

ESTUDIOS

Efectos del cambio climático sobre los recursos y reservas de las aguas subterráneas

Lorena Bermejo Santos¹, Emma Gaitán Fernández²

Resumen: Las proyecciones climáticas auguran un clima cada vez más cálido y con episodios de lluvias torrenciales, lo que afecta a la fase subterránea del ciclo hidrológico. El agua subterránea es fundamental para el abastecimiento, la industria y la agricultura. Por ello, se han analizado distintas masas de agua subterránea dentro del territorio peninsular español para determinar la influencia de los efectos del cambio climático sobre las reservas y recursos subterráneos y ecosistemas asociados, como son los humedales. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, bajo ciertos escenarios de cambio climático, el manantial que alimenta el humedal de la Albufera de Anna en Valencia podría ver comprometida su existencia a mediados de siglo. Además, se prevén descensos significativos en las reservas de agua subterránea, con una disminución de hasta el 85% en áreas como las Sierras Paleozoicas de la Virgen y Vicort, lo que conlleva consecuencias ambientales, sociales y económicas significativas.

Palabras clave: recursos, reservas, humedal, climático-dependiente, correlación, simulación futura.

Fecha de recepción: 4 de septiembre de 2023.

Fecha de admisión: 11 de diciembre de 2023.

¹ Compañía General de Soporte a la Ingeniería, CGSi, S.L., l.bermejo@cgsingenieria.com.

² Fundación para la Investigación del Clima, FIC, <https://orcid.org/0000-0003-1068-6440>, emma@ficlima.org.

Effects of climate change on groundwater resources and reserves

Abstract: Climate projections predict an increasingly warmer climate with episodes of torrential rain, which affects the underground phase of the hydrological cycle. Groundwater is essential for supply, industry and agriculture. For this reason, different masses of groundwater within the Spanish peninsular territory have been analyzed to determine the influence of the effects of climate change on underground reserves and resources and associated ecosystems, such as wetlands. The results obtained show that, under certain climate change scenarios, the spring that feeds the Albufera de Anna wetland in Valencia could see its existence compromised by mid-century. In addition, significant decreases in groundwater reserves are expected, with a decrease of up to 85% in areas such as the Paleozoic Sierras de la Virgen and Vicort, which entails significant environmental, social and economic consequences.

Keywords: *resources, reserves, wetland, climate-dependent, correlation, future simulation.*

Effets du changement climatique sur les ressources et réserves en eaux souterraines

Résumé : Les projections climatiques prédisent un climat de plus en plus chaud avec des épisodes de pluies torrentielles, qui affectent la phase souterraine du cycle hydrologique. Les eaux souterraines sont essentielles à l’approvisionnement, à l’industrie et à l’agriculture. C’est pour cette raison que différentes masses d’eaux souterraines du territoire de la péninsule espagnole ont été analysées afin de déterminer l’influence des effets du changement climatique sur les réserves et ressources souterraines et les écosystèmes associés, tels que les zones humides. Les résultats obtenus montrent que, selon certains scénarios de changement climatique, la source qui alimente la zone humide de l’Albufera de Anna à Valence pourrait voir son existence compromise d’ici le milieu du siècle. En outre, des diminutions significatives des réserves d’eau souterraine sont attendues, avec une diminution pouvant atteindre 85% dans des zones telles que les Sierras paléozoïques de la Virgen et Vicort, ce qui entraînera d’importantes conséquences environnementales, sociales et économiques.

Mots clés : *ressources, réservations, zone humide, dépendant du climat, corrélation, simulation future.*

1. Introducción

El agua subterránea presenta una amplia distribución geográfica y es responsable del abastecimiento humano a zonas rurales y a núcleos de población que se encuentran alejados de cauces superficiales, o en los que no es posible garantizar el suministro únicamente mediante esta vía. Además, presenta la ventaja de poder ser captada en el mismo lugar donde se necesita, no así el agua superficial que requiere de grandes infraestructuras. Así mismo, permite garantizar el suministro en cantidad y calidad. Además, supone un recurso estratégico en situaciones de

fenómenos meteorológicos extremos, como las sequías, y es el soporte de zonas húmedas y ecosistemas acuáticos.

El agua subterránea en nuestro país permite el riego de cientos de millares de hectáreas. Además, ha contribuido a la transformación del regadío, incrementando la superficie de riego y permitiendo a zonas que eran tradicionalmente de secano, o provistas de escasos recursos superficiales, disponer de cantidades de agua suficientes para la agricultura de regadío. Este fenómeno, a su vez, ha permitido en España el desarrollo y crecimiento, tanto económico como social y ambiental, de áreas que se encontraban deprimidas. Destacar también el papel de agua subterránea para usos turísticos y recreativos (Custodio, 2017).

Las proyecciones climáticas pronostican un clima cada vez con temperaturas más elevadas y con precipitaciones más escasas y concentradas con patrones de torrencialidad. Estos efectos suponen considerables alteraciones en los procesos de la fase subterránea del ciclo hidrológico (Pernía y Fornés, 2009). Dado el papel estratégico del agua subterránea en nuestro país, se hace necesaria la estimación de las consecuencias que el cambio climático podría tener sobre los recursos hídricos subterráneos y sobre los ecosistemas asociados a dicha fase, como son los humedales (MIMAN, 2005).

Para llevar a cabo esta investigación se realizaron dos proyectos³. En el primero de ellos se estudiaron los posibles impactos del cambio climático sobre las reservas de las aguas subterráneas en seis masas de agua subterránea (MASb) pertenecientes a distintas comunidades autónomas repartidas por el territorio español, representativas de las variedades climáticas de la península, así como de diversas casuísticas hidrogeológicas, empleando como indicadores los niveles piezométricos correspondientes. Estas MASb fueron: Sierra de Torrelaguna (Comunidades de Madrid y Castilla La Mancha), Sierra de Cazorla (Comunidades de Andalucía y Castilla La Mancha), Sierra de Tiétar (Comunidades de Madrid, Extremadura y Castilla y León), Sierra de Cantabria (La Rioja, País Vasco y Castilla y León), Sierras del Paleozoico de La Virgen y Vicort (Comunidades de Aragón y Castilla y León) y en el Aluvial del Jarama (Comunidades de Madrid y Castilla La Mancha).

³ Agradecimientos. Agradecer a AEMET el suministro de los datos de carácter climático. Reconocer y poner en valor la labor del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y de las diferentes Confederaciones Hidrográficas en la disposición pública y actualizada de datos de carácter hidrogeológico.

Tal y como concluyen Moya, Hernández y Borrell (2005), los humedales son ecosistemas especialmente vulnerables frente a los cambios climáticos y, sin embargo, han sido poco estudiados. Por ello, en el segundo proyecto se fue un paso más allá y, además de estimar las posibles variaciones de las reservas de agua subterránea, se analizaron las repercusiones del cambio climático sobre los recursos asociados a un humedal piloto, en concreto la Albufera de Anna, localizada en la MASb de Caroch Sur en Valencia, de manera que se estimó el efecto sobre los recursos drenados de forma natural por el manantial que alimenta a la Albufera, así como las posibles consecuencias sobre el ecosistema asociado.

2. Objetivos generales y específicos de las investigaciones realizadas

Con el primer proyecto se pretendía analizar los efectos del cambio climático sobre las reservas de aguas subterráneas. Para ello, se seleccionaron una serie de MASb por ser una muestra representativa de la respuesta de las diferentes tipologías de los sistemas acuíferos y distribuirse en todo el territorio español, afectado a su vez por diferentes climatologías. En este caso, se tomó como indicador del nivel de reservas el nivel piezométrico en los puntos de control seleccionados de los acuíferos estudiados. La bondad de este indicador viene determinada porque en su versión de "índice de llenado" es uno de los que se han venido empleando habitualmente por los organismos competentes en la planificación hidrológica para el registro y control del estado cuantitativo de los acuíferos (Pernía y Corral, 2000).

En el segundo proyecto se pretendía establecer las consecuencias del cambio climático sobre las reservas y recursos subterráneos, para lo que se seleccionó un humedal alimentado por agua subterránea. La evaluación de la afección de los efectos del cambio climático se llevó a cabo según tres magnitudes diferentes: La primera de ellas de estimación de reservas de agua subterránea, evaluada de forma semejante al primer proyecto, mediante control piezométrico. Una segunda sobre la estimación de la evolución de los recursos en función de la variación de los caudales de las surgencias en un manantial controlado, bajo hipótesis de régimen natural. En tercer lugar, y como consecuencia de ello, el previsible efecto sobre el ecosistema asociado.

Como objetivos específicos cabe reseñar:

- Definir un proceso preciso y reproducible, simple, de fácil aplicación y muy bajo coste, sobre las relaciones entre los índices del estado de las reservas de agua subterránea y las variables climáticas. Para dichas relaciones, se obtuvieron resultados cuantificables, y con un margen de confianza asociado, para ser posteriormente extrapoladas a los escenarios futuros. El mismo proceso se lleva a cabo sobre los recursos para el caso del humedal y los caudales del manantial.
- Estimar la evolución futura de las relaciones robustas identificadas, entre los índices del estado de las reservas de agua subterráneas (equivalentes a la piezometría) y las variables climáticas, bajo diferentes escenarios de cambio climático futuro. El mismo proceso se lleva sobre las relaciones de los recursos subterráneos (equivalentes a los caudales del manantial) y las variables climáticas.
- Analizar los cambios esperados para el futuro para hacer una estimación del impacto del cambio climático sobre las reservas y recursos de agua subterránea en las MASb estudiadas y sus correspondientes repercusiones a nivel medioambiental, social, hídrico y económico-energético.

3. Metodología

3.1. Fases de la investigación

El primer paso en ambos estudios consistió en la determinación de las características hidrogeológicas que permitieran establecer el funcionamiento básico de cada una de las MASb desde el punto de vista de la hidrodinámica subterránea.

Una vez definidas dichas características, se llevó a cabo la selección de los piezómetros de observación más representativos de los niveles de agua subterránea, así como la obtención de los caudales del manantial que alimenta directamente al humedal, en el caso del segundo proyecto.

A continuación, se procedió al estudio de los indicadores e índices más adecuados del estado de las reservas y recursos de agua subterránea. Para ello, se llevó a cabo el establecimiento de algoritmos útiles para la correlación entre el clima y su efecto sobre las reservas y recursos de las aguas subterráneas. En primer lugar, se establecieron, relaciones entre series históricas de los niveles piezométricos (asociados al volumen de reserva de aguas subterráneas y, por tanto, al grado

de llenado en la MASb) y los caudales de manantiales para el caso del humedal (asociados a los recursos disponibles en el sistema en régimen natural), con la climatología correspondiente.

Conviene resaltar que la metodología empleada para la realización del tratamiento de correlación estadístico entre pluviometría y niveles piezométricos, así como caudales, responde a varios principios que son asumidos desde un punto de vista de la hidrogeología clásica. Estos principios indican que la correlación directa entre lluvias y niveles del agua subterránea no siempre es clara y lo más conveniente al ensayar estas correlaciones es relacionar niveles piezométricos con desviaciones acumuladas de la pluviometría con respecto a la media (Custodio y Llamas, 1976).

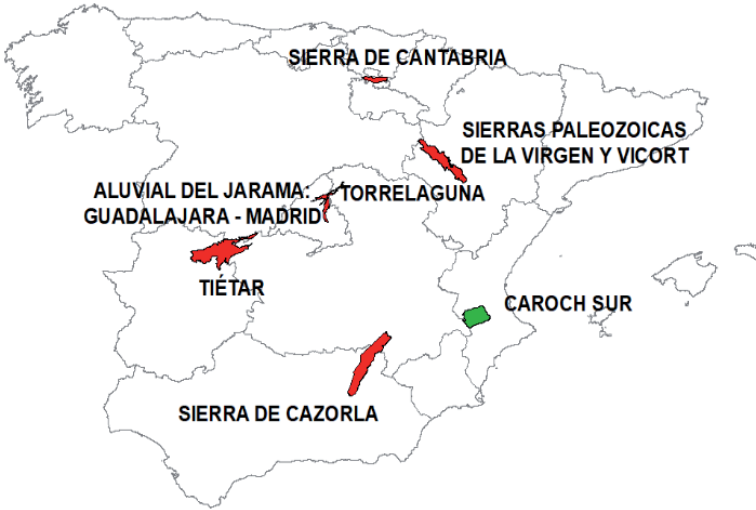
A partir de esta correlación, se obtuvieron los correspondientes coeficientes de correlación de las series históricas analizadas.

El último paso consistió en el estudio de la evolución de tales correlaciones, mediante el uso de simulaciones futuras de cambio climático a partir de las últimas proyecciones climáticas disponibles en cada caso. Así, una vez obtenidos y seleccionados los coeficientes de correlación que presentaban un mayor grado de ajuste se procedió a la generación de un conjunto de escenarios locales y regionales de cambio climático en el área de estudio, teniendo en cuenta los modelos más actuales de cambio climático. Sobre estos escenarios, aplicando los coeficientes de correlación seleccionados, se procedió a extrapolar el efecto del cambio climático sobre la piezometría y el caudal de surgencia del manantial, en cada caso.

3.2. Área de estudio

Las MASb seleccionadas por considerarse representativas de las variedades climáticas de la península, así como de variabilidad hidrogeológica existente, en el caso del primer proyecto fueron: Sierra de Torrelaguna, Sierra de Cazorla, Sierra de Tiétar, Sierra de Cantabria, Sierras del Paleozoico de La Virgen y Vicort y en el Aluvial del Jarama. La ubicación, así como las características hidrogeológicas de cada una se pueden consultar en la Figura 1 y la Tabla 1. En el caso del estudio del efecto del cambio climático sobre el humedal de la Albufera de Anna, la ubicación de la MASb, así como las características de la misma pueden verse en la misma Figura 1 y Tabla 1.

FIGURA I. Ubicación de las MASb estudiadas
(primer proyecto en rojo y segundo proyecto en verde)



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 2006.

TABLA I. Ubicación de las MASb y características hidrogeológicas

MASb	Comunidad Autónoma de ubicación	Características hidrogeológicas
Aluvial Jarama: Guadaluajara – Madrid	Madrid y Castilla La Mancha	Acuífero aluvial cuaternario
Sierra de Cazorla	Andalucía y Castilla la Mancha	Acuífero calizo
Tiétar	Madrid, Extremadura y Castilla León	Acuífero terciario detrítico
Sierra de Cantabria	La Rioja, País Vasco y Castilla León	Acuífero calizas cretácico
Sierras Paleozoicas de la Virgen y Vicort	Aragón y Castilla León	Acuífero kárstico y materiales cuaternarios
Torrelaguna	Madrid y Castilla la Mancha	Acuífero cretácico carbonatado
Caroch Sur*	Castilla la Mancha y Comunidad Valenciana	Acuífero kárstico

*Segundo proyecto.

Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 2006.

3.3. Selección de puntos de agua

Una vez definidas las características hidrogeológicas de las distintas MASb, se procedió a identificar todos los piezómetros disponibles en la Base de Datos de Puntos de Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), así como las bases del IGME (Instituto Geológico y Minero de España) y de las correspondientes Confederaciones Hidrográficas, para obtener los datos de información piezométrica.

Analizando la información sobre el total de los puntos de control piezométrico, así como su asociación con las diferentes formaciones acuíferas existentes y la extensión temporal de la serie histórica, se procedió a seleccionar los puntos que se consideraron más representativos.

Para realizar esta selección se recopiló la información de los piezómetros. A partir de los datos que se obtuvieron en las correspondientes fichas de inventario de puntos de agua, los criterios de selección de los piezómetros sobre los que se realizó la selección fueron los siguientes:

- Características y calidad constructiva de los piezómetros.
- Ubicación del punto, a fin de que en la medida de lo posible refleje la evolución natural sin afección antrópica.
- Extensión de las series temporales, de forma que dispongan al menos de registros mensuales con una serie larga de años (15 años o más).
- Representatividad como punto de control del acuífero correspondiente a la MASb.

En el caso de la Albufera de Anna se recopiló de igual manera los datos de caudal disponibles en el manantial principal que alimenta dicho humedal.

3.4. Recopilación y tratamiento de información climática

La información climática a recopilar ha considerado las variables meteorológicas que caracterizan el clima localmente y que están más directamente relacionadas con la MASb en estudio. En este caso, la variable ha sido la precipitación observada. Estos datos se han obtenido a partir de los observatorios meteorológicos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) repartidos a lo largo de España, que se sitúan en un radio de unos 50 km entorno a la MASb estudiada en cada caso.

Se ha aplicado un detallado proceso de control de calidad de los datos meteorológicos para garantizar la óptima calidad de los mismos, descartando aquellos valores que pudieran comprometer la calidad de la información empleada en la simulación de proyecciones climáticas. Por eso, y antes de usar los datos, éstos se han sometido a un proceso de control de calidad (datos análogos y outliers) y homogeneización (buscando periodos temporales anómalos en las series de datos, basándonos en test estadísticos de distribución de probabilidad, test de Kolmogorov-Smirnov).

La información climática recopilada relativa a la precipitación observada fue la empleada en la correlación con los datos de niveles piezométricos, y caudales en su caso, para obtener los coeficientes de correlación a aplicar en las proyecciones futuras.

3.5. Generación de simulaciones de clima futuro

Los escenarios de clima futuro, para poder ser usados con solvencia científica en estudios de evaluación de impactos, deben cumplir ciertos requisitos:

1. Ser generados a partir de los Modelos Climáticos (MCs) más actualizados.
2. Tener detalle local, dado que puntos próximos pueden sufrir cambios bastante diferentes con respecto a su clima actual. Este requisito es especialmente importante en estos proyectos de investigación, dada la especificidad de las diferentes MASb, lo que probablemente suponga cambios bastante diferentes en función de la ubicación de la masa.
3. Haberse realizado completos estudios de verificación y validación, para confirmar que el clima de ese punto se simula con fiabilidad. De nuevo el carácter local de una MASb hace muy importante cumplir adecuadamente este requisito. Este estudio de verificación corresponde a las correlaciones previas piezometría-pluviometría llevadas a cabo en la fase anterior del proyecto.
4. Considerar y cuantificar las incertidumbres inherentes a toda simulación climática, mediante la utilización de cuantas más proyecciones sea posible, obtenidas a partir de varios MCs y varios escenarios.
5. Además, para estos proyectos en particular, los escenarios deben tener ciertas características específicas, tales como que se haya corregido el denominado error sistemático buscando optimizar las variables con la resolución temporal de interés en el estudio.

En el caso del primer proyecto, los MCs más actualizados en el momento de la realización del mismo fueron los utilizados para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, que en general son Earth System Models, que incorporaban importantes novedades sobre Modelos anteriores (Taylor et al., 2012). Estos fueron nueve: BCC-CSM1-1, CanESM2, CNRM-CM5, GFDL-ESM2M, HADGEM2-CC, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3 y NorESM1.

Por otro lado, en el Quinto Informe IPCC se definieron cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5W/m². Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (RCP8.5). Para el presente estudio, para cada MCs, se han tenido en cuenta los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, pues, de acuerdo con experiencias previas, se considera que cubren de forma suficiente el intervalo razonable de variación de las precipitaciones futuras. En el presente artículo se resumen las conclusiones obtenidas para el escenario RCP8.5 por resultar el más pesimista, y así mantenernos en el lado de la seguridad.

Para el caso del proyecto del humedal de la Albufera de Anna se ha centrado en todo lo relacionado con el Sexto Informe de Evaluación del IPCC. La definición y generación de los MCs se realiza dentro del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados en su sexta fase (CMIP6, de sus siglas en inglés) y que se genera en paralelo al sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC6, por sus siglas en inglés). Los 10 MCs empleados han sido: ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, CanESM5, CMCC-ESM2, CNRM-ESM2-1, EC-EARTH3, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM y UKESM1-0-LL.

En el CMIP6 la forma en la que se consideran los escenarios de concentración futura de Gases de Efecto Invernadero es a través de los denominados SSP (Shared Socioeconomic Pathways). El conjunto de escenarios futuros mínimos exigibles a estudiar son los SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Además de para esos escenarios futuros, se han simulado resultados para el experimento *Historical* que describe el pasado y que actúa como un escenario de control de los modelos climáticos y permite evaluar su comportamiento. Se han utilizado para el estudio diez MCs cada uno de ellos con cuatro SSPs, por lo que se obtiene un conjunto de cuarenta proyecciones climáticas, cada una de ellas igual de equiprobables. De igual manera, en los resultados del presente artículo se resumen las previsiones estimadas bajo el escenario SSP5-8.5 por ser el más pesimista.

Las proyecciones climáticas a escala local se han generado aplicando a los MCs una técnica de regionalización estadística basada en un método de análogos en dos pasos descrito en Ribalaygua et al. (2013).

4. Resultados y análisis

4.1. Correlaciones entre recursos, reservas y precipitación

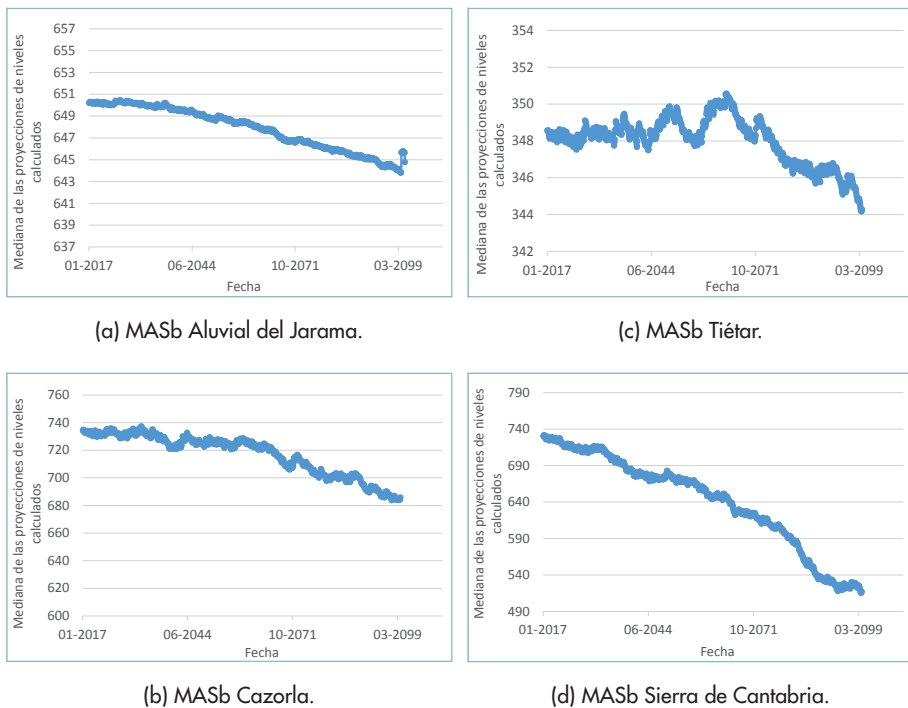
Para dar respuesta al objetivo de la investigación, relativo a la evaluación de la afección del cambio climático sobre las distintas MASb estudiadas, se han llevado a cabo correlaciones entre la precipitación histórica en los distintos observatorios meteorológicos recopilados y los niveles piezométricos en los piezómetros seleccionados, para evaluar las reservas. En el caso de la Albufera de Anna, además, se han llevado a cabo correlaciones entre la precipitación histórica y los caudales registrados en el manantial que abastece a la Albufera de Anna, para evaluar los recursos. Así, tanto los niveles piezométricos, como los caudales, fueron correlacionados con los desvíos acumulados con respecto a las medias mensuales de las precipitaciones registradas según la metodología propuesta por Custodio y Llamas (1976).

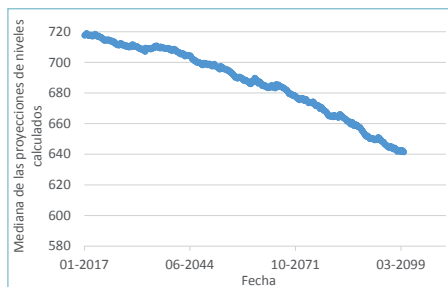
Durante el proceso de correlación se ha comprobado que el modelo lineal es el que permite la mayor bondad de ajuste, de acuerdo con los valores de coeficiente de correlación que se han ido obteniendo en los distintos ensayos, una vez se iban chequeando funciones de diferentes grados y tipología. Las correlaciones también se llevaron a cabo con distintos supuestos de decalaje, es decir, que los niveles piezométricos y los caudales tardasen en verse afectados un tiempo después desde que ocurre la precipitación. Esto resulta interesante ya que determinados medios, como pueden ser los kársticos, tienen una respuesta a la lluvia muy rápida y a veces casi inmediata, y sin embargo en otros medios de baja permeabilidad o porosidad limitada este fenómeno tarda más en ser detectado. Cabe destacar que en ocasiones las series pluviométricas históricas y las series piezométricas y de caudales no abarcan el mismo espacio temporal, para lo cual se han llevado a cabo distintas pruebas tales como mantener, a efectos de media, la serie pluviométrica completa y ajustarla al espacio temporal de datos disponible en cuanto a piezometría o caudales.

4.2. Proyecciones futuras de evolución de recursos y reservas

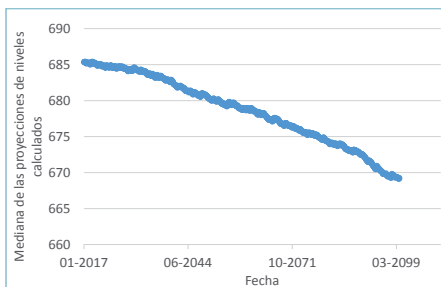
Con las mejores correlaciones obtenidas se elaboraron las proyecciones de los índices piezométricos, indicadores del estado cuantitativo de las reservas de agua subterránea, y de los caudales del manantial, indicador del estado cuantitativo de los recursos de agua subterránea, bajo simulaciones de clima futuro para cada Modelo Climático y escenario de emisiones, para estimar las previsiones futuras en los niveles y caudales en el entorno del humedal. En la Figura 2 se representa la mediana de la evolución futura de los niveles piezométricos en el escenario RCP 8.5 para las distintas MASb estudiadas.

FIGURA 2. Mediana de la evolución futura de los niveles piezométricos en el escenario RCP 8.5 para las distintas MASb estudiadas





(e) MASb Sierras P. de la Virgen y Vicort.



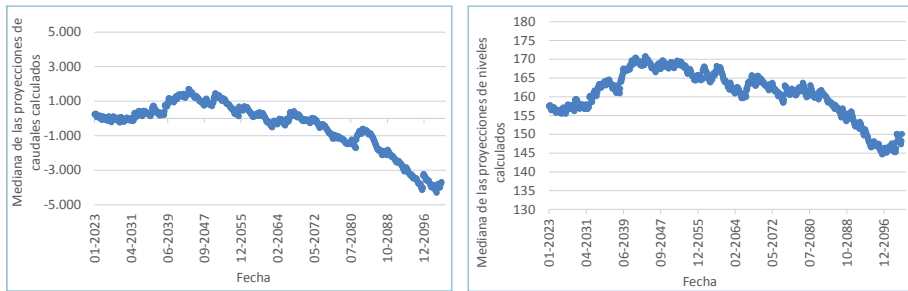
(f) MASb Torrelaguna.

Fuente: Elaboración propia.

En la MASb del Aluvial del Jarama (Figura 2a) se estima que podrían producirse a final de siglo descensos piezométricos de hasta 7 m debido a los efectos del cambio climático. En la MASb de Cazorla (Figura 2b) estos descensos podrían alcanzar más de 50 metros. Para el caso de la MASb Tiétar (Figura 2c) se estima que pudieran alcanzar hasta 7 m. El caso de la MASb de la Sierra de Cantabria (Figura 2d) es uno de los más llamativos, estimándose descensos teóricos de más de 200 m de nivel piezométrico. Por su parte, la MASb de las Sierras Paleozoicas de la Virgen y Vicort (Figura 2e) presentarían descensos piezométricos superiores a 70 metros. Por último, en la MASb de Torrelaguna (Figura 2f) se estima en unos 16 m el descenso piezométrico.

En la Figura 3 se muestra la mediana de la evolución futura de los caudales del manantial Anna-2 y de los niveles piezométricos en la MASb Caroch Sur para el escenario SSP5-8.5.

FIGURA 3. Mediana de la evolución futura de los caudales del manantial Anna-2 (a) y de los niveles piezométricos (b) en la MASb Caroch Sur para el escenario SSP5-8



(a) Manantial Anna-2.

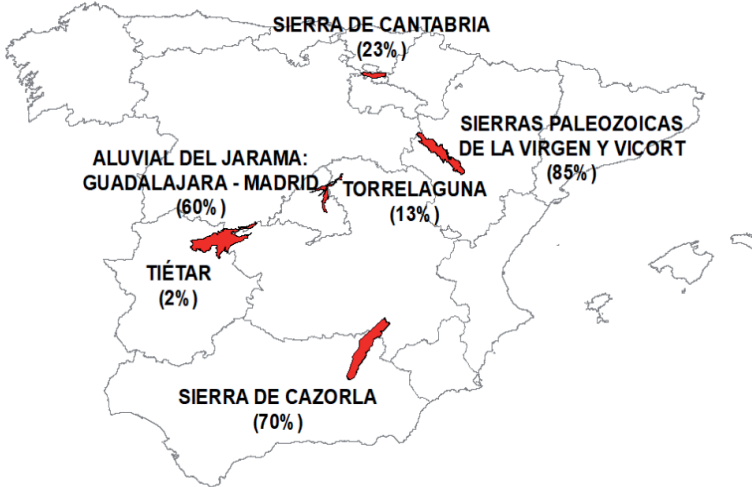
(b) Niveles en la MASb Caroch Sur.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del humedal de la Albufera de Anna, en el escenario SSP58.5, se estiman unos descensos continuados de caudal en el manantial (Figura 3a) que incluso podrían llegar a comprometer la existencia del mismo a partir de mediados de siglo, lo que supondría un impacto gravísimo sobre el ecosistema asociado. En cuanto a los niveles piezométricos se estiman unos descensos a finales de siglo entorno a los 15 metros (Figura 3b).

Los resultados obtenidos plantean unos escenarios negativos para los acuíferos por efecto del cambio climático. En el caso del Aluvial del Jarama los descensos en las reservas podrían llegar a alcanzar valores superiores al 60%, 70% en el caso de Cazorla, podrían llegar al 2% en la MASb del Tiétar, al 23% en la Sierra de Cantabria, en el caso de las Sierras Paleozoicas de la Virgen y Vicort cerca del 85% y en torno al 13% en la MASb de Torrelaguna (Figura 4). Se observa cierta disparidad en los datos en función de la región climática dentro de la península, así como en función del tipo de acuífero estudiado. Sin embargo, se observa que la tendencia general, independientemente de estos factores, es al descenso en las reservas acuíferas como consecuencia del cambio climático.

FIGURA 4. Descensos estimados en las reservas



Fuente: Elaboración propia.

En el caso del humedal piloto, en cuanto a la afección del cambio climático sobre los recursos, se observan descensos continuados del caudal del manantial que podrían llegar a comprometer la existencia del mismo a partir de mediados de siglo y por tanto del humedal asociado. En este caso se hace necesario continuar con los registros del caudal del manantial que alimenta la laguna ya que son datos clave para evaluar los efectos del cambio climático sobre el humedal. En cuanto a la afección del cambio climático sobre las reservas del acuífero asociado al humedal se estiman unos descensos en los niveles piezométricos a finales de siglo, estimados en torno a los 15 metros.

Los efectos negativos evaluados en este estudio causados por el cambio climático sobre las aguas subterráneas presentan tres vertientes que suponen una afección social: medioambiental, reservas hídricas y económico-energéticas.

Los descensos de los niveles piezométricos llevarán asociados efectos sobre los ecosistemas húmedos, por disminución de su superficie. Además, el impacto que el cambio climático pueda tener en humedales climático-dependientes podría condicionar las características óptimas para los ecosistemas que habitan en ellos, así como sobre la fauna y flora que los acompañan, afectando a todos los aspectos culturales, recreativos y socioeconómicos asociados.

5. Conclusiones

Los cambios en los patrones pluviométricos con intensificación de los episodios de lluvias torrenciales, así como los ascensos de temperatura, provocan variaciones en la disponibilidad de agua en el ciclo hídrico. En concreto la torrencialidad de las lluvias provoca fenómenos de escorrentía que además pueden llevar asociados procesos de pérdida de la capa superficial del terreno. Por otro lado, a los incrementos de temperatura le siguen incrementos de evapotranspiración potencial, especialmente importantes durante los meses de la estación seca, época en la que las disponibilidades de agua en el suelo ya son reducidas. Para poder evaluar dichos fenómenos de torrencialidad con mayor precisión, sería recomendable llevar a cabo estudios futuros con datos diarios de niveles piezométricos, ya que es dónde se pueden observar las variaciones debidas a la torrencialidad de la precipitación. Sin embargo, a pesar del esfuerzo de las distintas Confederaciones Hidrográficas por instrumentalizar los piezómetros para obtener mediciones de nivel de manera continua, a día de hoy existen pocos piezómetros monitorizados.

El posible descenso en las reservas hídricas de agua subterránea, por descenso del grado de llenado, es un dato muy importante a considerar a efectos de planificación hidrológica, teniendo en cuenta los posibles efectos no sólo cuantitativos sino cualitativos. En este sentido, cabe destacar la importancia de la utilización conjunta aguas superficiales-subterráneas y la viabilidad de aplicación en cada uno de los casos concretos de la recarga artificial de acuíferos.

En relación con el aspecto económico-energético, conocer la evolución de los niveles piezométricos es fundamental, pues el coste energético del metro cúbico de agua bombeada es directamente proporcional a la altura de elevación de la misma. Es preciso conocer cómo se produciría esta evolución a los efectos oportunos de optimización de recursos y de inversiones. También, en algunos casos, los descensos en los acuíferos por debajo de las profundidades finales de perforación de los pozos pueden suponer incluso el secado de los pozos de explotación afectados, circunstancia que es preciso conocer con antelación para el diseño de las futuras captaciones.

Por último, destacar que la metodología desarrollada para la realización de este estudio estimativo es un método simple y de muy bajo coste que, utilizando herramientas matemáticas con formulación analítica, permite, como modelo simple agregado, obtener resultados de partida que incluso, en su caso, pueden servir de base para modelizaciones numéricas más caras y sofisticadas con metodología de modelización con parámetros distribuidos en el caso de que ello sea necesario.

Además, esta metodología puede ser extensible a otras zonas geográficas, siendo necesario el estudio hidrogeológico de detalle que atienda las particularidades concretas de los acuíferos y masas de agua subterránea implicadas.

6. Bibliografía

BENTSEN, M., OLIVIÈ, D., SELAND, Ø., TONIAZZO, T., GJERMUNDSEN, A., GRAFF, L., DEBERNARD, J., GUPTA, A., HE, Y., KIRKEVÅG, A., SCHWINGER, J., TJIPUTRA, J., AAS, K., BETHKE, I., FAN, Y., GRIESFELLER, J., GRINI, A., GUO, C., ILICAK, M., KARSET, I., LANDGREN, O., LIAKKA, J., MOSEID, K., NUMMELIN, A., SPENSBERGER, C., TANG, H., ZHANG, Z., HEINZE, C., IVERSEN, T., SCHULZ, M. (2019). *NCC NorESM2-MM model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version YYYYMMDD[1]*. Earth System Grid Federation. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.608.

BI, D., DIX, M., MARSLAND, S., O'FARRELL, S., SULLIVAN, A., BODMAN, R., LAW, R., HARMAN, I., SRBINOVSKY, J., RASHID, H., DOBROHOTOFF, P., MACKALLAH, C., YAN, H., HIRST, A., SAVITA, A., DIAS, F. B., WOODHOUSE, M., FIEDLER, R., HEERDEGEN, A. (2020). Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science* 70: 225-251. <https://doi.org/10.1071/ES19040>

BOLZICO, J. (1988). Precipitaciones y niveles freáticos, relación y evolución en el tiempo. *Serie Investigación y Desarrollo. Publ. UNL. FICH. (I+D)*. 19 pp.

BRUNET, M., CASADO, M. J., DE CASTRO, M., GALÁN, P., LÓPEZ, J.A., MARTÍN, J.M., PASTOR, A., PETISCO, E., RAMOS, P., RIBALAYGUA, J., RODRÍGUEZ, E., SANZ, I., TORRES, L. (2008). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Spanish Meteorology Agency (AEMET).

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR (2018). *Informe de evolución de niveles piezométricos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Año hidrológico 2017/18*. España: MAGRAMA. Recuperado de https://www.chj.es/es-es/medioambiente/redescontrol/Documents/Piezometr%C3%ADa/InformePiezometria_CHJ_2018_19.pdf

CUSTODIO, E., LLAMAS, R. ET AL. (1976). *Hidrología Subterránea*. Barcelona, España: Ediciones Omega, pp. 529-531.

CUSTODIO, E. (2017). *Aspectos hidrológicos, ambientales, económicos, sociales y éticos del consumo de reservas de agua subterránea en España: Minería del agua subterránea en España*. Iniciativa Digital Politécnica, Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.

DÍAZ, E., DUARTE, O., WILSON, M., VALENTI, R. y BENAVIDEZ, R. (2000). Relación precipitaciones-niveles piezométricos en el borde oriental de la provincia Entre Ríos. Argentina. In: *1st Joint World Congress on Groundwater*. Aguas Subterráneas. Recuperado de <https://aguassubterraneeas.abas.org/asubterraneeas/article/view/24093/16122>

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2006). *Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 4: Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico*. Madrid, España: DGA, IGME.

EC-EARTH CONSORTIUM (EC-EARTH) (2019). *EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 Scenario MIP*. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.727

FORNARI, E. M. (2011). *Relaciones entre los niveles freáticos y variables meteorológicas en un área de llanura*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Recuperado de <http://docplayer.es/8626118-Relaciones-entre-los-niveles-freaticos-y-variables-hidrometeorologicas-en-un-area-de-llanura.html>

GOOD, P., SELLAR, A., TANG, Y., RUMBOLD, S., ELLIS, R., KELLEY, D., KUHNBRODT, T. (2019). *MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. 1j*. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.6339.

GROUNDWATERS INDICATORS GROUP (2004). *Development of groundwaters indicators for second edition of the World Water Development Report*. ThirdVersion (Draft). Paris.

LÓPEZ GETA, J. A. (2008). Cambio climático, aguas subterráneas y ecosistemas. *El cambio Climático y sus consecuencias en el Sector del Agua*, 243-268.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (MAGRAMA) (2015). *Plan Hidrológico de Cuenca (2015-2021)*. España, Madrid: MAGRAMA.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MIMAN) (2005). *Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto Efectos del Cambio Climático en España (ECCE)*. España, Madrid: Ministerio de Medio Ambiente. 846 pp. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/evaluacion_preliminar_impactos_2005_tcm30-178491.pdf

MOYA, B., HERNÁNDEZ, A. y BORRELL, H. (2005). Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (37), 127-132. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/176/17612746005.pdf>

PEANO, D., LOVATO, T. y MATERIA, S. (2020). *CMCC CMCC-ESM2 model output prepared for CMIP6 LS3MIP. Version YYYYMMDD[1]*. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13165>

PERNÍA, J. M. y CORRAL, M. M. (2000). Llenado de los acuíferos. Propuesta de un indicador. En *V Congreso Geológico de España*. Alicante. Geotemas Volumen 2: 843-853. Recuperado de https://sge.usal.es/archivos/GEO_TEMAS/Geotemas1_2sge.pdf

PERNÍA, J. M., LAMBÁN, L. J. y MOLINERO, A. (2005). Indicadores e índices sobre el estado cuantitativo de las aguas subterráneas en función del nivel piezométrico. Aplicación al acuífero de la Sierra de Estepa. En: LÓPEZ-GETA, J. A., RUBIO, J. C. y MARTÍN MACHUCA, M. (Eds.), *VI Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. pp 843-853. Recuperado de <https://docplayer.es/29094653-Antecedentes-palabras-clave-indicadores-indices-niveles-piezometricos-aguas-subterranas.html>

PERNÍA, J. M. y FORNÉS, J. M. (2009). Cambio climático y agua subterránea. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), 172-178. I.S.S.N.: 1132-9157. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/199866/267284>

RIBALAYGUA, J., TORRES, L., PÓRTOLES, J., MONJO, R., GAITÁN, E. y PINO, M. R. (2013). Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, 111: DOI 10.1007/s00704-013-0836-x.

SCHMIDL, J., GOODNESS, C.M., FREI, C., HAYLOCK, M.R., HUNDECHA, Y., RIBALAYGUA, J., SCHMITH, T. (2007). Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 112, D04105, doi:10.1029/2005JD007026.

SEFERIAN, R. (2019). *CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP hist-1950HC. Version YYYYMMDD[1]*. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.4041.

SWART, N. C., COLE, J. N. S., KHARIN, V. V., LAZARE, M., SCINOCCA, J. F., GILLET, N. P., ANSTEY, J., ARORA, V., CHRISTIAN, J. R., HANNA, S., JIAO, Y., LEE, W. G., MAJAESS, F., SAENKO, O. A., SEILER, C., SEINEN, C., SHAO, A., SIGMOND, M., SOLHEIM, L., VON SALZEN, K., YANG, D., WINTER, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3), *Geosci. Model Dev.*, 12, 4823–4873, DOI:10.5194/gmd-12-4823-2019.

TAYLOR, K. E., STOFFER, R. J. y MEEHL, G. A. (2012). *An overview of CMIP5 and the experiment design*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1

VAN DER LINDEN, P., MITCHELL, J. F. B. (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, UK. 160pp. (http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf)

VON, J., PUTRASAHAN, D., LOHMANN, K., GUTJAHN, O., JUNGCLAUS, J., BITTNER, M., HAAK, H., WIENERS, K., GIORGETTA, M., REICK, C., ESCH, M., GAYLER, V., DE VRESE, P., RADDATZ, T., MAURITSEN, T., BEHRENS, J., BROVKNIN, V., CLAUSSEN, M., CRUEGER, T., FAST, I., FIEDLER, S., HAGEMANN, S., HOHENEGGER, C., JAHNS, T., KLOSTER, S., KINNE, S., LASSLOP, G., KORNBUEH, L., MAROTZKE, J., MATEI, D., MERANER, K., MIKOLAJEWICZ, U., MODALI, K., MÜLLER, W., NABEL, J., NOTZ, D., PETERS, K., PINCUS, R., POHLMANN, H., PONGRATZ, J., RAST, S., SCHMIDT, H., SCHNUR, R., SCHULZWEIDA, U., SIX, K., STEVENS, B., VOIGT, A., ROECKNER, E. (2017). *MPI-M MPIESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 HighResMIP. Version YYYYMMDD[1]*. Earth System Grid Federation. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.762.

WU, T., LU, Y., FANG, Y., XIN, X., LI, L., LI, W., JIE, W., ZHANG, J., LIU, Y., ZHANG, L., ZHANG, F., ZHANG, Y., WU, F., LI, J., CHU, M., WANG, Z., SHI, X., LIU, X., WEI, M., HUANG, A., ZHANG, Y., LIU, X. (2019). The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 12, 1573–1600. DOI:10.5194/gmd-12-1573-2019, 2019.

YUKIMOTO, S., KOSHIRO, T., KAWAI, H., OSHIMA, N., YOSHIDA, K., URAKAWA, S., TSUJINO, H., DEUSHI, M., TANAKA, T., HOSAKA, M., YOSHIMURA, H., SHINDO, E., MIZUTA, R., ISHII, M., OBATA, A., ADACHI, Y. (2019). *MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP*. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.621.