

CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA SUBTERRÁNEA

Climate change and groundwater

José M^a Pernía Llera y Juan M^a Fornés Azcoiti (*)

RESUMEN

En los últimos años, se han acumulado ciertas evidencias de cambio climático y de sus impactos sobre diversos sectores socioeconómicos y sistemas naturales en todo el planeta, que afectan a la disponibilidad de los recursos hídricos y, por tanto, modifican la tasa de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos. Los nuevos escenarios que se prevén como consecuencia del cambio climático en algunos países como España (incremento de las temperaturas, disminución y mayor concentración de las precipitaciones, y aumento del nivel del mar), van a llevar consigo una serie de alteraciones tanto en los procesos incluidos en la fase subterránea del ciclo hidrológico, como en los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas. Por ello, se analiza cómo podría afectar el cambio climático a las aguas subterráneas en las sucesivas etapas que integran dicha fase subterránea, así como en los ecosistemas naturales asociados.

ABSTRACT

In the last years, some evidences of climate change and their impacts on different socio-economic sectors and natural systems in the worldwide has been observed. These climate change evidences affect to water resources availability and, therefore, they modify surface runoff regime and aquifer recharge. The foreseen new scenarios in some countries, like Spain, as a consequence of climate change (increase of temperatures, decrease and shifting rainfall patterns and rising sea levels) are going to produce several alterations, either in the processes included in the groundwater phase of the hydrological cycle, or in the associated groundwater-dependent ecosystems. For this reason, this chapter analyzes how climate change could affect to groundwater in the successive stage of the groundwater phase, and to associated natural ecosystems.

Palabras clave: aguas subterráneas, cambio climático, mitigación.

Keywords: Groundwater, climate change, mitigation.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea, por su naturaleza y abundancia, constituye un recurso estratégico frente a la previsible disminución de los recursos hídricos superficiales, en función de la profundidad a la que se encuentre el acuífero, el tipo de material por el que circula, y su ubicación geográfica. Existen una serie de factores que hacen muy asequible su utilización, como por ejemplo su amplia distribución geográfica, que habitualmente las sitúa próximas al centro de consumo; su fácil adaptación a la demanda hídrica, ya que pueden satisfacer, de un modo rápido y eficaz, excesos puntuales en su demanda; su uniformidad en la calidad química; y su protección ante la agresión de diferentes agentes. Sin embargo, esta protección tiene sus limitaciones, y las características de las aguas subterráneas pueden verse alteradas por efectos que sean persistentes en el tiempo, como serían los originados por el cambio climático.

Los nuevos escenarios de cambio climático introducen algunas incertidumbres de cara al futuro, debido fundamentalmente al aumento de las temperaturas, y a la variación y mayor concentración de

las precipitaciones, que van a influir tanto en el volumen de los recursos hídricos subterráneos como en su calidad. Así, cabría preguntarse cómo van a influir estos factores en la generación de escorrentía superficial y en la infiltración del agua en los acuíferos. Por otra parte y en términos generales, parece que el aumento de la evapotranspiración afectará especialmente a aquellos acuíferos que tengan el nivel freático próximo a la superficie del terreno. También la demanda hídrica se prevé que sea mayor, debido al calor y a la menor disponibilidad de agua superficial, circunstancias que se ilustran en la Figura 1.

Como consecuencia lógica, el efecto más inmediato consistirá en un descenso generalizado del agua subterránea en el acuífero que conllevaría, según algunos autores (López-Geta, 2008), una menor disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, una modificación de su composición físico-química, distinta forma de manifestarse en el exterior y una alteración de la interrelación con los ecosistemas acuáticos. Por otra parte, podría aumentar la desertificación de los suelos, debido a la mayor frecuencia

(*) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. jm.pernia@igme.es y jm.fornes@igme.es



Fig. 1. Influencia de las variaciones de temperatura y precipitación en las aguas subterráneas con motivo del cambio climático (Pernía y Fornés, 2008).

de incendios forestales y a la pérdida de fertilidad por salinización y erosión. La desertificación amenaza ya a más del 30% del territorio nacional, especialmente en el sureste peninsular y en Canarias.

El contenido de este capítulo procede en su mayor parte de Pernía y Fornés (2008).

IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El consumo de agua en el mundo casi se ha duplicado en los últimos 50 años. Se estima que de los 4.000 km³/año de agua que utiliza la humanidad, entre 600 y 700 km³/año corresponden a las aguas subterráneas, es decir, entre el 15 y el 18% del agua total (Figura 2). Según la UNESCO (2009), los 10 países que utilizan más agua del mundo son India, China, Estados Unidos, Pakistán, Japón, Tailandia, Indonesia, Bangladesh, México y Rusia. Según el mismo organismo, la mitad de las megalópolis del planeta (Mexico DF, Teherán, Shanghai, Lima, Karachi, Dhaka, Manila, El Cairo, Lusaka, Londres, Beijing, etc.), y miles de otras ciudades de tamaño medio en todos los continentes, dependen de las aguas subterráneas o consumen un gran volumen de las mismas. Por lo general, las pequeñas ciudades y las comunidades rurales, utilizan con frecuencia este recurso subterráneo para su abastecimiento doméstico.

Por citar sólo algunos ejemplos, en Argentina el 50% del agua de uso doméstico es de origen subterráneo, y algo similar sucede con los usos agrícolas e industriales; en Chile, más del 40% del volumen total de agua para uso doméstico en zonas urbanas proviene del agua subterránea, mientras que en zonas rurales asciende al 76%; en México, el agua subterránea sostiene el riego de 2 millones de ha. (un tercio de la superficie total en regadío), suministra cerca del 70% del volumen de agua que requieren las ciudades para uso urbano (60 millones de habitantes), abastece a la mayoría de las industrias, y casi la totalidad de la demanda de agua de la población rural.

FASE SUBTERRÁNEA DEL CICLO HIDROLÓGICO

Estos nuevos escenarios definidos por el Grupo de Expertos del IPCC 2007 (IPCC, 2008), traen consigo cambios importantes en la precipitación y en la temperatura; cambios que sentarán las bases de partida para que se puedan evaluar los efectos sobre las aguas subterráneas. Habrá que tener en cuenta cómo va a afectar el cambio climático en los diferentes procesos que constituyen la fase subterránea del ciclo hidrológico, y en los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas. Para comprender mejor los efectos del cambio climático en los distin-

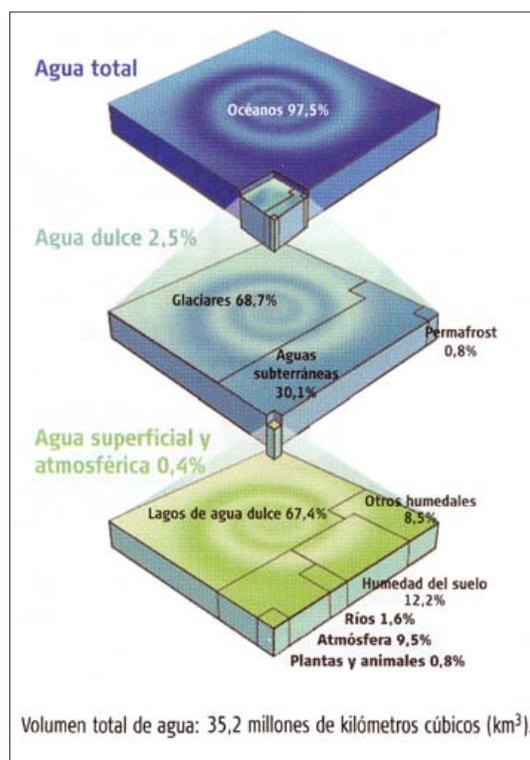


Fig. 2. Distribución global del agua en el mundo. (Shiklomanov y Rodda, 2003).

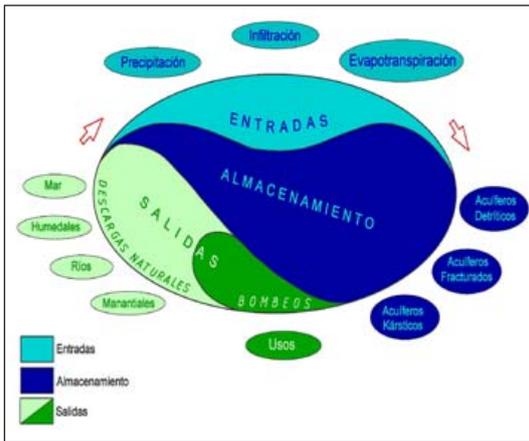


Fig. 3. Fase subterránea del ciclo hidrológico (Periá y Fornés, 2008).

tos procesos que integran dicha fase, se van a agrupar en las siguientes tres etapas: entradas, almacenamiento y salidas (Figura 3):

Entradas

La entrada de agua en los acuíferos (recarga), va a depender fundamentalmente de la precipitación y la evapotranspiración. La infiltración de agua que se produzca, dependerá también del tipo de suelo y de las características de la zona no saturada. En esta última, intervienen múltiples factores condicionantes que van a regular el tránsito del agua hacia la zona saturada. Parece que, como consecuencia del incremento de las temperaturas, de las variaciones en el régimen de lluvias, y del aumento de la demanda hídrica con motivo del cambio climático, los niveles freáticos van a experimentar un descenso generalizado en muchos acuíferos, por lo que la zona no saturada aumentará su espesor e irá adquiriendo cada vez más importancia como reactor químico que potencia la fijación de sustancias y depura el agua en tránsito. Los posibles efectos que podrían desencadenarse como consecuencia del cambio climático serían los siguientes:

Precipitación

Los modelos regionales indican que a lo largo del presente siglo, las precipitaciones en los países del arco mediterráneo serán en menor número pero más concentradas. Esta tendencia general, sujeta a un elevado grado de incertidumbre, no excluye que haya áreas (variabilidad espacial) y estaciones (variabilidad temporal) en las que se estime su incremento, tanto en los modelos globales como en los regionales. En España se prevé, por tanto, una mayor intensificación de los riesgos asociados a fenómenos climáticos extremos como las inundaciones y, muy especialmente, las sequías. Además de afectar a la cantidad de agua que alcanza la superficie del terreno en forma de lluvia o nieve, el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera influirá también en la concentración de CO₂ que se encuentra disuelto en el agua de lluvia.

Evapotranspiración

El aumento de la temperatura va a tener importantes consecuencias en las aguas subterráneas próximas a la superficie del terreno, produciéndose una disminución del recurso hídrico en el acuífero que, además, podría originar colapsos o subsidencias en el terreno, y problemas geotécnicos en edificios de poblaciones urbanas. Las características del suelo y el tipo de cobertura vegetal, desempeñarían un papel esencial en este proceso natural. Por otra parte, el funcionamiento hídrico de los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas (humedales, ríos, manantiales, etc.), podría verse modificado también por la disminución del nivel del agua subterránea. Las aguas subterráneas que no están próximas a la superficie terrestre no se verán afectadas por el aumento de la evapotranspiración.

Infiltración

Va a depender directamente de la precipitación y de la evapotranspiración y, por tanto, se prevé una disminución del volumen de agua que podría infiltrarse en el acuífero. La posible variación del régimen de lluvias a favor de una mayor concentración de éstas, modificará el proceso de infiltración del agua en el terreno y el proceso de generación de escorrentía superficial. Las variaciones en el contenido de carbono orgánico del suelo (por cada aumento de temperatura media de un grado, la pérdida de carbono orgánico en el suelo se estima entre el 6 y 7%), pueden afectar a la composición química del agua que circula a través de la zona no saturada hasta alcanzar el nivel de las aguas subterráneas.

Almacenamiento

La recarga de agua en el acuífero y las extracciones de agua subterránea que se produzcan, van a condicionar el almacenamiento de agua en los acuíferos. Una de las características más importantes de estos es su gran capacidad de almacenamiento de agua subterránea y, por tanto, el papel estratégico que pueden desempeñar en la gestión hídrica, especialmente en los periodos de escasez. Existen una serie de factores que potencian su utilización entre los que destacan: su ubicación geográfica, que las sitúa próximas al centro de consumo; su fácil adaptación a la demanda hídrica, ya que pueden satisfacer de modo rápido y eficaz excesos puntuales en su demanda; su uniformidad en la calidad; y su protección ante la agresión de diferentes agentes. Este almacenamiento está en función del tipo de acuífero de que se trate según su litología:

Acuíferos detríticos

Se trata de formaciones geológicas constituidas por la acumulación de partículas transportadas por la gravedad, viento, agua o hielo; suelen ser arenas y gravas (Figura 4). Por lo general, son de edades geológicamente recientes. Debido a sus buenas condiciones hidrogeológicas, suministran notables cantidades de agua. El agua subterránea circula con mucha lentitud a través de ellos, favoreciendo tanto

la gestión como su aprovechamiento y protección. Ejemplos de este tipo de acuíferos serían, entre otros muchos, los depósitos fluvio-glaciares y aluviales que rellenan las depresiones de las zonas de los valles interandinos y altoandinos en Perú, o en España, el acuífero terciario detrítico de Madrid, o la zona de marismas del acuífero Almonte-Marismas (Huelva y Sevilla) en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana. Los acuíferos aluviales constituyen un tipo de acuíferos detríticos muy sensibles a las variaciones del nivel del agua de los ríos y, por tanto, cualquier afección que se produzca en ellos repercutirá en la cantidad y calidad de sus aguas subterráneas; algo similar ocurrirá en los acuíferos costeros con el aumento del nivel del mar. La demanda hídrica en zonas próximas a los ríos y a la costa, no hará sino aumentar con el cambio climático y, por tanto, también las extracciones de agua subterránea. Así por ejemplo, algunos acuíferos costeros en Colombia no han sido capaces de aportar las cada vez más exigentes cantidades de agua demandadas por las poblaciones en crecimiento, con la consecuente aparición de fenómenos de intrusión marina.

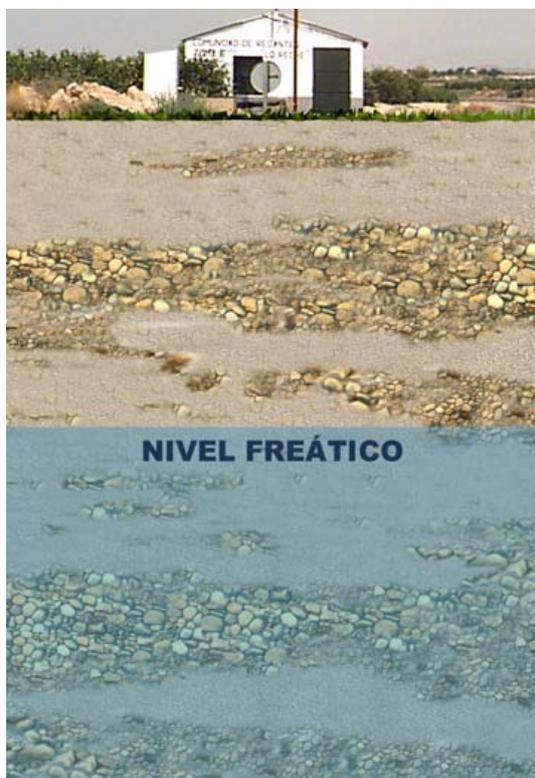


Fig. 4. Perfil de un acuífero detrítico (López-Geta et al., 2001).

Acuíferos fracturados

Comprenden aquellas rocas ígneas y metamórficas que se encuentran fracturadas por fallas y diaclasas, que permiten una apreciable circulación de agua (Figura 5). Por lo general, las captaciones de agua subterránea en este tipo de acuíferos, no suelen ser de gran profundidad y los caudales que su-

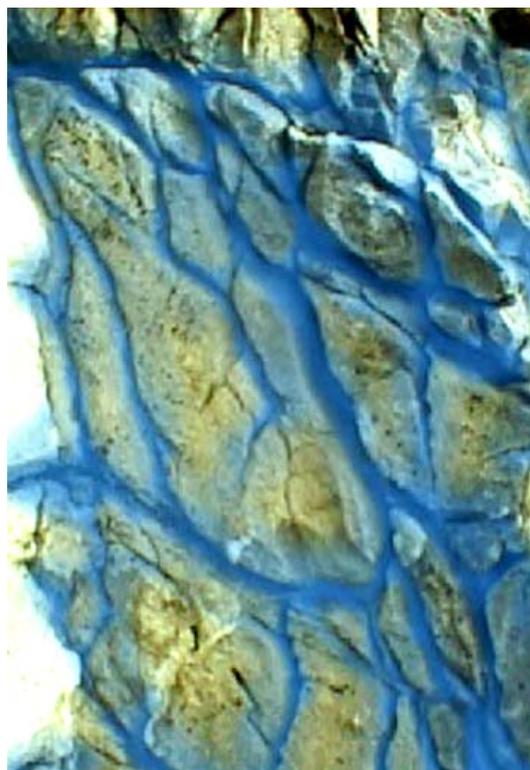


Fig. 5. Perfil de un acuífero fracturado (López-Geta et al., 2001).

ministran son más bien pequeños, por lo que, si disminuyen las precipitaciones con el cambio climático, no es difícil que descienda el caudal o que incluso sea nulo. Son acuíferos con muy poca inercia y, por tanto, no ofrecen mucha garantía como almacén de grandes volúmenes de agua subterránea. Es frecuente que se utilicen para abastecimiento a pequeños núcleos de población y en el ámbito rural. Aproximadamente el 50% del territorio brasileño está constituido por formaciones cristalinas precámbricas que se comportan como acuíferos fracturados típicos (ocupan 4.380.00 km²); cerca del 20% del territorio colombiano está formado por rocas ígneas y metamórficas fracturadas; el 60% de los acuíferos de Uruguay son de tipo fisurado y, en su mayoría, de baja productividad (el consumo de agua subterránea en el país representa entre el 0,2 y el 1% de la recarga). En España este tipo de acuíferos abunda en el noroeste peninsular y en el Sistema Central.

Acuíferos kársticos

El aumento de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, podría influir decisivamente en los fenómenos de disolución de los carbonatos y, por tanto, en la formación de sistemas kársticos (Figura 6). Por otra parte, la mayor concentración de las precipitaciones que se prevé con el cambio climático, podría favorecer descargas rápidas y más caudalosas de las aguas subterráneas en surgencias naturales de origen kárstico, disminuyendo e incluso llegando a desaparecer poco tiempo después. En España, este tipo de acuíferos –carbonáticos y eva-

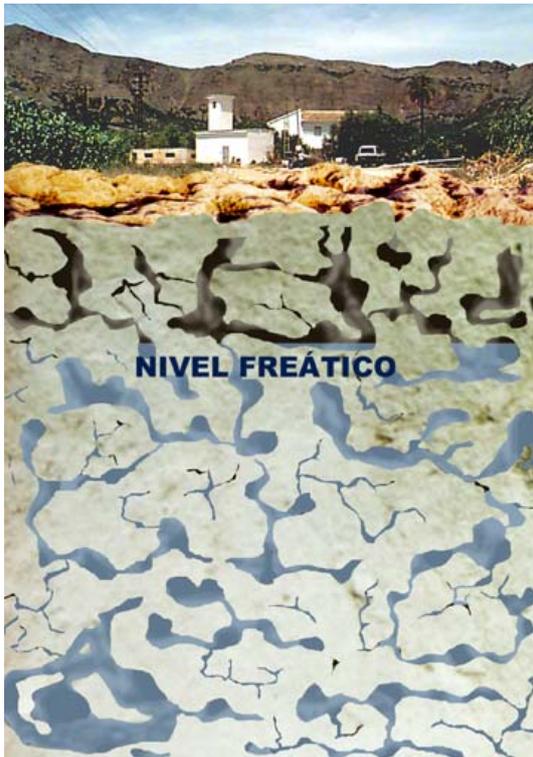


Fig. 6. Perfil de un acuífero kárstico (López-Geta *et al.*, 2001).

poríticos fundamentalmente—, aflora en el sector oriental y meridional de la península e Islas Baleares. En Perú, existen afloramientos mesozoicos muy abundantes de unidades carbonatadas karstificadas a lo largo de la cordillera andina; en República Dominicana, el 42% del territorio está formado por rocas carbonatadas.

Salidas

Una disminución generalizada de la entrada y almacenamiento de las aguas subterráneas, llevaría consigo también una disminución de las descargas naturales de éstas, afectando por tanto, a los ecosistemas que dependen de las aguas subterráneas. Las salidas del agua subterránea pueden producirse por la acción del hombre mediante bombeos fundamentalmente, y de modo natural a través de manantiales, ríos, humedales y directamente al mar. Respecto a estos últimos, los efectos del cambio climático serían:

Manantiales

La salida natural se mantiene mientras la surgencia está por encima de la cota del terreno; cuando se sitúa por debajo, el manantial dejará de manar. Para que el agua subterránea vuelva a salir, tendrá que recuperar esa cota tras un periodo más o menos prolongado de lluvia, o artificialmente mediante recarga con aportaciones externas. Por tanto, la previsible disminución generalizada de las precipitaciones podría propiciar que determinados manantiales permanentes pasen a estacionales



Fig. 7. Manantial de Ojos de Moya (Moya, Cuenca). Foto: Marc Martínez Parra.

e incluso desaparezcan. Algunos manantiales tienen una notable importancia estratégica ya que permiten atender el suministro de agua potable de gran número de poblaciones o contribuyen al regadío de muchas zonas, además de ser el origen de cursos de agua más o menos permanentes, humedales, u otros ecosistemas asociados (Figura 7).

Ríos

El origen del agua de la mayor parte de los ríos proviene tanto de la escorrentía superficial como de la descarga de los acuíferos. Los caudales de los ríos suelen ser máximos al final del invierno o principios de la primavera, cuando los acuíferos están recargados y, por tanto, con los niveles freáticos altos. Desde finales de la primavera hasta bien entrado el otoño, los niveles descienden progresivamente; estos descensos de niveles pueden llegar a producir que cesen las descargas, con la consiguiente desecación de las corrientes fluviales. Este proceso natural se verá acentuado con el cambio climático. Sin embargo, en las zonas de alta montaña, debido al retroceso de los glaciares, se favorece la recarga de los recursos hídricos subterráneos gracias al agua del deshielo y a las precipitaciones pluviales. Este hecho se está produciendo, por ejemplo, en acuíferos Andinos de Perú (Figura 8). Además, existe una fauna y flora relacionada con la ribera de los ríos o en cursos de agua secos, donde el nivel freático es somero. Un ejemplo típico lo constituye el bosque en galería, formado por olmos, alisos, chopos y sauces. Parece previsible que



Fig. 8. Quelccaya (Perú), el glaciar tropical más grande del mundo, retrocedió 1.100 m entre 1978 (foto izquierda) y 2002 (foto derecha). Foto: L. Thompson.

al descender los niveles freáticos, gran parte de esta fauna y flora característica desaparecerá, dejando paso a otras especies diferentes.

Humedales

Los humedales que dependen de las aguas subterráneas, con o sin aportes de agua superficial, son ecosistemas importantes y productivos que se caracterizan por ser menos fluctuantes que aquellos que sólo dependen del agua superficial. Además, juegan un papel muy relevante en el mantenimiento y conservación de la biodiversidad (Figura 9). La disminución de los recursos hídricos subterráneos puede modificar las condiciones hidrodinámicas del humedal, reducir su superficie e incluso provocar su desaparición. Presentan una vegetación típica que refleja la persistencia de la inundación y el grado de mineralización del agua; a su vez, la vegetación va a condicionar el tipo de fauna. Por otra parte, son ecosistemas muy productivos, que pueden acumular una concentración de carbono por hectárea cinco veces mayor a la que puede haber, en la misma extensión, en un bosque tropical. Por tanto, en el caso de que desaparecieran por efecto del cambio climático, constituirían un nuevo foco de emisión de carbono a la atmósfera. En España, a lo largo del siglo pasado, han desaparecido el 60% de los humedales.



Fig. 9. Los Esteros del Iberá (Provincia de Corrientes, Argentina), ocupan una superficie de 1.400.000 ha, y constituyen el segundo humedal más grande de Sudamérica. Foto: Casa de la Provincia de Corrientes (Argentina).

Mar

El aumento del nivel del mar producirá una modificación de la interfaz agua dulce – agua salada a favor de una intrusión marina hacia el continente. Este hecho originará un aumento del nivel freático y una degradación de la calidad química del agua subterránea, así como la variación de la disponibilidad de hábitats para muchas especies que se reproducen o alimentan en zonas costeras bajas, que forman humedales costeros (Figura 10). Los ecosistemas más vulnerables serán las playas, los deltas y los humedales litorales. La extracción de aguas subterráneas para abastecimiento de núcleos de población, podría aumentar en estas zonas costeras favoreciendo la intrusión de agua de mar. En los núcleos urbanos próximos al mar, las edificaciones pueden sufrir problemas geotécnicos importantes. Como término general, cada centímetro que aumenta el nivel del mar en la vertical, supone un avance marino de un metro en la horizontal hacia el continente. En España, las áreas más afectadas, según el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM, 2005), serían las playas del Cantábrico, y buena parte de las zonas bajas costeras que pueden estar edificadas (delta del Ebro, delta del Llobregat, Manga del Mar Menor, costa de Doñana, etc.).



Fig. 10. Parque Nacional de Doñana (España).

CONCLUSIONES

Los previsibles efectos que el cambio climático puede producir en los recursos hídricos, y especialmente en las aguas subterráneas, hacen necesario una serie de investigaciones, tanto relacionadas con los diferentes procesos que integran la fase subterránea del ciclo hidrológico, como con los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas (manantiales, ríos, humedales y mar abierto). Estas investigaciones deberán tener en cuenta los nuevos escenarios producidos por el cambio climático de aumento generalizado de las temperaturas, disminución y mayor concentración de las precipitaciones, y aumento del nivel del mar. La comunidad científica tiene una especial responsabilidad ante la sociedad de hacer frente a este gran reto que supone el cambio climático, especialmente en lo que se refiere a los recursos hídricos subterráneos.

BIBLIOGRAFÍA

- IPCC (2008). *Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 73 pp.
- López-Geta, J.A. (2008). Cambio climático, aguas subterráneas y ecosistemas. En: *El Cambio Climático en España y sus consecuencias en el Sector del Agua*. Universidad Rey Juan Carlos y Aqualia Gestión Integral del Agua, S.A. Madrid, 243-268.
- López-Geta, J.A., Fornés, J.M., Ramos, G. y Villarroya, F. (2001). *Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo*. Instituto Geológico y Minero de España, y Fundación Marcelino Botín. Madrid, 94 pp.
- MIMAM (2005). *Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Proyecto Efectos del Cambio Climático en España (EC-CE). Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 840 pp.
- Pernía, J.M. y Fornés, J.M. (2008). *Cambio climático y agua subterránea. Visión para los próximos decenios*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 79 pp.
- Shiklomanov, I.A. y Rodda, J.C. (2003). *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Cambridge University Press.
- UNESCO (2009). *Water in a changing World*. The United Nations World Water Development. Report 3. World Water Assessment Programme, 318 pp. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 24 de marzo de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de septiembre de 2009.