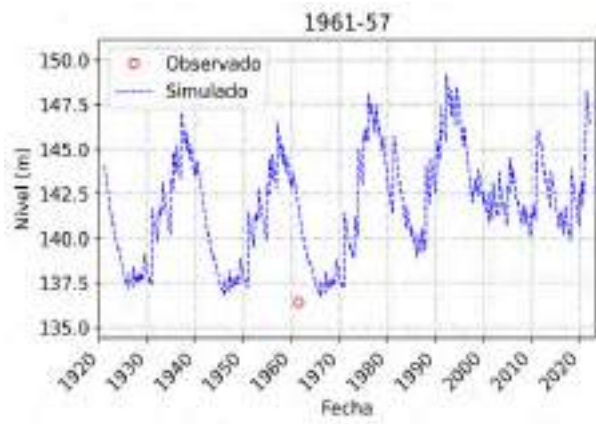
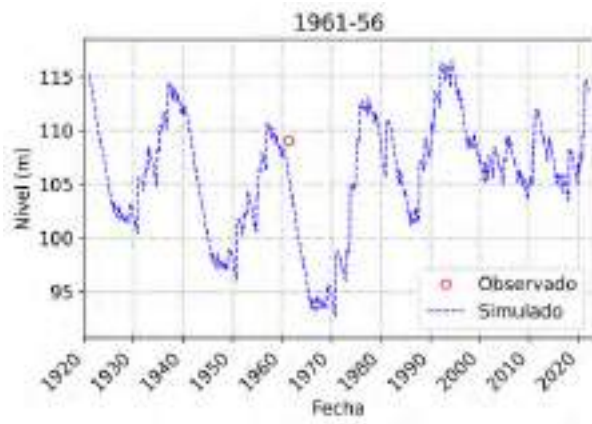


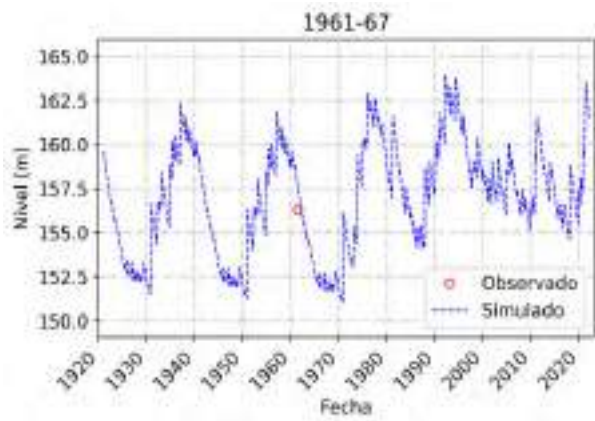
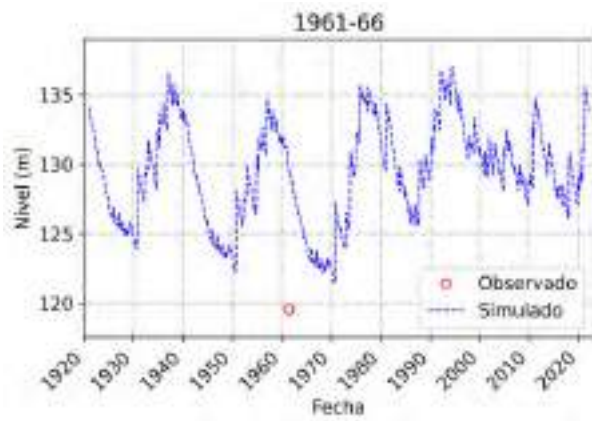
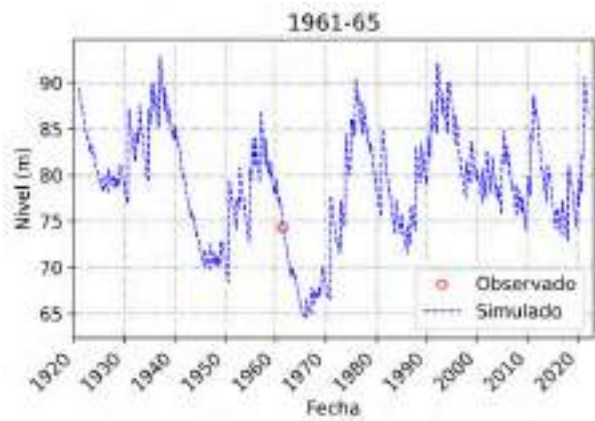
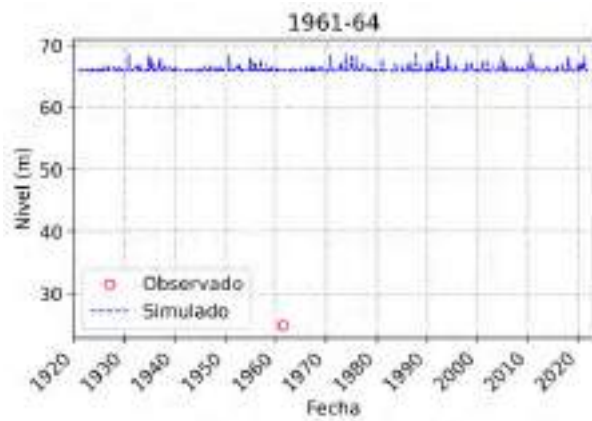
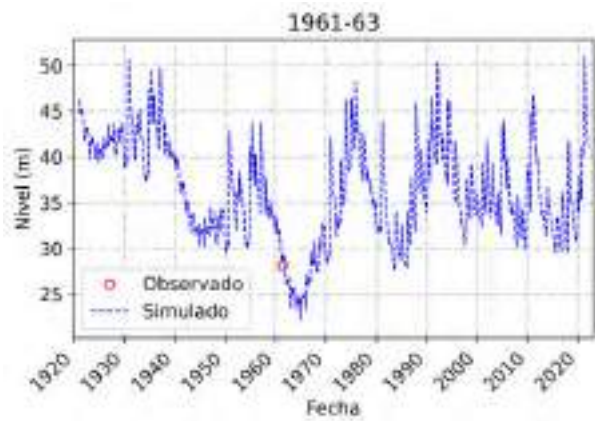
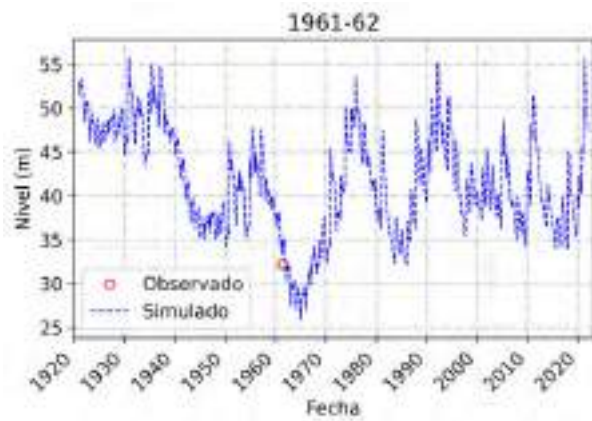


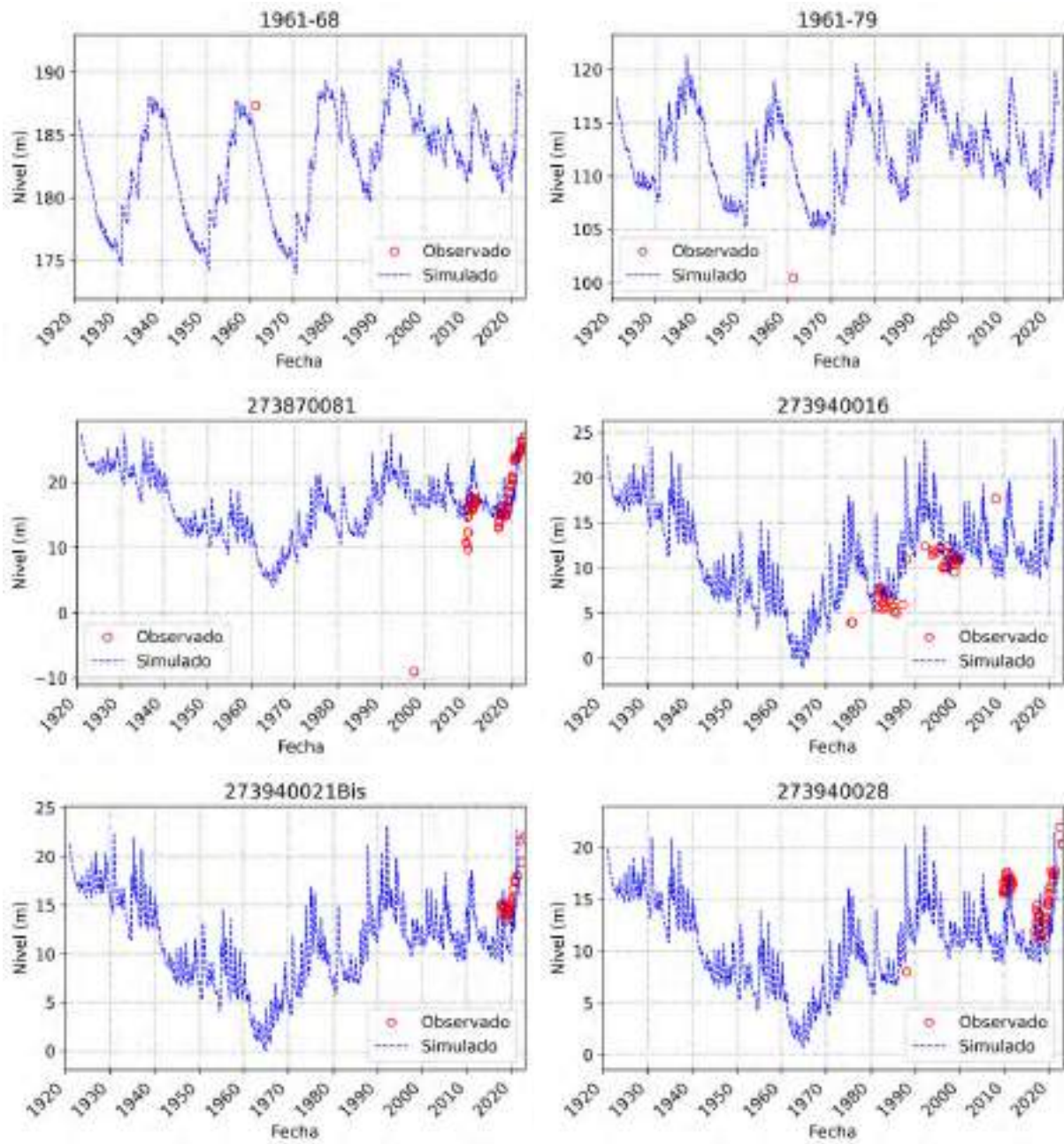


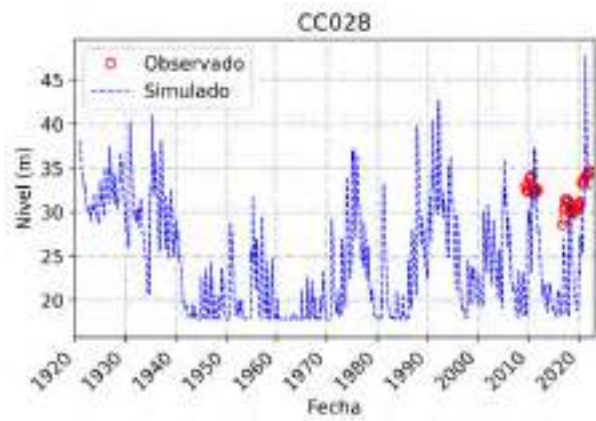
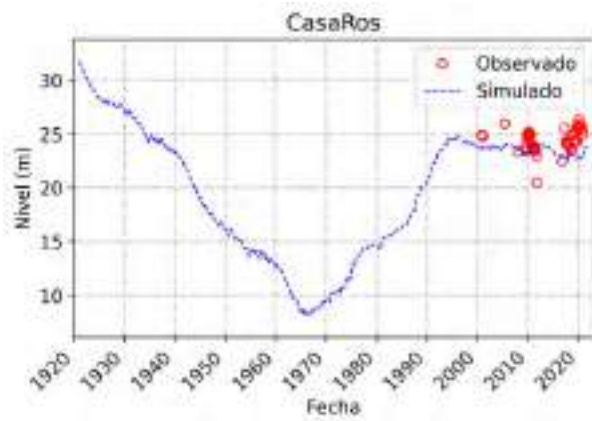
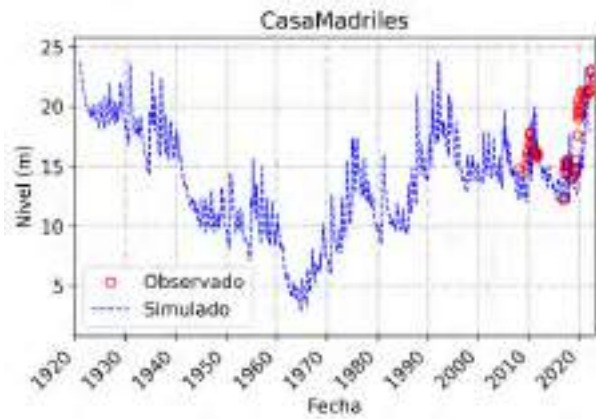
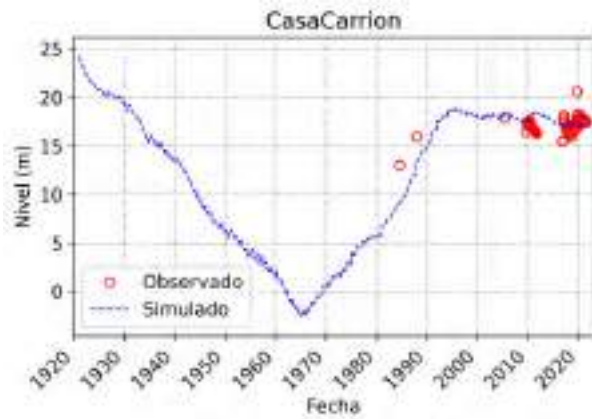
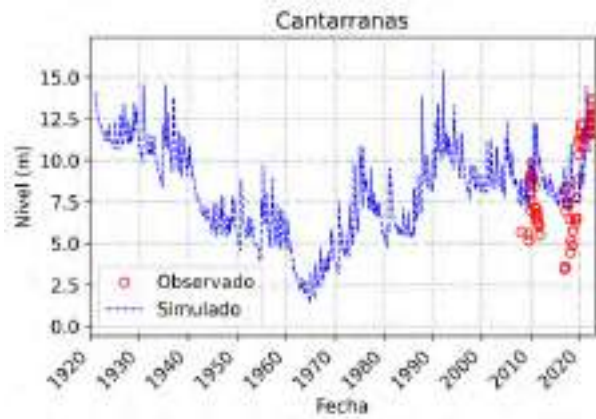
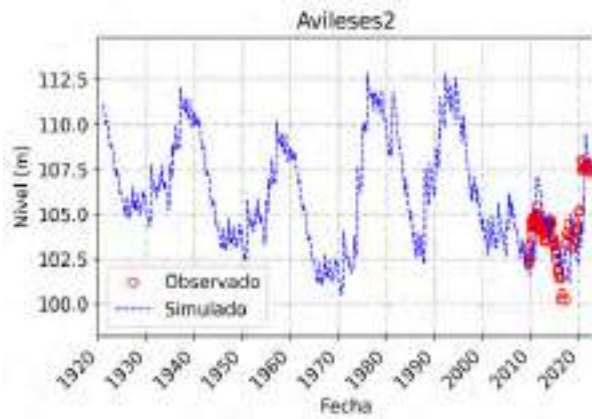


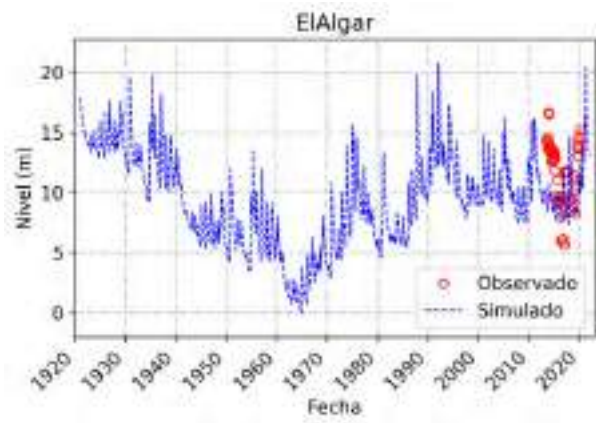
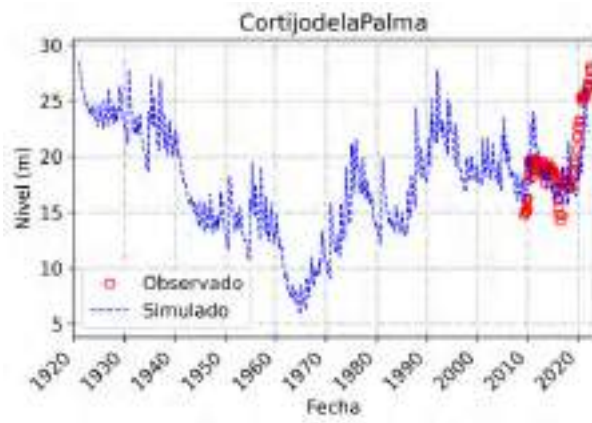
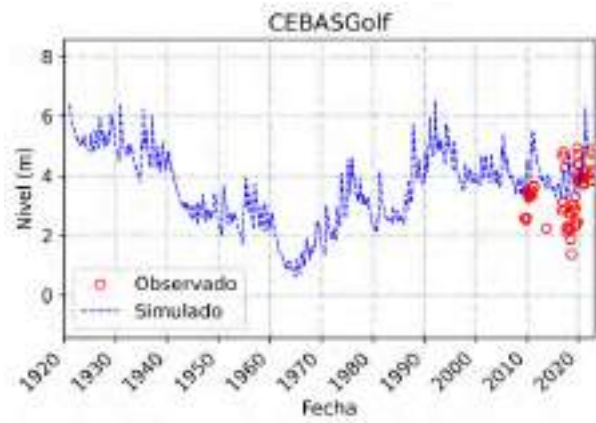
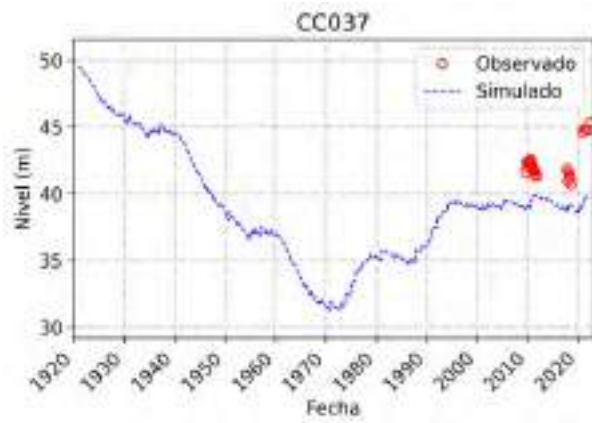
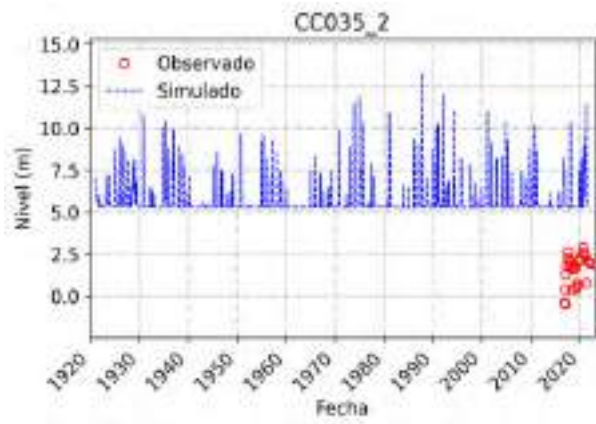
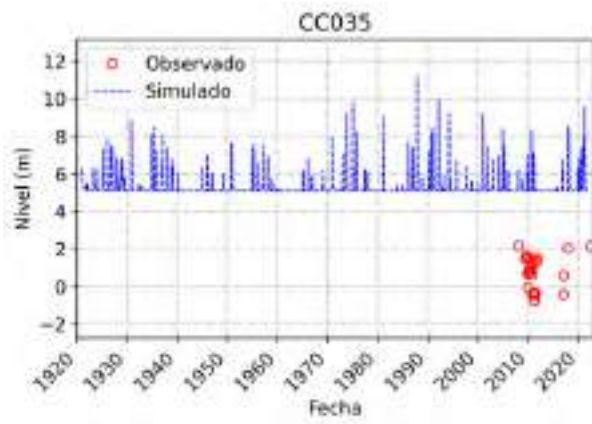


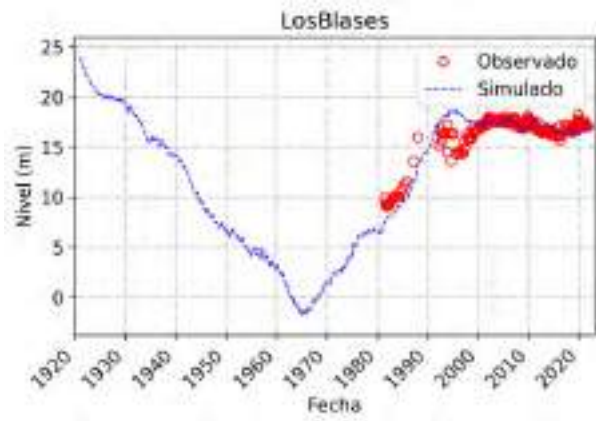
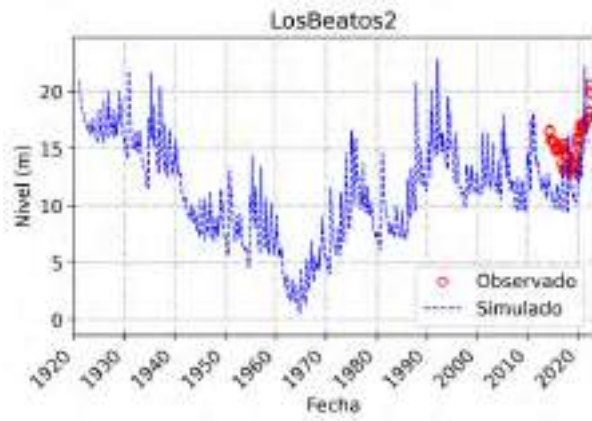
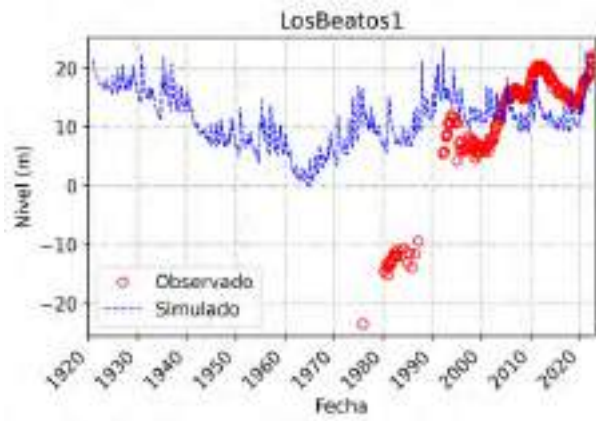
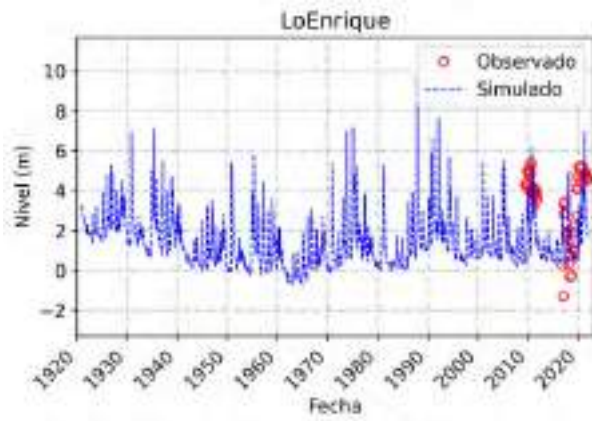
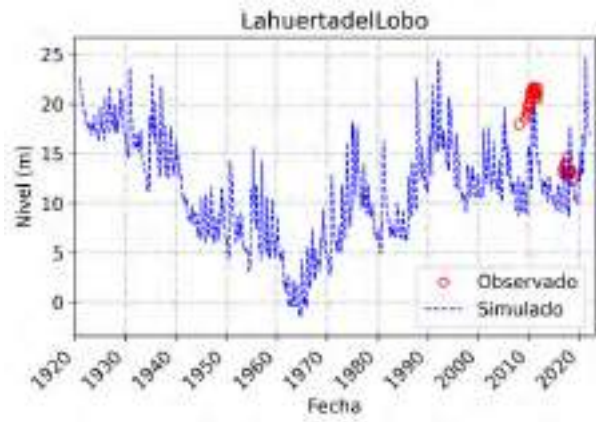
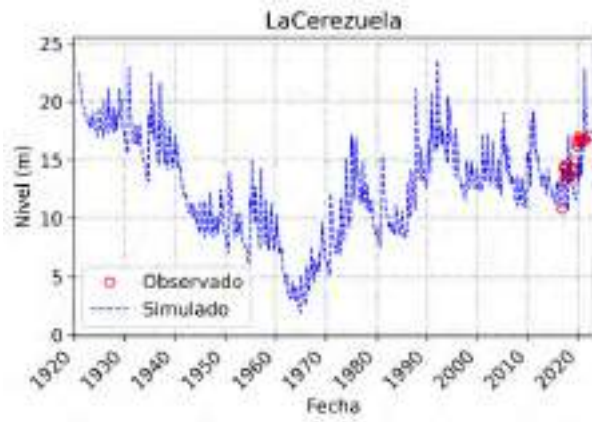


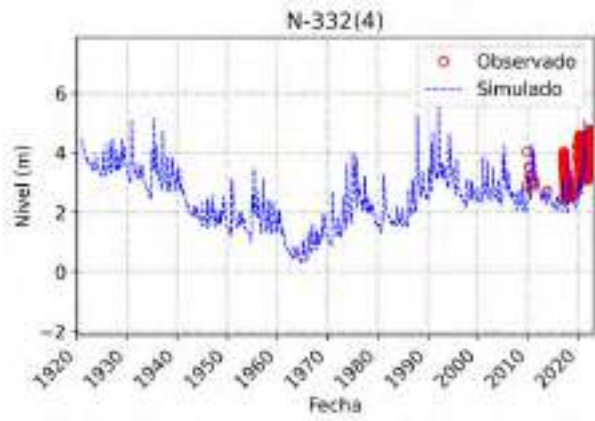
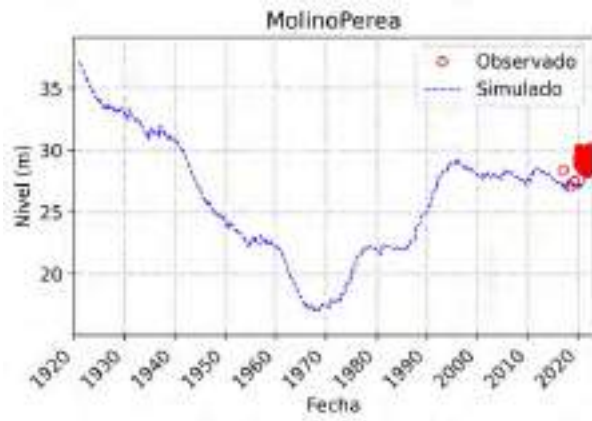
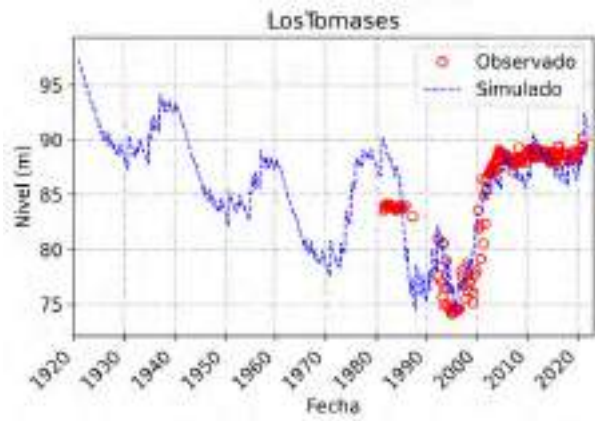
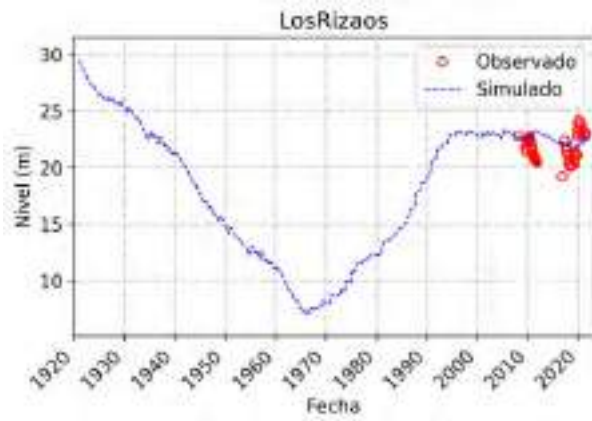
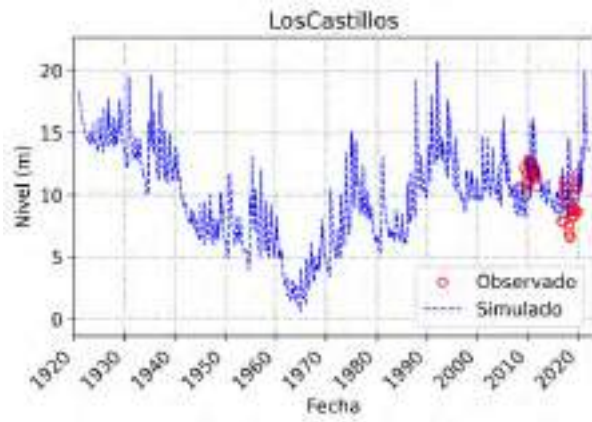


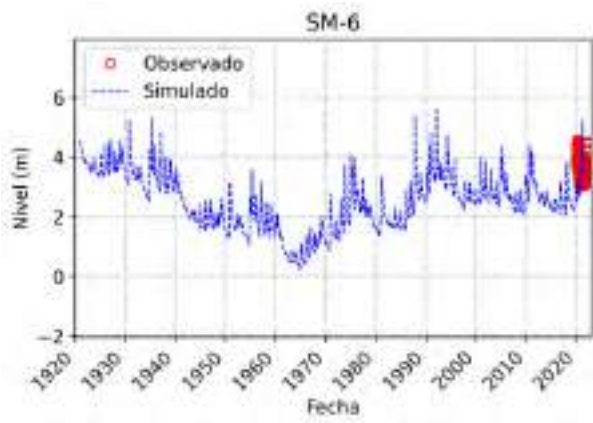
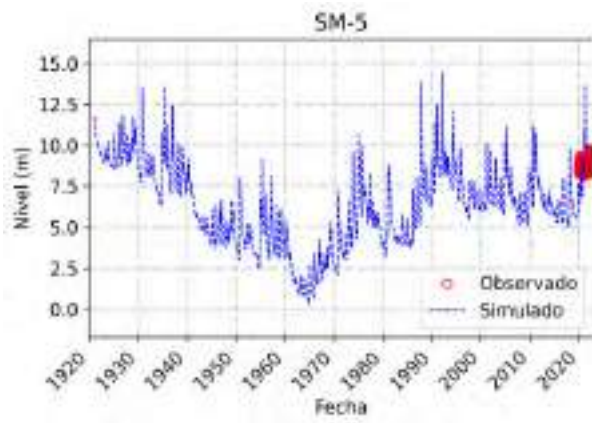
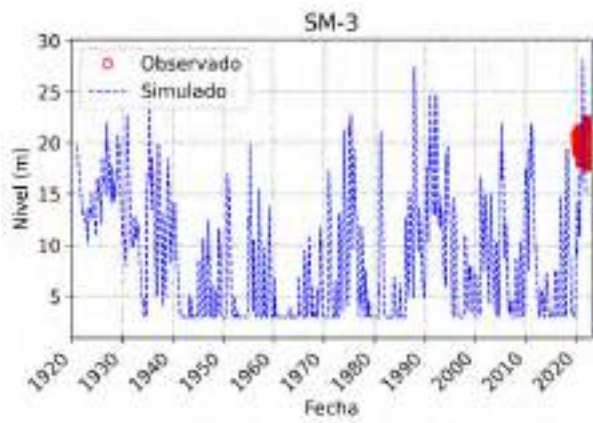
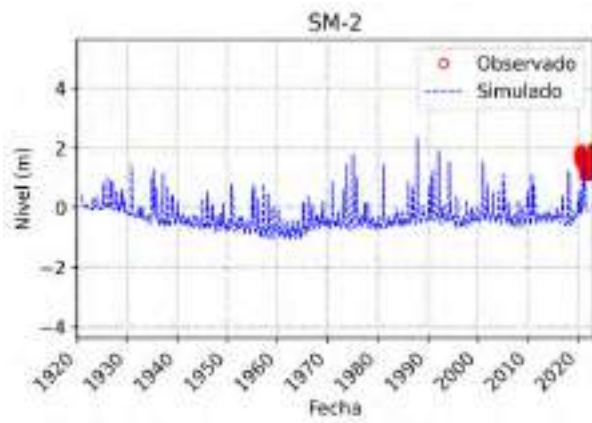
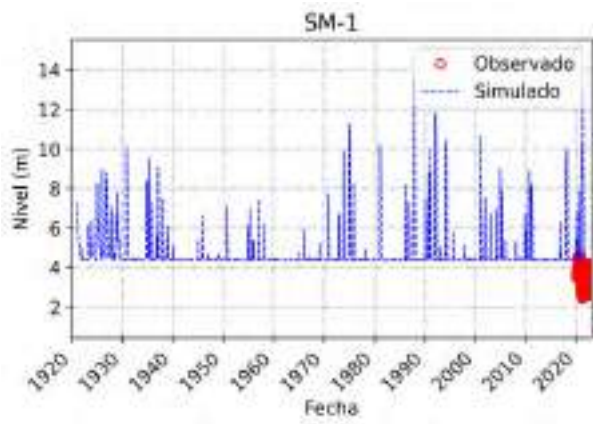
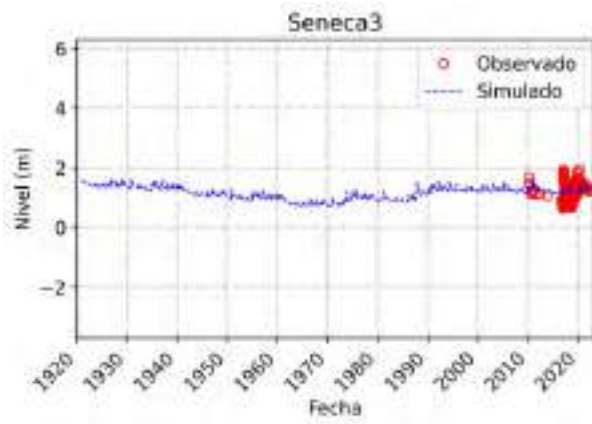


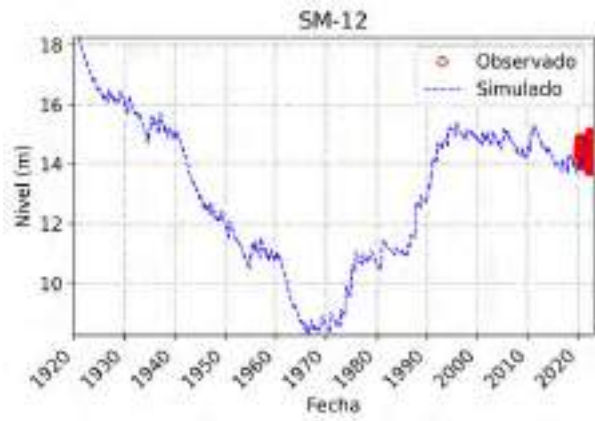
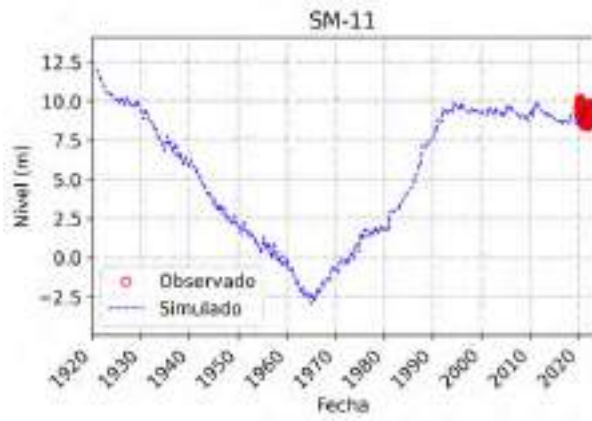
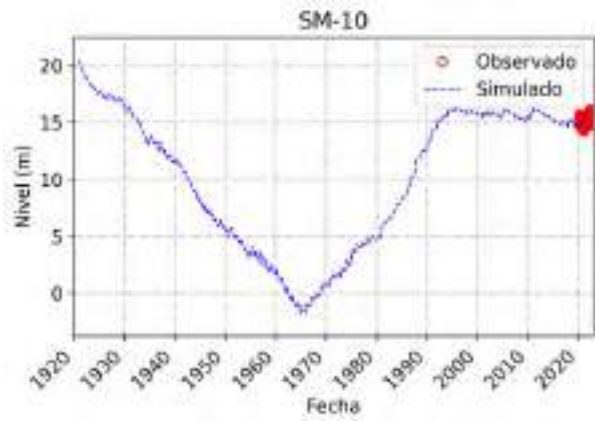
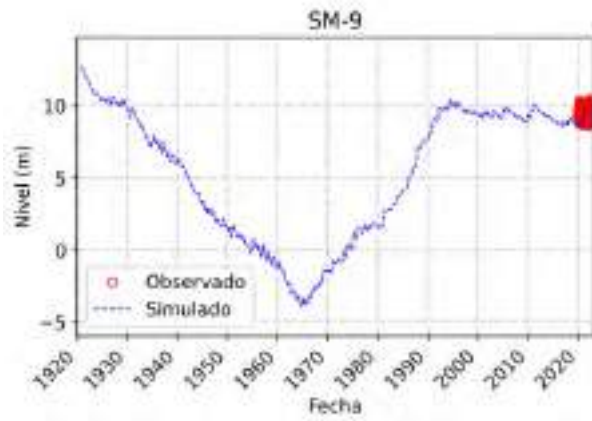
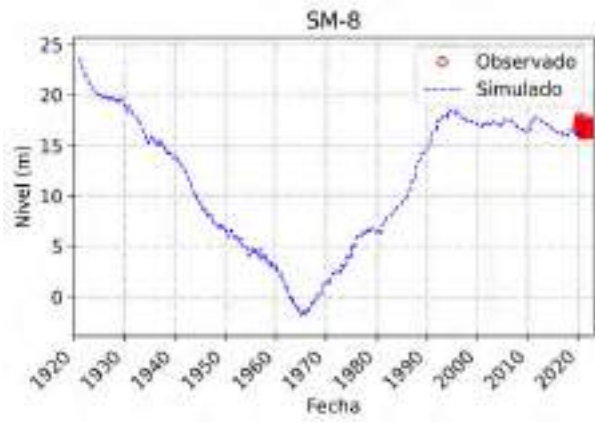
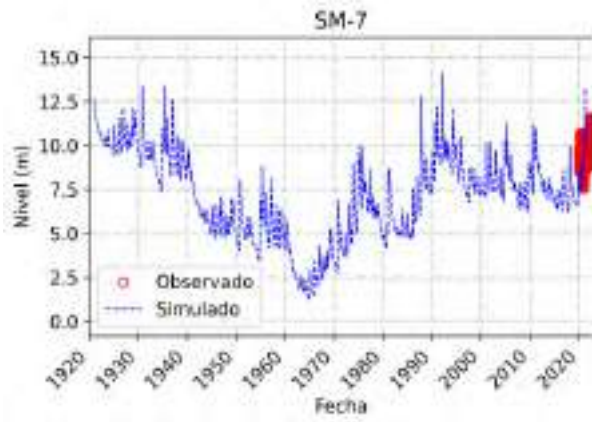


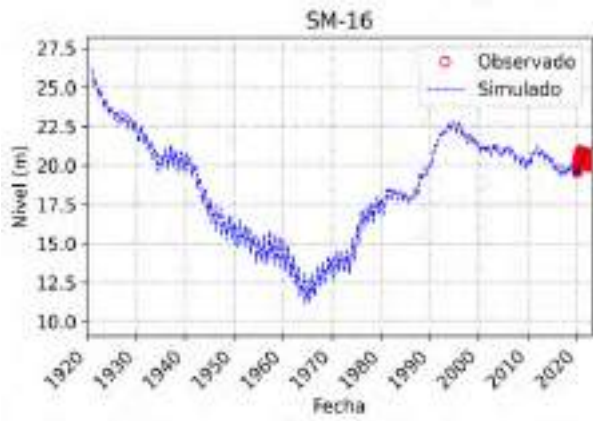
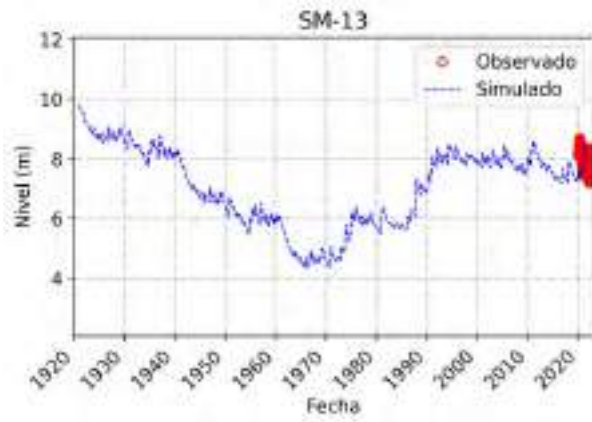


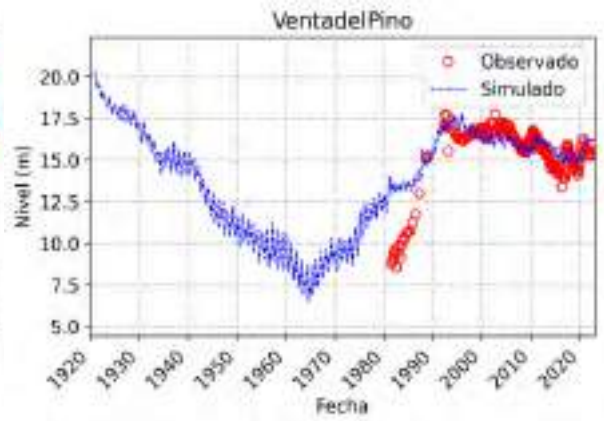
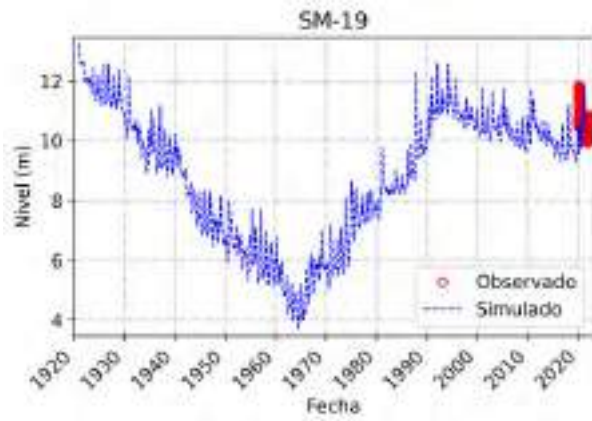
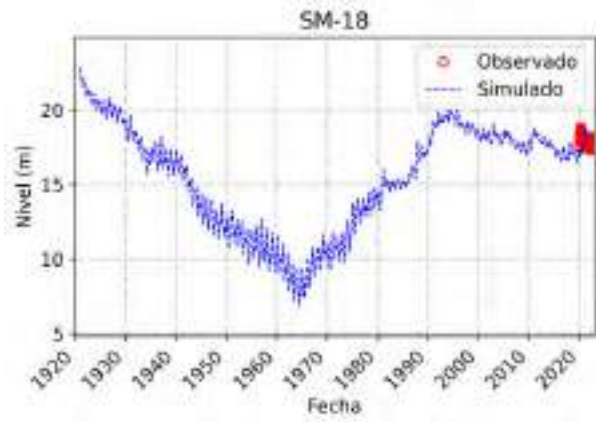
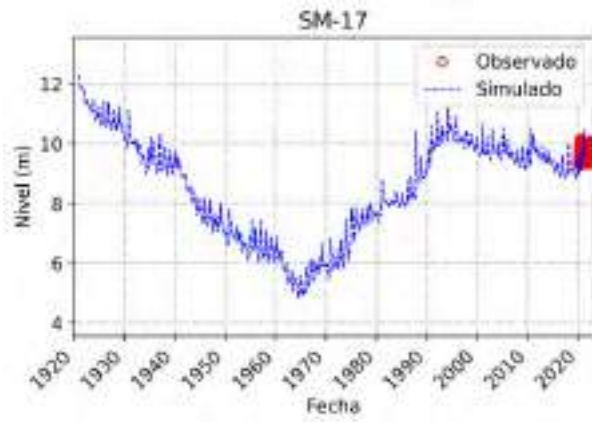




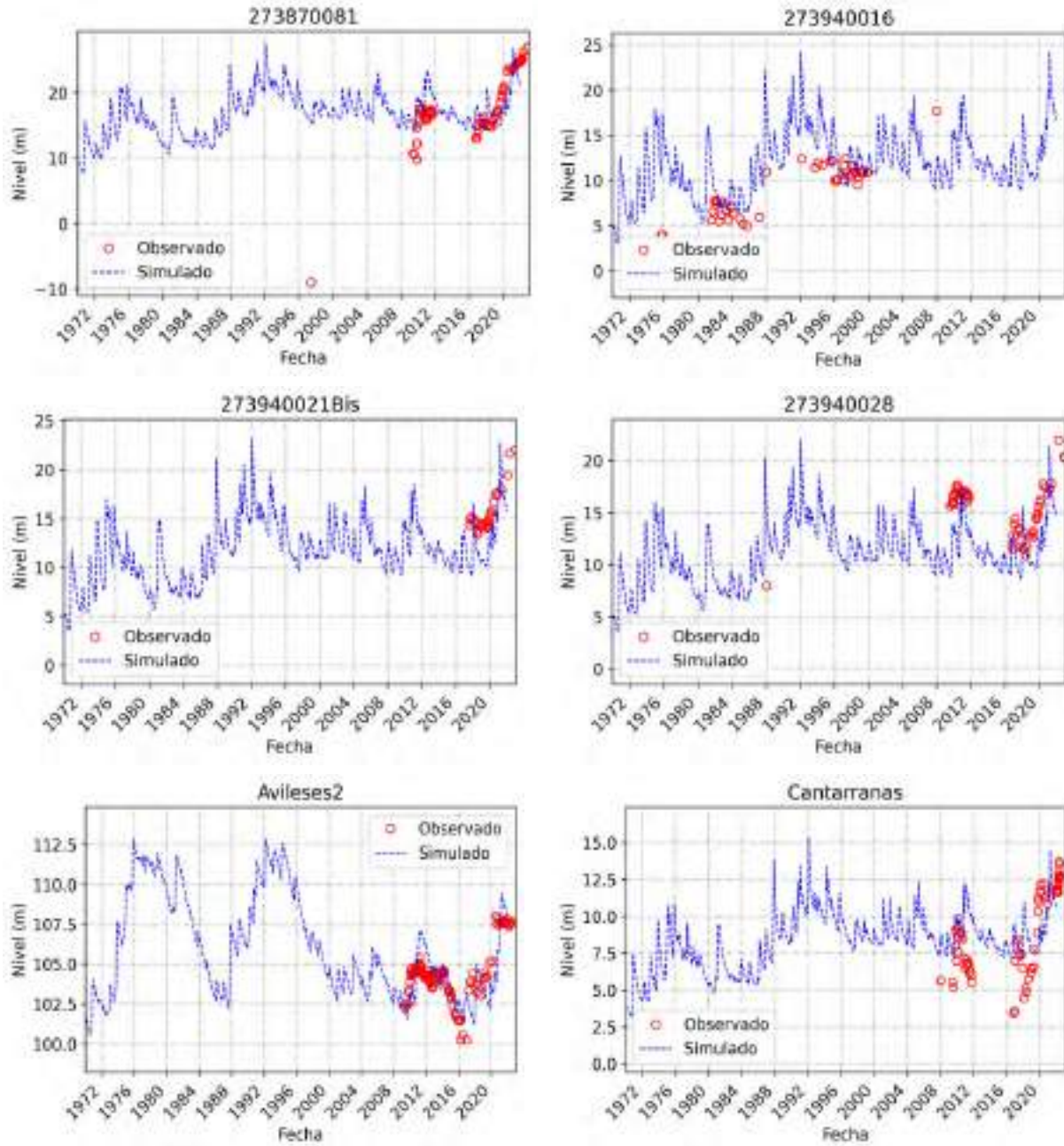


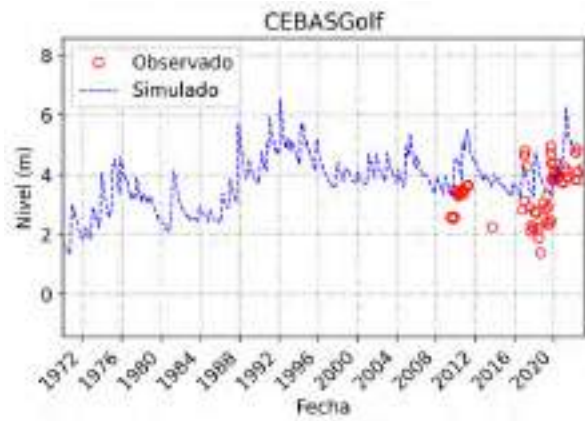
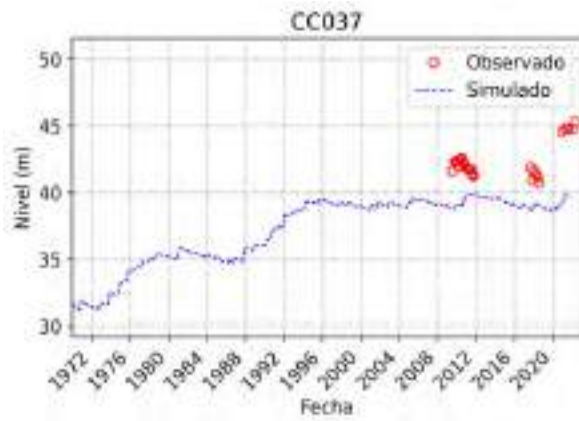
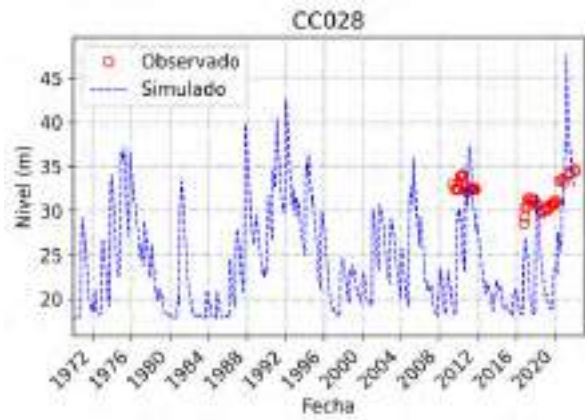
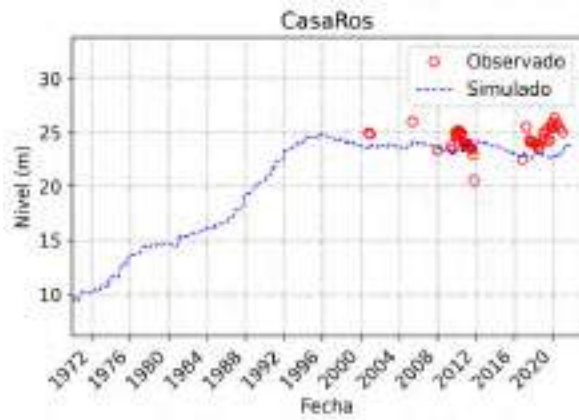
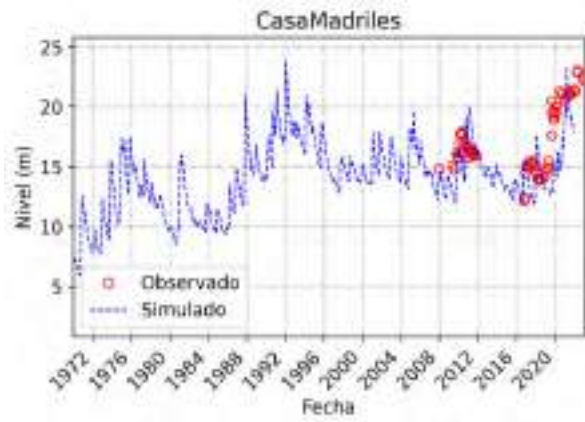


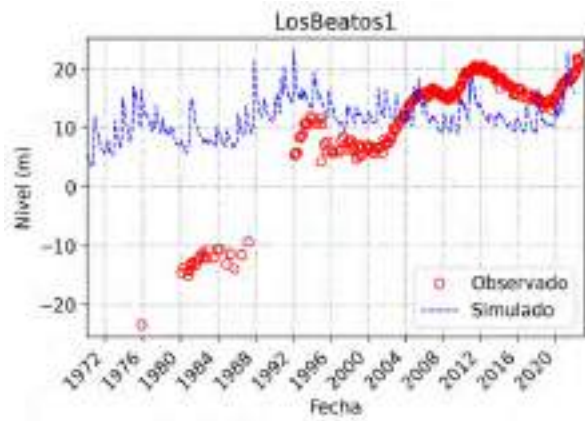
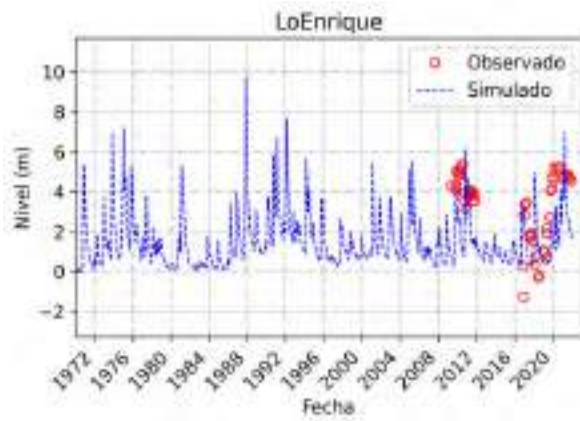
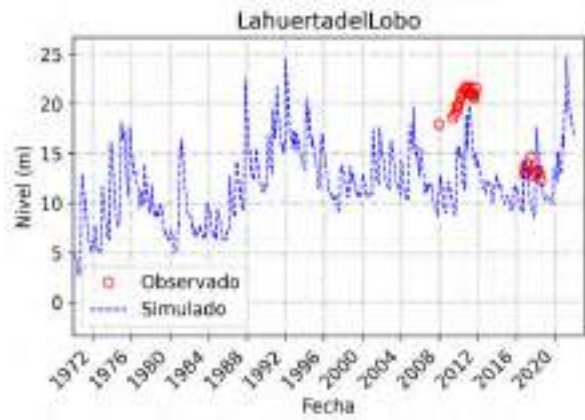
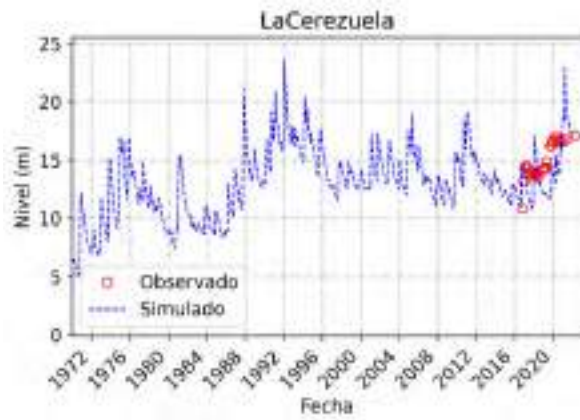
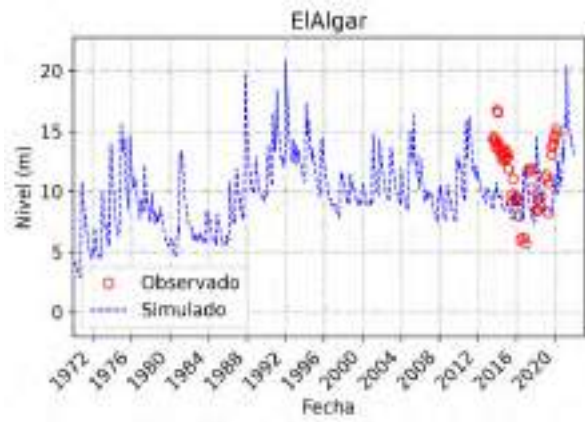
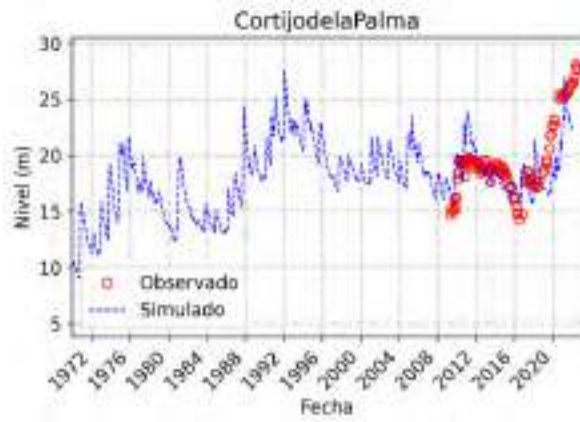


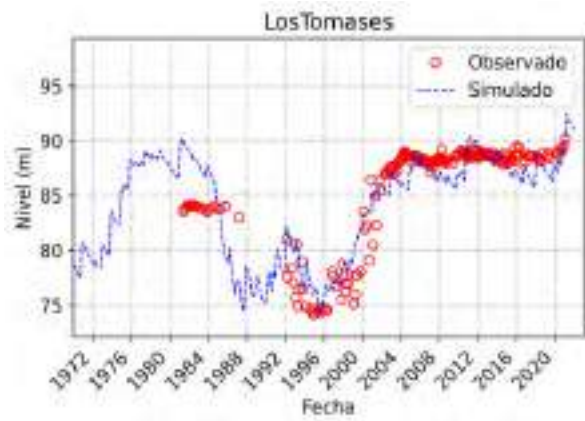
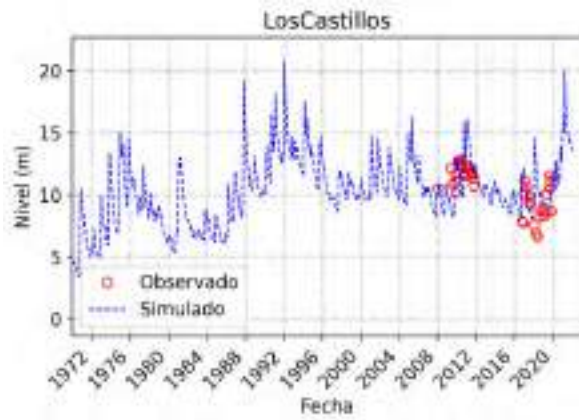
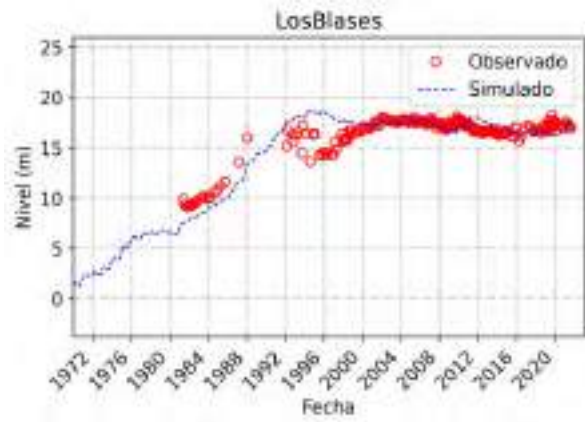
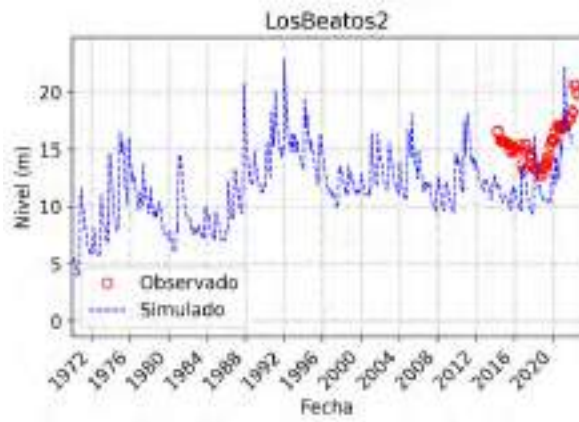


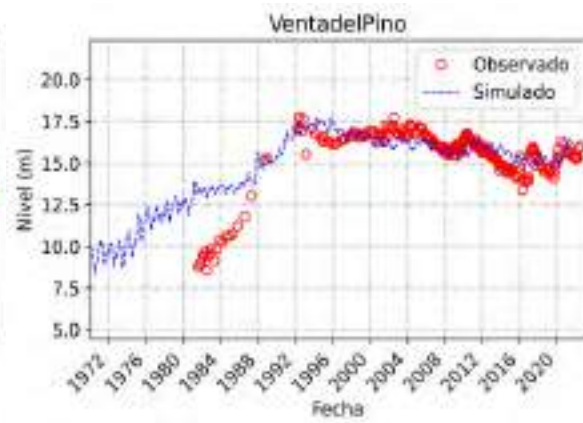
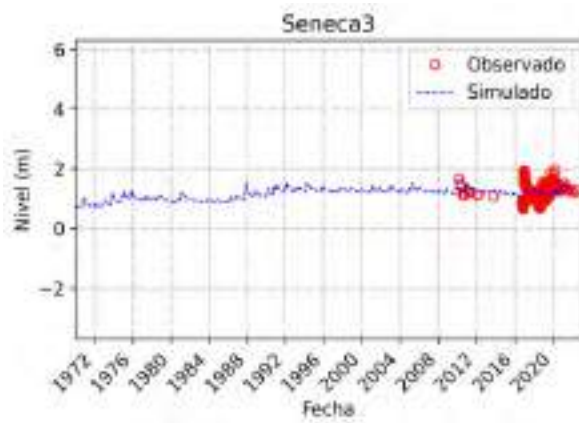
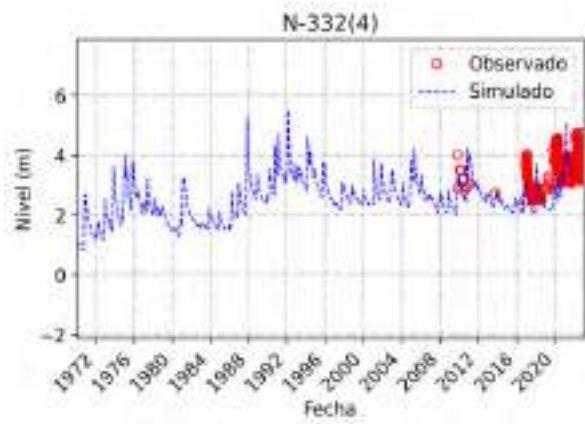
A.2 1960 – 2020











A.3 2015 – 2020

