

Cálculo de la evolución espacio-temporal de la recarga al acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (SE España) desde 1970 a 2022

Computing the spatial-temporal evolution of groundwater recharge to the Quaternary aquifer of Campo de Cartagena (SE Spain) from 1970 to 2022

Mar Alcaraz ^{a1*}, María José Polo ^{a2}, Jorge Hornero ^b, Joaquín Jiménez-Martínez ^{c,d}, Andrés Alcolea ^e, Marisol Manzano ^{a3}

^aUniversidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Paseo de Alfonso XIII, 52. 30203. Cartagena, España.

^b Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Geológico y Minero de España. Gran Vía Escultor Salzillo, 21-23. 3ª planta. 30005 Murcia, España.

^c Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Department of Water Resources and Drinking Water. 8600 Dübendorf, Suiza.

^d Swiss Federal Institute of Technology, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. 8093 Zürich, Suiza.

^e HydroGeoModels AG, Forrenbergstrasse 21, 8472 Seuzach, Suiza.

E-mail: ^{a1}mar.alcaraz@upct.es, ^{a2}mjpologomolina@gmail.com, ^{a3}marisol.manzano@upct.es, ^{b1}j.hornero@igme.es, ^cjoaquin.jimenez@eawag.ch, ^djjimenez@ethz.ch, ^eandres.alcolea@hydrogeomodels.ch

*Autor para correspondencia

Recibido: 14/05/2024

Aceptado: 15/07/2024

Publicado: 31/07/2024

Citar como: Alcaraz, M., Polo, M. J., Hornero, J., Jiménez-Martínez, J., Alcolea, A., Manzano, M. 2024. Computing the spatial-temporal evolution of groundwater recharge to the Quaternary aquifer of Campo de Cartagena (SE Spain) from 1970 to 2022. *Ingeniería del agua*, 28(3), 198-212. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.21733>

RESUMEN

Los objetivos del trabajo son evaluar la evolución temporal y espacial de la recarga al Acuífero del Cuaternario del Campo de Cartagena desde 1970 a 2022 y generar mapas de entrada para un modelo numérico de flujo de agua subterránea. Para alcanzarlos se han recopilado datos meteorológicos, se ha compilado y contrastado la información disponible sobre los usos de suelo, poniendo especial atención en la evolución temporal de la distribución espacial, se ha calculado la recarga con el software VisualBALAN y se han generado mapas de recarga que reflejan la evolución espacial y temporal durante el periodo simulado, con el apoyo de QGIS. La recarga calculada se ha calibrado y validado con éxito con series piezométricas temporales. La recarga total media calculada es 91 hm³ año⁻¹ para todo el periodo; los valores extremos son 24 hm³ en 1978 y 172 hm³ en 2008. Esto se traduce en un coeficiente de recarga promedio del 16%, un valor mínimo del 8% y un máximo del 24%.

Palabras clave | usos de suelo; evolución espacio-temporal; mapas de recarga; VisualBALAN; Acuífero Campo de Cartagena.

ABSTRACT

The objectives of the work are to assess the temporal and spatial evolution of recharge to the Quaternary aquifer of the Campo de Cartagena from 1970 to 2022 and to generate input maps for a numerical groundwater flow model. To achieve them, meteorological data has been collected; available information on land uses has been compiled and contrasted, paying special attention to the temporal evolution of spatial distribution; groundwater recharge has been calculated with the code VisualBALAN, and recharge maps reflecting the spatial and temporal evolution during the simulated period has been generated with the support of QGIS. The calculated recharge has been successfully calibrated and validated with piezometric time series. The calculated average total recharge is 91 hm³ year⁻¹ for the entire period; the extreme values are 24 hm³ in 1978 and 172 hm³ in 2008. This translates to an average recharge coefficient of 16%, a minimum value of 8% and a maximum of 24%.

Key words | soil uses; recharge maps; spatial-temporal evolution; VisualBALAN; Campo de Cartagena aquifer.

INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la gestión sostenible de acuíferos en áreas de clima mediterráneo semiárido, caracterizadas por predominio de agricultura de regadío (principalmente hortícolas) y marcada escasez hídrica, como ocurre en el sureste español, es crucial cuantificar su recarga (Garatuza-Payan *et al.*, 1998; de Vries y Simmers, 2002). En este contexto, los recursos hídricos subterráneos cobran una importancia significativa para los sectores productivos e industriales. El Acuífero del Cuaternario del Campo de Cartagena (ACCdC) destaca por su conexión hidráulica con la laguna litoral salada más extensa de Europa, el Mar Menor, con una superficie de 135 km². Este acuífero constituye la principal fuente de agua dulce para el Mar Menor (García-Aróstegui *et al.*, 2012, García-Aróstegui *et al.*, 2023), actuando como receptor y transmisor de posibles contaminantes derivados de la infiltración de precipitaciones, agricultura intensiva y vertidos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas (Jiménez-Martínez *et al.*, 2016). En los últimos años se han producido varios eventos de eutrofización del Mar Menor que han conducido a la desaparición de varias especies por falta de oxígeno (Ouaissa *et al.*, 2023). Esta situación se asocia con la contaminación del Mar Menor debido a los altos contenidos de nitrato y fosfato de origen agrícola y urbano existentes en la laguna (Álvarez-Rogel *et al.*, 2020).

El Mar Menor y el ACCdC abarcan una de las zonas agrícolas más relevantes de España y Europa. El Campo de Cartagena, ubicado en la Región de Murcia, se caracteriza por una extensa área de cultivos en sistemas intensivos bajo riego (CRCC, 2023). La influencia de la agricultura intensiva de hortícolas en el ACCdC es patente considerando la estadística agraria regional: la superficie destinada a cultivos bajo riego localizado en 2020 fue de 27 943 ha, con predominio de cítricos y hortalizas. La tecnificación gradual de la agricultura intensiva ha llevado a medidas regulatorias para preservar la sostenibilidad del acuífero y el entorno del Mar Menor. La ley regional 1/2018, de 7 de febrero de 2018 busca la sostenibilidad ambiental limitando los ciclos de cultivo a dos por año para reducir el uso de agua y fertilizantes. Por lo tanto, la estimación de la recarga al acuífero del Cuaternario puede contribuir significativamente a mejorar la gestión ambiental tanto del acuífero como del Mar Menor.

La estimación de la recarga de un acuífero es un proceso complejo debido a la incertidumbre inherente en los valores de las variables involucradas (Custodio, 2019). La variabilidad temporal y espacial agrega complejidad, requiriendo un alto número de puntos de muestreo para una estimación precisa a lo largo de varios años (Allison *et al.*, 1994). Diversos métodos de estimación, con diferentes parámetros de entrada, han sido analizados por distintos autores. Gee y Hillel (1988) identificaron errores acumulativos en modelos de balance de agua que solo utilizan evaporación y precipitación como parámetros. Finch (1998) destacó la influencia clave de la vegetación, la humedad del suelo y la profundidad de las raíces en la estimación de la recarga, resultados validados por de Vries y Simmers (2002). Estos investigadores indicaron que muchos estudios son específicos y por lo general, no extrapolables. Además, la recarga no solo depende del clima, sino también de las condiciones de la superficie y el subsuelo. A partir del año 2000, las investigaciones para determinar la recarga de acuíferos mediante el método de balance hídrico comenzaron a incluir más parámetros, como las dotaciones de riego (Kendy *et al.*, 2003; Samper y García-Vera, 1997). En España, la estimación de la recarga es especialmente desafiante en acuíferos de zonas semiáridas, donde la agricultura de regadío modifica la cantidad y distribución de la recarga (Baudron *et al.*, 2014; Custodio, 2019). El riego tecnificado, a pesar de sus mejoras en eficiencia, sigue siendo una fuente potencial de recarga (Jiménez-Martínez *et al.*, 2010).

Por todo lo expuesto anteriormente, y principalmente por la mala situación medioambiental en la que se encuentra actualmente el Mar Menor, se necesitan herramientas robustas de apoyo a la toma de decisiones que permitan una gestión más eficaz y ambientalmente amigable de los recursos hídricos del Campo de Cartagena.

En el marco del proyecto OPAL (PID2019-110311RB-C22, MICINN) se está realizando un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas y de transporte de contaminantes en el ACCdC con distintos objetivos. Como entrada a este modelo, es necesario calcular la recarga al acuífero mediante modelación numérica del balance de agua en la zona no saturada de forma regionalizada y considerando su variación temporal. Trabajos recientes han calculado valores medios de recarga anual al ACCdC que varían en dos órdenes de magnitud, oscilando entre aproximadamente 8.5 y 114.1 hm³ año⁻¹ (Tabla 1). En este estudio se ha usado el código VisualBALAN (Samper *et al.*, 2005), una herramienta sofisticada que cuantifica la recarga a los acuíferos mediante balances hídricos en el subsuelo y permite calibrar los resultados comparándolos con series de niveles freáticos o de descarga por manantiales, lo cual aumenta la fiabilidad de la recarga calculada. El código ha sido utilizado en multitud de trabajos y en muchos países. Por economía de espacio se citan dos trabajos cercanos: Jiménez-Martínez *et al.* (2010) modelizaron la recarga al ACCdC

considerando el efecto del riego en los tres tipos de cultivos más abundantes en la zona, anuales, perennes y cítricos; Hornero *et al.* (2016) compararon distintas técnicas de balance hídrico para estimar la recarga al sistema acuífero de Alcadozo, en la cuenca del río Segura.

Tabla 1 | Valores de recarga al ACCdC reportados por trabajos recientes. Fuente: información recopilada en trabajos previos del proyecto del OPAL (PID2019-110311RB-C22, MICINN).

Recarga media anual o rango de valores (hm ³ año ⁻¹)					
Por precipitación	Por retornos de riego	Por transferencia lateral	Total	Fuente	Metodología
110			110	Jiménez-Martínez <i>et al.</i> (2016)	Estudio de síntesis del estado de conocimiento del acuífero
74 [12-200]			74	Contreras <i>et al.</i> (2017)	Modelación del flujo de agua subterránea
38.25		7.98	46.23	Domingo-Pinillos <i>et al.</i> (2018)	Modelación del flujo (régimen estacionario)
43.13	66.17	4.8	114.1	Domingo-Pinillos <i>et al.</i> (2018)	Modelación del flujo (régimen transitorio)
62,3 [12.2 - 233.3] ^(a)			62.3	Alcolea <i>et al.</i> (2019)	Modelación del flujo de agua subterránea
83.6 ^(b)			83.6	Alcolea <i>et al.</i> (2019)	Modelación del flujo de agua subterránea
3.59 - 6.47 - 7.11 ^(c)		4.91 - 6.33 - 7.22 ^(c)	8.5 - 12.8 - 14.33 ^(c)	MITECO (2020)	Estudio hidrogeológico / Modelo de flujo
48	18.2		66.2	MITECO (2022)	Trabajos adicionales para el Plan Hidrológico (PHDS 2022-2027)

^(a) Valor medio (período seco 09/2013 al 08/2015; período húmedo 09/2008 al 07/2010).

^(b) Todo el período (10/2000 - 12/2016).

^(c) Valores año seco - normal - húmedo para una banda de 3 km en el borde costero. Incluye retornos de riego.

MATERIAL Y MÉTODOS

El código VisualBALAN

El programa VisualBALAN (Samper *et al.*, 2005) realiza balances hídricos diarios en el suelo de forma secuencial, dividiendo el terreno en tres zonas: zona radicular, vadosa o no saturada y acuífero o zona saturada. Se considera que el incremento del nivel de agua en la zona saturada se origina únicamente por la entrada desde la zona vadosa. Por lo tanto, el intervalo de tiempo entre la aplicación del agua (ya sea por precipitación o riego) y su llegada al nivel freático resulta crucial al analizar los eventos de recarga. El código realiza balances verticales sobre superficies unitarias; se considera que las propiedades de las tres zonas mencionadas anteriormente son uniformes en toda la cuenca modelada. Los parámetros de recarga pueden ser calibrados mediante la información recopilada de caudales de descarga y/o niveles piezométricos (Samper *et al.*, 1999). Los balances que se aplican en cada una de las tres zonas son los siguientes:

Zona radicular o de suelo edáfico

La generación del modelo de recarga se basa en la ecuación del balance hídrico para un suelo con vegetación según la Ecuación 1, donde todas las variables se refieren a una superficie unitaria:

$$\Delta\theta = P + I_r - I_n - ET_c - E_s - P_e \quad (1)$$

$\Delta\theta$: variación del almacenamiento de agua en el suelo (mm d⁻¹)

P : precipitación (mm d⁻¹)

I_r : dotación de riego (mm d⁻¹)

I_n : interceptación del follaje (mm d⁻¹)

ET_c : evapotranspiración de los cultivos (mm d⁻¹)

E_s : escorrentía superficial (mm d⁻¹)

P_e : recarga en tránsito a la zona vadosa (mm d⁻¹)

Zona no saturada o vadosa

Dentro de esta zona, la recarga en tránsito se divide en dos porciones que constituyen las salidas de agua: flujo hipodérmico (Q_h), correspondiente a la porción de agua que se mueve lateralmente sin llegar a la zona saturada, y recarga al acuífero (Q_p) (Ecuaciones 2 y 3):

$$Q_h = \alpha_h \times V_h \quad (2)$$

$$Q_p = K_{vw} + \alpha_p \times V_h \quad (3)$$

Q_h : flujo hipodérmico (mm d⁻¹)

Q_p : recarga al acuífero (mm d⁻¹)

V_h : volumen de agua almacenada en la zona no saturada (mm³)

K_{vw} : conductividad hidráulica vertical en medio no saturado (mm d⁻¹)

α_h : coeficiente de agotamiento de flujo hipodérmico (d⁻¹)

α_p : coeficiente de agotamiento de percolación (d⁻¹)

Zona saturada o acuífero

VisualBALAN determina la variación en el volumen de agua almacenada (ΔV_a) en el acuífero, la cual resulta de la diferencia entre la recarga proveniente de la zona vadosa (Q_p) y las salidas debidas al flujo subterráneo (Q_s). Los cambios experimentados en el nivel piezométrico del acuífero en cada intervalo de tiempo se vinculan con la variación en el volumen de agua en el acuífero y el coeficiente de almacenamiento (S_Y), de acuerdo con la Ecuación 4.

$$\Delta V_a = h \times S_Y \quad (4)$$

ΔV_a : variación del volumen del acuífero (m³)

h : nivel piezométrico (m)

S_Y : coeficiente de almacenamiento (adimensional)

Datos de entrada

Los datos de entrada a VisualBALAN se pueden clasificar en dos familias de variables: las relacionadas con el clima (temperatura, precipitación y evapotranspiración de referencia) y las vinculadas con el uso del suelo (coeficientes de cultivo y dotaciones de riego).

Las variables climáticas se han definido en base a las estaciones meteorológicas con series de datos disponibles. Para el periodo 1970-2000 se han usado los datos reportados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de 2 estaciones

meteorológicas (Tabla 2) con datos de temperatura y precipitación. Para el periodo comprendido entre 2000 y 2022 se han utilizado las estaciones del Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM) del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Ambiental (IMIDA) (Tabla 3) usadas por Polo (2022), utilizando los datos de temperatura, precipitación y evapotranspiración de referencia.

Tabla 2 | Estaciones meteorológicas de AEMET con datos desde 1970 hasta 2000.

Identificación	Nombre	Municipio	X (ETRS89)	Y (ETRS89)
7026	Pozo Estrecho	Cartagena	676924	4175783
7031	Aeropuerto de San Javier	San Javier	693425	4184666

Tabla 3 | Estaciones meteorológicas del SIAM con datos desde 2000 hasta 2022.

Identificación	Nombre	Municipio	X (ETRS89)	Y (ETRS89)
TP22	Santiago de La Ribera	San Javier	691976	4184939
TP42	Torre Blanca	Torre Pacheco	685074	4182798
TP73	Los Infiernos	Torre Pacheco	682041	4188284
CA21	Corvera	Murcia	665200	4188754
CA42	Balsapintada	Fuente Álamo	664813	4179533
CA52	La Aljorra	Cartagena	670129	4171693
CA91	Campillo de Abajo	Fuente Álamo	655332	4173881

La evapotranspiración de los cultivos ET_c se estimó mediante el método de Penman-Monteith propuesto por la FAO (Allen *et al.*, 1998), multiplicando la evaporación de referencia ET_0 por el coeficiente de cultivo, k_c . Los valores de k_c usados para limonero, alcachofa, melón, lechuga de otoño-invierno y lechuga de invierno son los propuestos por el IMIDA a través del Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM - Sistema de Información Agrario de Murcia Coeficientes de Cultivo: Kc, 2023). Al no disponer de datos de evapotranspiración para el periodo 1970-2000, se han extrapolado valores utilizando como referencia las series existentes del periodo 2000-2022. Estos valores se han calculado como el promedio de la evapotranspiración de aquellos días del mismo mes del periodo 2000-2022, considerando si hubo o no precipitación.

En cuanto al segundo conjunto de variables a tener en cuenta, los usos de suelo, VisualBALAN necesita las dotaciones brutas de riego de cada cultivo. Estas dotaciones se han establecido a partir de información recabada del IMIDA disponible en SIAM¹ para los cultivos de la zona y del balance hídrico en el suelo según Allen *et al.* (1998) (Tabla 4). Para los usos de secano y suelo desnudo o no productivo no se aplica riego.

Tabla 4 | Dotación media anual de riego establecida para los cultivos más abundantes según la zona de influencia de cada estación meteorológica utilizada. Elaboración en base a balance hídrico de FAO (Allen *et al.*, 1998). *Dos ciclos de lechuga más uno de melón.

Estación	Nombre	Cítricos	Cultivos perennes	Cultivos anuales *
		m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹		
TP22	Santiago de la Ribera	5485	4718	9154
TP42	Torre Blanca	5692	5291	9694
TP73	Los Infiernos	6408	6075	10881
CA52	La Aljorra	6153	6664	10526
CA91	Campillo Abajo	5402	5447	9098
CA21	Corvera	6217	6549	10707
CA42	Balsapintada	5514	5524	9375

¹ http://siam.imida.es/apex/f?p=101:39:6710722572331900::NO::P39_MOSTRAR_DATOS:0

Parámetros de entrada a VisualBALAN y calibración

Los parámetros de entrada a VisualBALAN son los propuestos en Jiménez-Martínez *et al.* (2010), que fueron recalibrados a partir de los niveles piezométricos en Polo (2022) para conseguir un mejor ajuste, reduciendo el error cuadrático medio (ECM). Los parámetros utilizados para la estimación de la recarga en secano coinciden con los parámetros utilizados para cítricos, excluyendo el aporte de riego. En el caso de suelo desnudo, se ha utilizado un coeficiente de cultivo K_c igual a 0,1. Para el caso de suelo urbano, la recarga se ha estimado como un 10% de la recarga en suelo desnudo. Los parámetros de entrada al modelo se pueden consultar en la Tabla 5.

Tabla 5 | Valores iniciales y calibrados en Polo (2022) (indicados con asterisco) de los parámetros de VisualBALAN para los distintos tipos de cultivos considerados. Parámetros iniciales tomados de Jiménez-Martínez *et al.* (2010).

Parámetro (símbolo y unidades)	Cítricos	Anuales	Perennes
Suelo edáfico			
Porosidad total (Φ_s) [$m^3 m^{-3}$]	0.4	0.4	0.4
Punto de marchitez (θ_{wp}) [$m^3 m^{-3}$]	0.1	0.1	0.1
Capacidad de campo (θ_{fc}) [$m^3 m^{-3}$]	0.2	0.2	0.2
Contenido humedad inicial	0.2	0.2	0.2
Espesor* (b_s) (m)	0.8	0.6	0.6
Conductividad hidráulica vertical (K_{vs}) [$mm d^{-1}$]	382	382	382
Evaporación real			
Parámetro CEME (θ_{ceme}) [mm]	1.006	1.549 5.925*	0.965 0.965*
Cálculo escorrentía			
Número de curva*	58	58	58
Zona no saturada			
Coef. agotamiento flujo hipodérmico (α_h) [d^{-1}]	0.01 0.449*	0.01 0.5405*	0.01 0.3034*
Conductividad hidráulica vertical (K_{vw}) [$mm d^{-1}$]	432	432	432
Coef. agotamiento de la percolación (α_p) [d^{-1}]	0.6931	0.6931	0.6931
Contenido inicial de agua [mm]	10	10	10
Acuífero			
Coef. agotamiento del acuífero (α_s) [d^{-1}]	0.000981	0.005005	0.000981 0.0008921*
Coef. de almacenamiento (S)	0.200	0.210 0.18*	0.207 0.18*

Los valores de recarga calculados con VisualBALAN se calibraron y validaron con series temporales de niveles piezométricos observados en tres piezómetros próximos a tres parcelas representativas de los tipos de suelo con cultivos de “cítricos”, “perennes” y “anuales”. En la Figura 1 se muestran los resultados de la calibración (datos de 2000 a 2011) y validación (datos de 2012 a 2017). Tanto la magnitud de las variaciones como la tendencia general quedan bien representadas. Esto se manifiesta en el ECM, que los trabajos de Polo (2022) consiguieron reducir entre un 25 y un 35% respecto a la calibración previa de Jiménez-Martínez *et al.* (2010). La bondad de los ajustes proporciona robustez a los valores de recarga obtenidos mediante VisualBALAN para la zona de estudio.

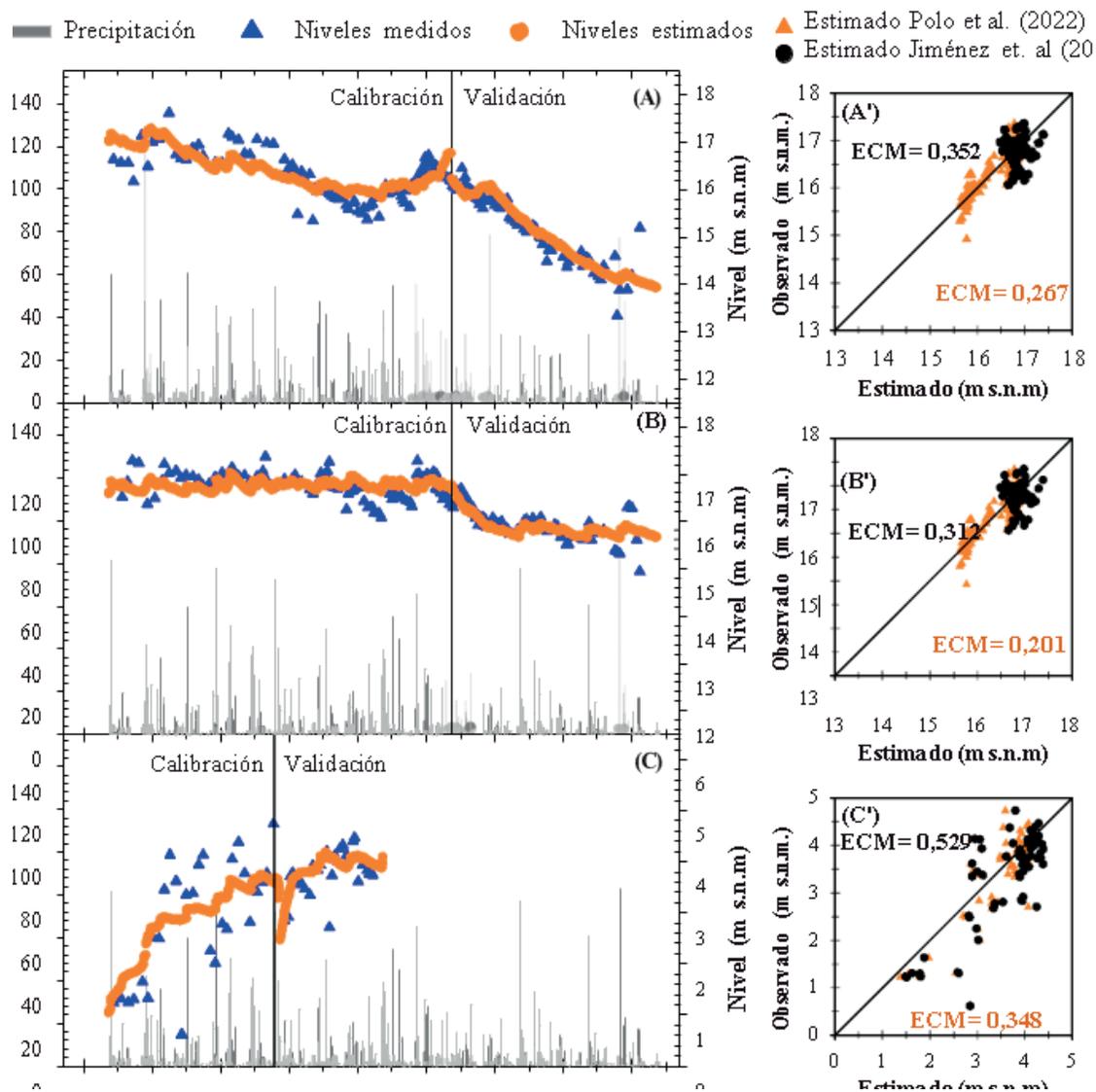


Figura 1 | Izquierda: Ajuste de niveles piezométricos durante los periodos de calibración y validación para áreas dedicadas al cultivo de cítricos (A), cultivos anuales (B) y cultivos perennes (C). Derecha: Relación entre los valores calculados y observados, comparando los resultados obtenidos por Jiménez-Martínez *et al.* (2010) (círculos negros) con los derivados de nuevos parámetros usados para cítricos (A'), cultivos anuales (B') y cultivos perennes (C') (triángulos anaranjados) por Polo (2022). CME: error cuadrático medio.

Regionalización y secuenciación de la recarga

Para caracterizar la distribución espacial de las variables climáticas se han creado mapas de influencia de las estaciones meteorológicas consideradas (Tablas 3 y 4) según su ubicación, en base a polígonos de Voronoy. La distribución espacial se ha dividido en dos periodos, de acuerdo con la disponibilidad de datos según las estaciones activas desde 1970. La localización de las estaciones meteorológicas utilizadas y los polígonos de Voronoy generados se muestran en la Figura 2.

Para caracterizar la distribución espacial de cultivos y los usos del suelo se ha utilizado como punto de partida el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del periodo 2000-2010 (MAPAMA, 2023). Se han distinguido 5 tipos de usos del suelo en base a este mapa: 0-Urbano, 1- Cítricos, 2- Secano, 3- Hortícolas, 4- Suelo desnudo (Figura 3).

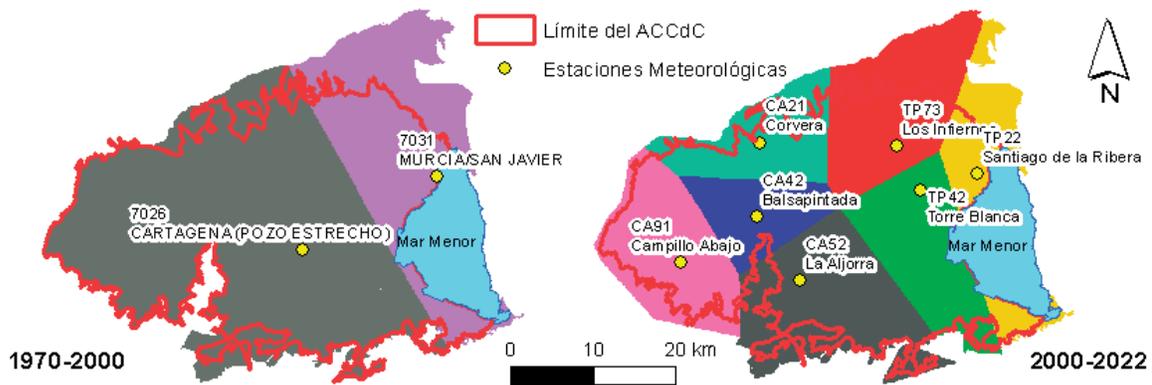


Figura 2 | Límites cartográficos del ACCdC según ITGE (1991), ubicación de las estaciones meteorológicas usadas en los distintos periodos de cálculo y polígonos de Voronoy de cada estación meteorológica.

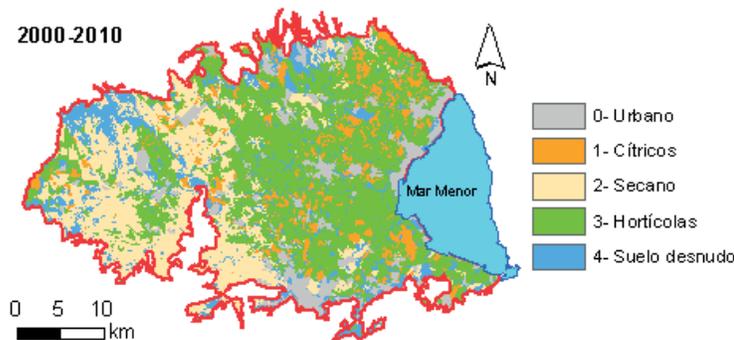


Figura 3 | Superficies de los usos de suelo utilizados en este trabajo, obtenidas a partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del periodo 2000-2010 (MAPAMA, 2023).

Sobre los datos de MAPAMA (2023) se han hecho hipótesis para establecer una evolución temporal de la distribución de las superficies de cada cultivo desde 1970 hasta 2022. Estas hipótesis se han basado en los datos recogidos de distinta bibliografía disponible (Román-Cervantes, 1996; Caballero-Villar *et al.*, 2006; IMIDA, 2017), a partir de los cuales se han dibujado curvas de evolución de la superficie de cítricos y de otros cultivos de regadío de hortícolas (Figura 4). Los datos obtenidos y las fuentes se muestran en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6 | Evolución de la superficie de cultivo de cítricos y fuentes.

Año	Superficie de cítricos (ha)	Fuente
1935	0	Román-Cervantes (1996). Pág. 358
1944	13	Román-Cervantes (1996). Pág. 89
1984	3102	Román-Cervantes (1996). Cuadro 2.12
1991	5191	Román-Cervantes (1996). Pág. 89
1998	8646	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
1999	7213	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
2000	7383	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
2001	8467	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
2002	9240	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
2003	9404.3	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42
2004	9689	Caballero-Villar <i>et al.</i> (2006). Págs. 41-42

Tabla 7 | Superficie de cultivo de hortalizas y fuente.

Año	Cultivos herbáceos (ha)	Fuente
1973	4824.5	Román-Cervantes (1996). Cuadro 2.13
1984	10808.0	Román-Cervantes (1996). Cuadro 2.14
1998	23062.0*	MITECO (2019)

* A la superficie bajo riego total se le ha restado la superficie dedicada a cítricos.

La superficie del MAPAMA (2023) para regadío (hortalizas) es de 50580,33 ha, según el archivo vectorial disponible. Este valor aparece como “Área potencial” en la Figura 4. Sin embargo, hay que considerar que esta superficie regable no se puso en explotación de forma simultánea. Para conocer la evolución temporal de la superficie real destinada a hortalizas se han consultado los datos del Centro Regional de Estadística de Murcia de cada municipio (CREM²), que se pueden ver en la Tabla 8 para cítricos y en la Tabla 9 para hortalizas.

Tabla 8 | Evolución temporal de la superficie de cítricos (ha) en los distintos municipios de interés según el CREM.

Municipio	Año y superficie en ha												
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Cartagena	-	-	3225	2869	2869	2754	2719	2976	2674	2700	2573	2538	2679
Torre-Pacheco	2057	2056	2120	2120	2119	2228	2048	2304	2069	2271	2963	3020	3158
La Unión	-	-	21	21	21	19	19	19	54	57	52	52	52
Los Alcázares	-	-	165	165	165	218	193	211	202	196	297	205	225
San Javier	-	-	1136	1136	1136	1136	1158	1269	1284	1252	1271	1258	1237
Fuente Álamo*			621	621	621	621	621	621	621	621	621	621	621
Murcia*			1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5	1741.5
Total (ha)	2057	2056	9029.5	8673.5	8672.5	8717.5	8499.5	9141.5	8645.5	8838.5	9518.5	9435.5	9713.5

* No se han incluido las áreas de cultivo que caen sobre el acuífero del Cuaternario en los municipios de Murcia y Fuente Álamo.

Tabla 9 | Evolución temporal de la superficie de hortalizas bajo riego (ha) en los distintos municipios de interés según el CREM.

Municipio	Año y superficie en ha												
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Cartagena	-	-	5882	5958	8378	6368	6398	6829	6925	7062	6078	6066	5672
Torre-Pacheco	6743	6821	6960	6952	6952	5784	5448	6272	5822	5591	4719	4817	4615
La Unión	-	-	248	229	229	267	244	252	246	220	206	237	243
Los Alcázares	-	-	123	140	140	121	119	151	156	180	116	175	149
San Javier	-	-	1159	1556	1556	1420	1446	1812	1617	1673	932	1106	2363
Fuente Álamo*			2092	2092	2092	2092	2092	2092	2092	2092	2092	2092	2092
Murcia*			3112	3112	3112	3112	3112	3112	3112	3112	3112	3112	3112
Total (ha)	6743	6821	19576	20039	22459	19164	18859	20520	19970	19930	17255	17605	18246

* No se han incluido las áreas de cultivo que caen sobre el acuífero del Cuaternario en los municipios de Murcia y Fuente Álamo.

Se ha asumido que las superficies de suelo urbano y suelo improductivo no han cambiado significativamente a lo largo del periodo de trabajo, mientras que las superficies destinadas a cítricos y otros regadíos (hortalizas) han ido creciendo en detrimento de la superficie de secano. Las gráficas de evolución temporal se han sectorizado en 4 tramos o bloques de aproximación de valor constante: los 3 primeros bloques representan las décadas de 1970, 1980 y 1990 y el último representa la superficie de cultivo

² <https://sitmurcia.carm.es/web/crem/municipios-en-cifras>

desde el año 2000 al 2022. Es decir, se ha trabajado con 4 valores constantes de superficies, que se corresponden con los bloques de aproximación de la Figura 4. Gráficamente se ha aplicado una homotecia inversa a las superficies de cítricos y hortícolas del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 2000-2010 (MAPAMA, 2023) para que sus superficies se correspondan con los valores definidos en los bloques de aproximación de la Figura 4. Los coeficientes de homotecia inversa aplicados se muestran en las Tablas 10 y 11.

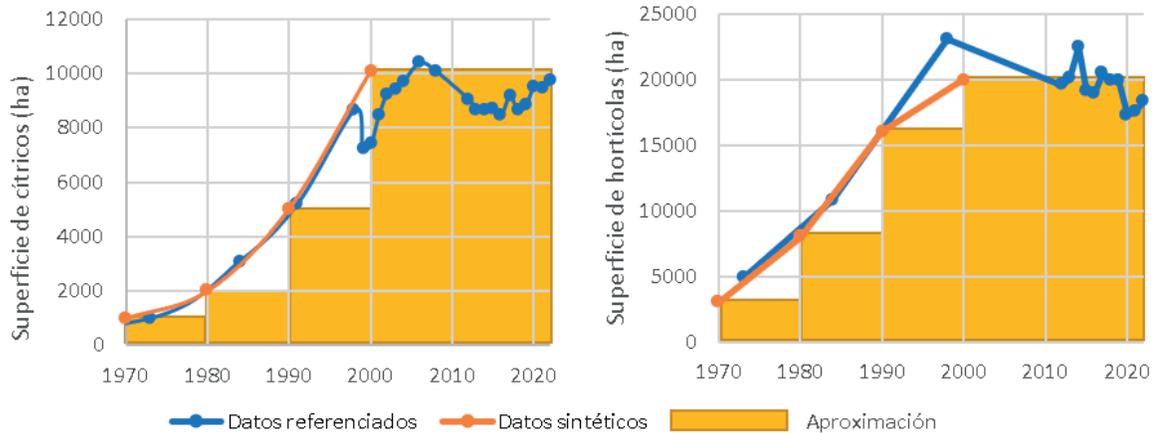


Figura 4 | Evolución temporal de las superficies bajo riego dedicadas a cítricos y hortícolas. La serie azul representa los datos crudos obtenidos de la bibliografía y la serie naranja y los bloques representan la aproximación para su incorporación al modelo numérico.

Tabla 10 | Coeficientes de homotecia inversa aplicados a MAPAMA (2023) para cultivos hortícolas.

Año	Superficie sintetizada para hortícolas (ha)	% escalado respecto a MAPAMA (2023) (50580 ha)	Coefficiente homotecia
1970	3000	6%	0.244
1980	8000	16%	0.398
1990	16000	32%	0.562
2000	20000	40%	0.629

Tabla 11 | Coeficientes de homotecia inversa aplicados a MAPAMA (2023) para cítricos.

Año	Superficie sintetizada para cítricos (ha)	% escalado respecto a MAPAMA (2023) (12564 ha)	Coefficiente homotecia
1970	1000	8%	0.282
1980	2000	16%	0.399
1990	5000	40%	0.631
2000	10000	80%	0.892

Como resultado de la homotecia inversa aplicada, se ha generado una distribución espacial de los tipos de cultivo para cada uno de los cuatro periodos estudiados. El siguiente paso ha sido combinar espacialmente la información climatológica y la de tipo de cultivo. Para el periodo 1970-2000 se han generado 10 zonas de recarga como resultado de la combinación de los dos tipos de variables (2 estaciones meteorológicas y 5 usos de suelo). La Figura 5 muestra los mapas de las 10 zonas de recarga para cada una de las últimas tres décadas del siglo pasado. Para el periodo 2000-2022 se han obtenido 35 zonas de recarga combinando los datos de 7 estaciones meteorológicas y 5 usos de suelo (Figura 6).

Para cada una de estas 45 zonas de recarga (10 zonas para 1970-2000 y 35 zonas para el periodo 2000-2022) se ha calculado una serie temporal de recarga con VisualBALAN, adaptando las distintas variables según las características de cada zona de recarga. Estas series de recarga proporcionan la evolución temporal de las distintas combinaciones desde 1970 a 2022.

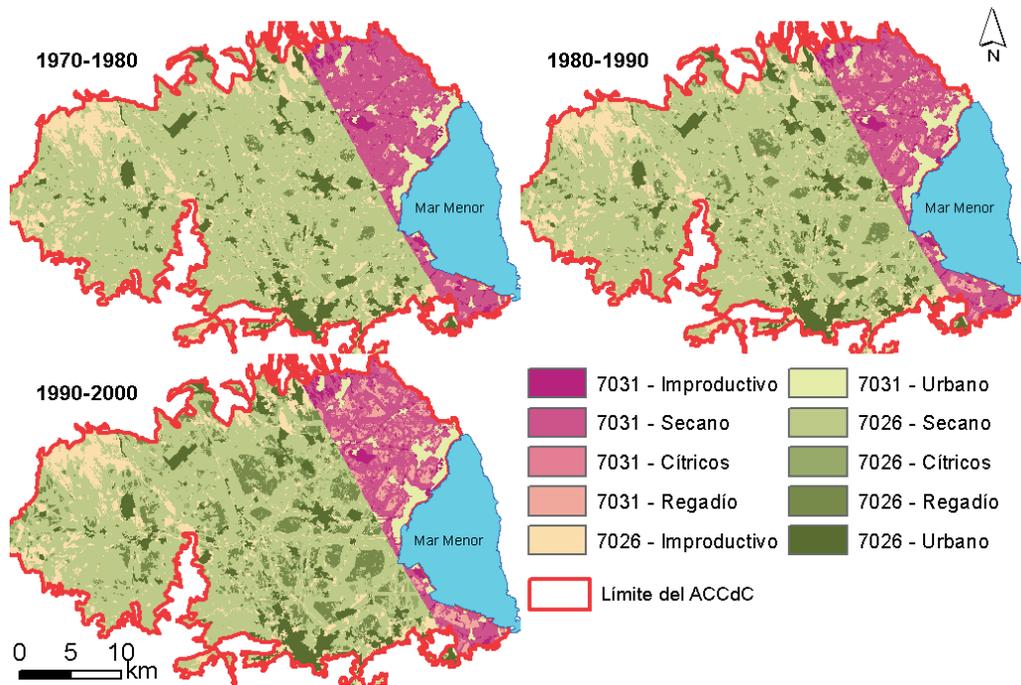


Figura 5 | Evolución temporal de la distribución espacial de las superficies bajo riego dedicadas a cítricos y hortícolas.

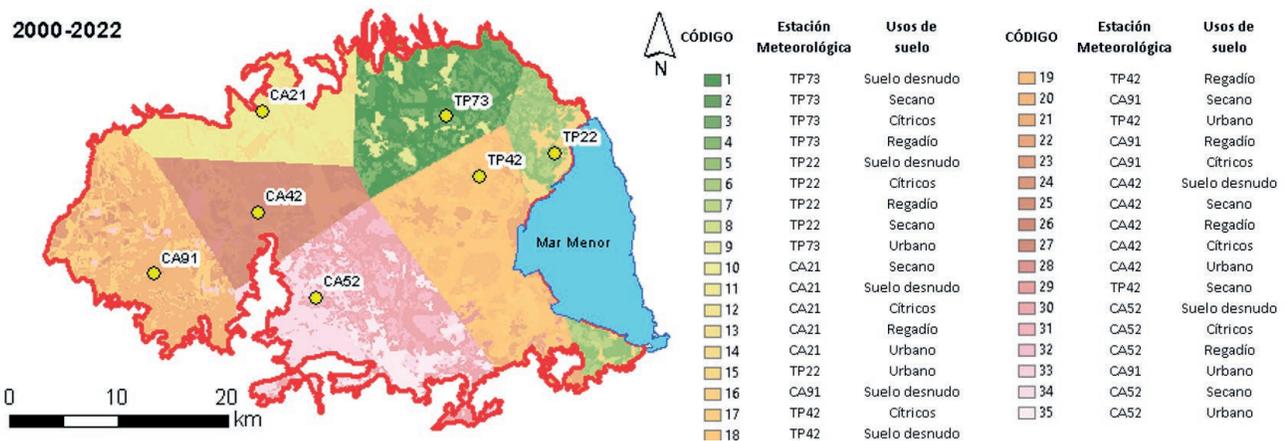


Figura 6 | Zonificación de la recarga combinando las series meteorológicas de las 7 estaciones y los 5 tipos de usos de suelo considerados para el periodo 2000-2022. Se ha trabajado con un total de 35 zonas de recarga.

RESULTADOS

La evolución temporal de la recarga anual calculada sobre toda la superficie del acuífero se muestra en las Figura 7, junto con la precipitación y el riego total para cada año. Se ha calculado un valor promedio de recarga de $91 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ para todo el periodo, con valores extremos de 24 hm^3 en 1978 y de 172 hm^3 en 2008. La precipitación promedio fue de $390 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, con un valor mínimo de 124 hm^3 en 2015 y un máximo de 760 hm^3 en 1988. Estos valores globales de recarga se han calculado agregando

las series de recarga diaria obtenidas con VisualBALAN para cada una de las 45 zonas de recarga en las que se ha dividido espacial y temporalmente el modelo.

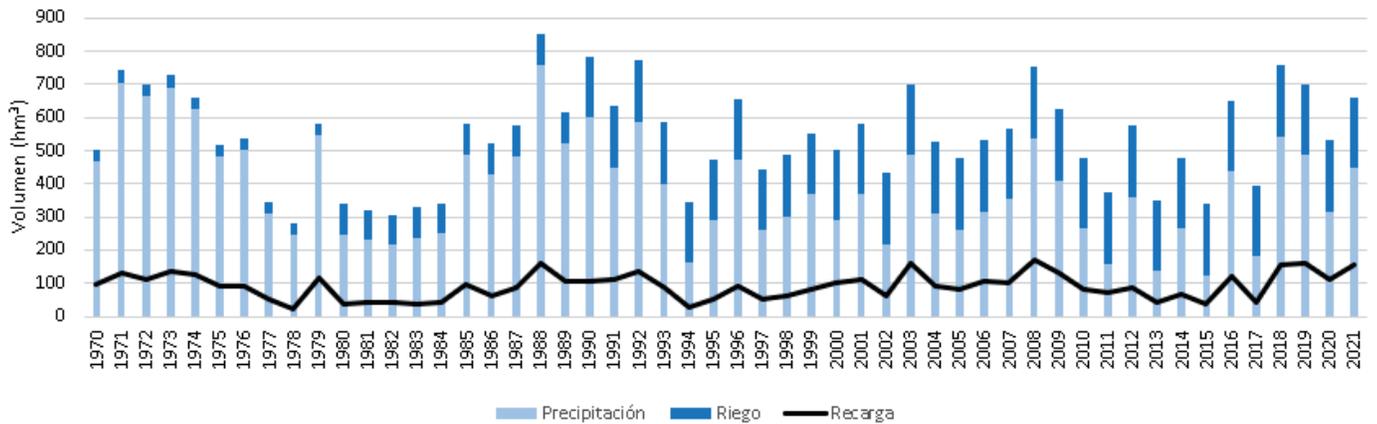


Figura 7 | Evolución temporal de la recarga sobre el ACCdC en el periodo de estudio frente a las entradas de agua por precipitación y riego.

El coeficiente medio de recarga (α) para todo el periodo es de 17 %. Comparando los volúmenes de *Precipitación + Riego* ($P+r$) frente a los de recarga calculados (Figura 8) se observa que para que se produzca recarga es necesario que el valor de $P+r$ sea mayor que el umbral de recarga (P_0) de 157 mm año⁻¹; con ese valor la tasa de recarga sería muy pequeña (aprox. 1.5 %).

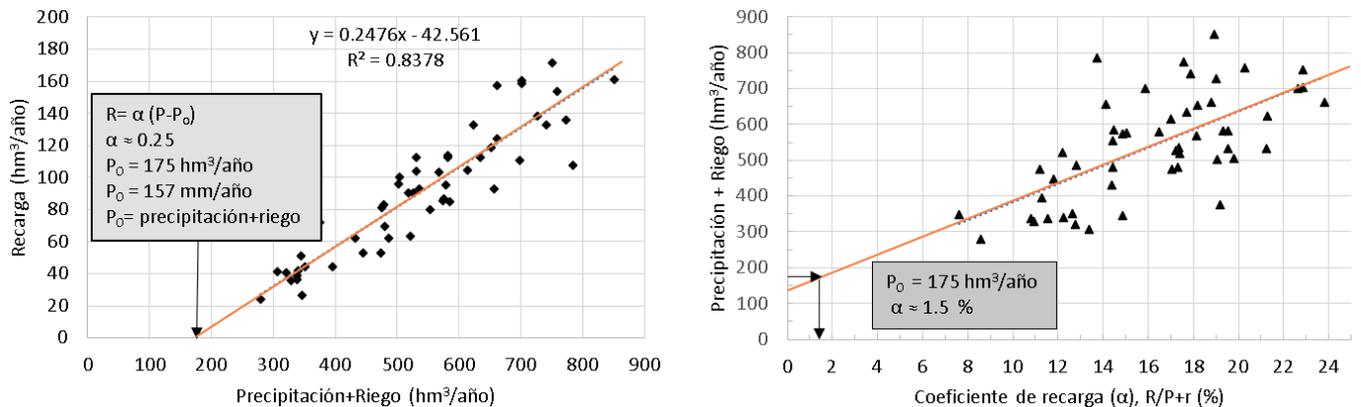


Figura 8 | Izquierda: Relación entre los volúmenes de precipitación (P) + riego (r) y los de recarga calculada para todo el periodo de estudio (1970-2021). Derecha: Relación entre los volúmenes de precipitación (P) + riego (r) y el coeficiente de recarga ($R/P+r$).

Cabe destacar que el hecho de haber utilizado datos únicamente de 2 estaciones climatológicas en el periodo 1970-2000, frente a las 7 estaciones usadas para el periodo 2000-2022, podría haber producido información no representativa de la realidad tanto de la distribución espacial como de los valores totales de la precipitación, la evapotranspiración y la recarga en el primer periodo. En este trabajo no se ha propuesto utilizar un método distinto para estimar la evapotranspiración en el periodo 1970-2000 para mantener la congruencia entre los dos periodos, pero podría ser relevante analizar en profundidad las consecuencias de la falta de estaciones meteorológicas y de datos de evapotranspiración en el primer periodo.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado proporciona dos conclusiones principales, una relativa a la confiabilidad y otra relativa a la trascendencia de los resultados.

- Confiabilidad de los resultados: La aplicación de la modelación numérica para la estimación de la recarga al ACCdC con VisualBALAN considerado la evolución temporal y espacial de las variables climáticas y de los usos de suelo, ha proporcionado unos valores de recarga que se consideran muy confiables, en función de los datos disponibles. Se han considerado los cultivos principales (cítricos, cultivos anuales y perennes) y otras áreas de terreno. Los resultados, basados en métodos previos pero mejorados con criterios agronómicos actuales, muestran consistencia con estimaciones anteriores, aunque ligeramente menores. La delimitación de la zona de absorción efectiva y coeficientes de cultivo específicos para condiciones semiáridas contribuyeron a una mejor calibración de los resultados. A pesar de las incertidumbres en las series piezométricas, la reproducción de la tendencia interanual en piezómetros (calibración y validación) confirma la confiabilidad de los resultados.
- Trascendencia de los resultados. La confiabilidad de los resultados sugiere varios aspectos muy relevantes para la gestión de los recursos hídricos en la zona: (i) se observa que el umbral de $P+r$ para que se produzca recarga está en torno a 157 mm año^{-1} ; dado que todos los años evaluados se ha producido recarga, incluso cuando la P ha sido inferior a ese umbral, se deduce que la contribución de los excedentes de riego a la recarga es notable, a pesar de la tecnificación de los últimos años; (ii) dada la influencia del riego en la recarga y las previsiones de disminución de la precipitación debido al cambio climático, los planes de gestión de los recursos hídricos y del estado medioambiental de los mismos en la zona de estudio deberían evaluar con detalle la influencia de la disminución de ambas variables en la recarga al acuífero del Cuaternario y en el funcionamiento del Mar Menor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del proyecto PID2019-110311RB-C22, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033, “FEDER Una manera de hacer Europa”.

REFERENCIAS

- Alcolea, A., Contreras, S., Hunink, J. E., Luis García-Aróstegui, J., Jiménez-Martínez, J., Virgilio Cruz, J. 2019. Hydrogeological modelling for the watershed management of the Mar Menor coastal lagoon (Spain). *Science of the Total Environment*, 663. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.375>
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration. FAO 56*.
- Allison, G. B., Gee, G. W., Tyler, S. W. 1994. Vadose-Zone Techniques for Estimating Groundwater Recharge in Arid and Semiarid Regions. *Soil Science Society of America Journal*, 58(1), 6–14. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010002x>
- Álvarez-Rogel, J., Barberá, G. G., Maxwell, B., Guerrero-Brotóns, M., Díaz-García, C., Martínez-Sánchez, J. J., Sallent, A., Martínez-Ródenas, J., González-Alcaraz, M. N., Jiménez-Cárceles, F. J., Tercero, C., Gómez, R. 2020. The case of Mar Menor eutrophication: State of the art and description of tested Nature-Based Solutions. *Ecological Engineering*, 158(October), 106086. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106086>
- Baudron, P., Barbecot, F., Aróstegui, J. L. G., Leduc, C., Travi, Y., Martínez-Vicente, D. 2014. Impacts of human activities on recharge in a multilayered semiarid aquifer (Campo de Cartagena, SE Spain). *Hydrological Processes*, 28(4), 2223–2236. <https://doi.org/10.1002/hyp.9771>

- Caballero-Villar, P., Fernández-Zamudio, M. Á., Hernández-Espallardo, M. 2006. *Plan Estratégico Del Sector Agroalimentario de la Región de Murcia. 2.3. Análisis del sector Citrícola*. [http://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=4582&IDTIPO=100&RASTRO=c\\$m22721,22746](http://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=4582&IDTIPO=100&RASTRO=c$m22721,22746)
- Contreras, S., Hunink, J. E., Alcolea, A., Jimenez-Martinez, J. 2017. *Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial cuaternario*.
- CRCC. 2023. *Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena*. <https://www.crcc.es/informacion-c-r-c-c/>
- Custodio, E. 2019. *Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua. Aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España. Informe RAEMIA*.
- de Vries, J. J., Simmers, I. 2002. Groundwater recharge: An overview of process and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Domingo-Pinillos, J. C., Senent-Aparicio, J., García-Aróstegui, J. L., Baudron, P. 2018. Long term hydrodynamic effects in a semi-arid Mediterranean Multilayer Aquifer: Campo de Cartagena in South-Eastern Spain. *Water (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101320>
- Finch, J. W. 1998. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model - Sensitivity to land surface parameters. *Journal of Hydrology*, 211(1–4), 112–125. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00225-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00225-X)
- Garatuza-Payan, J., Shuttleworth, W. J., Encinas, D., McNeil, D. D., Stewart, J. B., DeBruin, H., Watts, C. 1998. Measurement and modelling evaporation for irrigated crops in north-west Mexico. *Hydrological Processes*, 12(9), 1397–1418. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199807\)12:9<1397::AID-HYP644>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199807)12:9<1397::AID-HYP644>3.0.CO;2-E)
- García-Aróstegui, J. L., Aragón, R., Hornero, J., Trujillo, C., Guardiola, C., Fornés, J. M., Candela, L., Jiménez-Martínez, J., Elorza, F. J., Soler, M., Castillo, V. del, González, G., García-García, J., Arrabal, M. E. 2012. *Caracterización del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena y modelización matemática en el contacto con el Mar Menor*. https://info.igme.es/SidPDF/155000/322/155322_0000001.pdf
- 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. MITECO, AQUIFER Project (SOE4/P1/E1045). 119 p.
- Gee, G. W., Hillel, D. 1988. Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. *Hydrological Processes*, 2(3), 255–266. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360020306>
- Hornero, J., Manzano, M., Ortega, L., Custodio, E. 2016. Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcadozo Aquifer System (SE Spain). *Science of The. Total Environment*, vol. 568, pp. 415–432, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.011.
- IMIDA 2017. Presentación del Mapa de cultivos de la Región de Murcia. Aplicación al SIG Citrícola: Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica de apoyo a la elaboración de la Estadística Agraria de Murcia- SIGEAM. Disponible en: https://www.imida.es/documents/13436/913468/SIG_Citri_RMU.pdf/5cb467ff-cf8f-4574-a0b3-e50ed84359c9?version=1.0
- ITGE. 1991. *Estudio Hidrogeológico del Campo de Cartagena (2ª Fase). 2 volúmenes (Memoria y anejos). Informe Técnico. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, España, 131 pp.*
- Jiménez-Martínez, J., Candela, L., Molinero, J., Tamoh, K. 2010. Groundwater recharge in irrigated semi-arid areas: Quantitative hydrological modelling and sensitivity analysis. *Hydrogeology Journal*, 18(8), 1811–1824. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0658-1>
- Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J. L., Hunink, J. E., Contreras, S., Baudron, P., Candela, L. 2016. The role of groundwater in highly human-modified hydrosystems: A review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain). *Environmental Reviews*, 24(4), 377–392. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0089>

- Kendy, E., Gérard-Marchant, P., Walter, M. T., Zhang, Y., Liu, C., Steenhuis, T. S. 2003. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 17(10), 2011–2031. <https://doi.org/10.1002/hyp.1240>
- MAPAMA. 2023. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación de España Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios Disponible online: <https://sig.mapama.gob.es/siga/> (revisado el 15 abril 2023).
- MITECO. 2019. *Análisis de soluciones para el objetivo del vertido cero al Mar Menor proveniente del Campo de Cartagena. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice I. Diagnóstico*. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/Mar-Menor-Campo-de-Cartagena-Vertido-Cero.aspx>
- MITECO. 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*.
- MITECO. 2022. *Proyecto de Plan Hidrológico de La Demarcación Hidrográfica Del Segura (Revisión Del Tercer Ciclo: 2022-2027)*.
- Ouaisa, S., Gómez-Jakobsen, F., Yebra, L., Ferrera, I., Moreno-Ostos, E., Belando, M. D., Ruiz, J. M., Mercado, J. M. 2023. Phytoplankton dynamics in the Mar Menor, a Mediterranean coastal lagoon strongly impacted by eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 192(April). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115074>
- Polo, M. J. 2022. *Estimación de la recarga distribuida al acuífero del Cuaternario del Campo de Cartagena mediante el código VisualBALAN*. UPCT.
- Román-Cervantes, C. 1996. Uso y explotación de la tierra en la comarca del campo de Cartagena, (Siglos XIX y XX). In P. Y. A. Ministerio de Agricultura (Ed.), *Serie Estudios* (Issue 126). https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/fondo/pdf/16436_all.pdf
- Samper, J., Huguet Rotger, L., Ares, J., García Vera, M. A. 1999. Modelos interactivos de balance hidrológico. *Estudios En La Zona No Saturada: Acta de Las IV Jornadas Sobre Investigación En La Zona No Saturada Del Suelo, 3-6 de Noviembre de 1999, La Laguna, Tenerife, 1999, ISBN 84-699-1258-5, Págs. 187-194*, 187–194. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7962054>
- Samper J, Huguet L., Ares J, García-Vera M. A. 2005 User's guide VisualBALAN v.2.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga [Visual- BALAN v.2.0: interactive code to establish water balance and aquifer recharge]. Civil Engineering School of A Coruña, A Coruña, Spain, 150 pp.
- Samper, J., García-Vera, M. A. 1997. Estimación de la recarga producida por la lluvia y los excedentes de riego mediante balances diarios de agua en el suelo. Experiencias en diferentes zonas climáticas. En E. Custodio, R. Llamas, F. J. Samper Calvete (Eds.), *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica* (pp. 367–380). Instituto Tecnológico Geominero de España; Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- SIAM - Sistema de Información Agrario de Murcia Coeficientes de Cultivo: Kc. 2023. Retrieved February 5, 2024, from <http://siam.imida.es/>