

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE LA GALERA

B. Pisani¹, J. Samper¹, L. Ribeiro², Y. Fakir³, T. Stigter²

¹ Escuela de Caminos, Universidad de A Coruña, España, e-mail: bpisani@udc.es, jsamper@udc.es

² Geo-Systems Centre/CVRM, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, e-mail: luis.ribeiro@ist.utl.pt; tiber.stigter@ist.utl.pt

³ Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Marruecos, e-mail: fakir@ucam.ac.ma

RESUMEN. En el proyecto CLIMWAT se ha desarrollado un enfoque multi-modelo que se ha aplicado a tres cuencas mediterráneas para evaluar los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos y en el flujo subterráneo que alimenta a los ecosistemas dependientes. Se han evaluado los cambios en el balance hídrico, los niveles piezométricos y el flujo subterráneo y sus posibles impactos en las zonas húmedas asociadas en las tres cuencas piloto usando la misma metodología. En este trabajo se describe el modelo del balance hídrico de la Plana de la Galera en el Delta del Ebro. Se presenta la situación actual y se describen los cambios previstos para varios escenarios de cambio climático. Se hace especial hincapié en la recarga de los acuíferos que transporta sales y pesticidas provenientes de los cultivos a través de una potente zona no saturada de decenas de metros. La metodología desarrollada en este proyecto será de interés para otros grupos de investigación y para los organismos encargados de la gestión de los recursos hídricos para la explotación sostenible de los acuíferos.

ABSTRACT. A multi-model methodology has been developed within the framework of the European CLIMWAT project to evaluate the potential impacts of climate change on the water resources of three Mediterranean coastal basins. Special emphasis has been given to aquifer recharge, groundwater flow and their associated ecosystems. Changes in temperature and rainfall, the water balance and the groundwater flow and their impacts on the associated wetlands have been assessed using the same methodology in the three basins. This paper describes the water balance model of La Plana de la Galera near Delta del Ebro. We present the model for the current conditions and the evaluation of the expected changes for several climate change scenarios. Special emphasis is given to aquifer recharge which carries salts and pesticides from the soil through a thick unsaturated zone. The methodology developed in this project will be most useful for other research groups and Water Authorities for the planning of the sustainable exploitation of groundwater resources.

1.- Introducción

La creciente evidencia del cambio climático motiva la necesidad de identificar sus posibles impactos, cuantificarlos y planificar la gestión de los recursos para

minimizar sus efectos negativos (Candela et al, 2009; Green et al, 2007). En particular, los recursos subterráneos y los ecosistemas que de ellos dependen se verán afectados por el cambio climático. La Directiva Marco del Agua (WFD 2000/60/EC) establece que los recursos subterráneos no deben ser explotados de manera que se perjudique de forma significativa a los ecosistemas dependientes.

El proyecto CLIMWAT forma parte del programa CIRCLE-MED (coordinación de la investigación de los impactos del cambio climático en Europa, grupo mediterráneo) del espacio europeo de investigación ERA-NET (Stigter et al, 2010). El proyecto en el que han participado grupos de investigación de Portugal, España y Marruecos tenía como objetivo fundamental evaluar los posibles impactos del cambio climático en acuíferos costeros y en los ecosistemas asociados, aportando resultados y una metodología que posteriormente se pueda aplicar a otras zonas.

Se seleccionaron tres acuíferos, uno en cada uno de los tres países participantes, para contrastar la metodología y los resultados y analizar la posibilidad de extrapolarlos a otras zonas mediterráneas.

Las tareas del proyecto consistieron en: 1) La estimación de las condiciones climáticas para 4 escenarios futuros, 2) El cálculo del balance hídrico para las condiciones actuales y en los escenarios futuros, 3) La modelización del flujo subterráneo para evaluar la evolución de la piezometría y de la calidad del agua, y 4) La evaluación de la comunidad de macroinvertebrados de los ecosistemas dependientes y su posible uso como indicadores del estado de las aguas subterráneas. Existe una amplia literatura sobre los puntos 1) a 3) y que está en continua expansión porque se trata de temas de gran relevancia. Fowler et al. (2007) y Stoll et al. (2011) describen y contrastan las técnicas más utilizadas para reducir de escala los resultados de los modelos climáticos regionales. En Allen et al. (2004), Candela et al. (2009) y Ortuño et al. (2009) se presentan evaluaciones de los cambios previstos de la recarga a los acuíferos debido a los efectos del cambio climático.

En este trabajo se presentan los escenarios climáticos utilizados y el balance hídrico en el acuífero de La Plana de la Galera (368 km²), situado al oeste del Delta del Ebro. Se trata de una zona llana cuya altitud oscila entre el nivel del mar y 530 msnm. El acuífero descarga principalmente hacia el aluvial del Ebro y en el río de la Cenia situado al sur en algunos períodos del año (Fig 1).

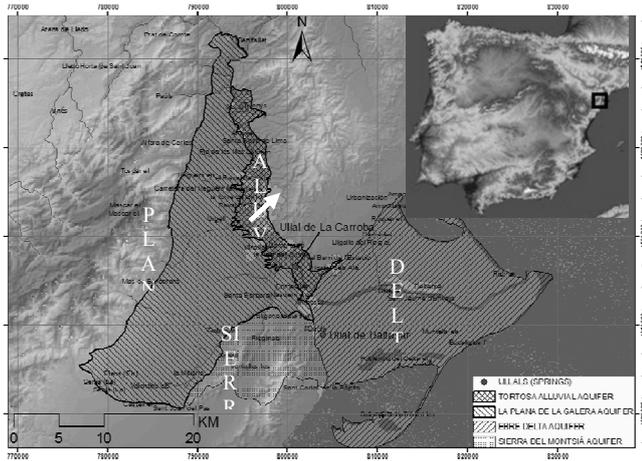


Fig. 1. Acuífero de la Plana de la Galera. Se indican también los acuíferos colindantes.

El flujo subterráneo regional descarga en un conjunto de manantiales y pequeñas lagunas en zonas de turbas en la margen derecha del Río Ebro al oeste del delta conocidas localmente como los Ullals, entre los que destacan los de La Carroba y Baltasar (Fig. 1). Los Ullals se localizan en el contacto entre las calizas mesozoicas de base y los sedimentos arcillosos y limosos de baja permeabilidad del delta. Esta configuración fuerza al agua subterránea a ascender y descargar hacia la atmósfera. Las descargas corresponden principalmente al acuífero de La Plana de la Galera y en menor grado a los acuíferos de Montsiá y al aluvial de Tortosa (Fig. 1). Los Ullals alimentan ecosistemas de especial importancia botánica y zoológica. Los manantiales de Baltasar se encuentran dentro del Parque Nacional del Delta del Ebro, incluido en el Convenio Ramsar.

Los cultivos en la Plana de la Galera ocupan un 60% de la superficie. Se riega fundamentalmente con agua subterránea. Los bombeos se concentran especialmente en las zonas industriales, como en Tortosa, en donde se aprecian notables conos de descenso en la superficie piezométrica. La sobreexplotación de los acuíferos y los retornos de riego tienen especial interés en el proyecto CLIMWAT, en general, y en este caso de estudio en particular. El estudio de las aguas subterráneas y del impacto del cambio climático son de fundamental importancia para preservar estos recursos y el valor ambiental y económico de los ecosistemas involucrados (Brouyère et al., 2004; Kundzewicz et al., 2008).

2.- Descripción de la zona de estudio

La Plana de la Galera se localiza en la provincia de Tarragona y está rodeada por los Puertos de Tortosa y Beceite al oeste, las Sierras de Godall y Montsiá y el río Ebro al este y noreste.

El clima de la zona es mediterráneo con veranos secos y moderadamente cálidos e inviernos húmedos y frescos. Según la clasificación de Köppen-Geiger, el clima es del tipo Csa. La temperatura media anual es de 17.3 °C: la

media en invierno es de 10.8 °C y en verano de 24.4 °C. Las precipitaciones más importantes ocurren durante el otoño y la primavera, haciendo que la estación seca en verano sea más corta que en el clima mediterráneo típico. La precipitación media anual es de 636 mm que se distribuye entre un 38% en otoño, un 21% en invierno, un 26% en primavera y un 15% en verano.

El suelo está ocupado principalmente por cultivos (60%), vegetación natural (32%) y zonas urbanas e industriales (8%) (Bossard et al., 2000). Los cultivos principales son los cítricos y los olivares. Los cítricos se riegan durante todo el año, fundamentalmente con agua subterránea y por goteo, mientras que los olivos son principalmente de secano.

La Plana de la Galera se asienta sobre una fosa tectónica rellena con materiales mesozoicos, terciarios y cuaternarios (CHE, 1999). El relleno de la fosa está compuesto por abanicos aluviales de materiales cuaternarios situados por encima de materiales mesozoicos calcáreos (ver Fig. 2). Conglomerados y gravas calcáreas conforman el acuífero cuaternario de la Plana de la Galera. Por debajo de los materiales cuaternarios y terciarios se encuentran las calizas mesozoicas de un acuífero regional cárstico, multicapa que está confinado bajo el techo del cuaternario (Samper et al, 2011, en este volumen).

La recarga del acuífero cuaternario se produce en toda la extensión del afloramiento. Recibe además por el límite Oeste el aporte subterráneo del acuífero de los Puertos de Tortosa. La descarga del acuífero cuaternario se produce fundamentalmente de forma subterránea hacia el río Ebro, con algunos drenajes localizados como el manantial de La Carroba y hacia el acuífero calcáreo hacia el este (CHE, 1999).

Por su carácter regional, el acuífero mesozoico tiene sus zonas de recarga y descarga más allá de los límites de La Plana de La Galera. Su zona de recarga está ubicada en los Puertos de Tortosa y Beceite.

La utilización de las aguas subterráneas de los acuíferos cuaternario y mesozoico no es globalmente muy importante. Sin embargo, localmente hay bombeos cerca de las zonas más pobladas cercanas al río Ebro.

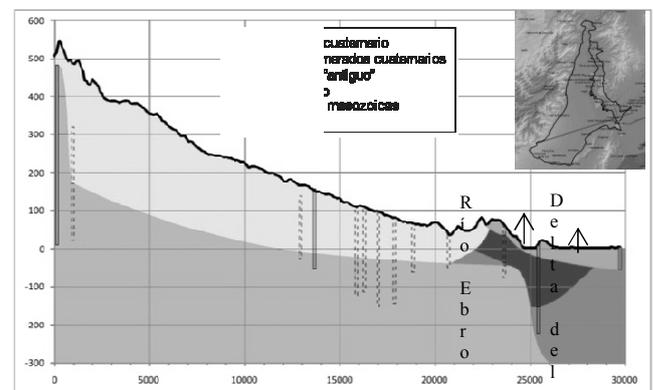


Fig. 2. Perfil geológico de la Plana de la Galera. Se indican los sondeos utilizados para la elaboración del perfil. El aluvial "antiguo" comprende materiales de antiguos lechos del río Ebro.

Los retornos del regadío se estiman en un 7% (1.26 Mm³/año). Constituyen una amenaza para la calidad del agua subterránea ya que contienen sales y pesticidas. Se han medido concentraciones de nitrato en el agua subterránea de hasta 100 mg/l. Se debe tener en cuenta que la llegada de estos contaminantes al acuífero se retrasa en el tiempo debido a la presencia de una potente zona no saturada de decenas de metros de espesor.

Es necesario evaluar la magnitud del impacto del cambio climático sobre la cantidad y la calidad del agua subterránea para mejorar la gestión de los recursos y planificar las medidas de adaptación necesarias.

3.- Metodología

3.1- Balance hídrico

Se ha construido un modelo de balance hídrico de la Plana de la Galera utilizando el código VISUAL-BALAN (Samper et al., 1999) para evaluar los recursos hídricos, especialmente la recarga al acuífero, en el período histórico y en distintos escenarios de cambio climático. El balance se ha calculado en el período 1958-2008 y se ha calibrado con datos de niveles piezométricos en 8 puntos del acuífero entre 1998 y 2008. Se han delimitado 8 zonas homogéneas de parámetros y en cada una de ellas se ha calibrado y calculado el balance (Fig. 3). Se han utilizado datos diarios de precipitación y temperatura de 18 estaciones y se han calculado las series medias para cada zona homogénea. La división de las zonas se hizo teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de cobertura vegetal y los regadíos (Bossard et al., 2000; CHE, 2004). La topografía es bastante homogénea por lo que no se consideró como criterio diferenciador para delimitar las zonas homogéneas. La definición de un número reducido de zonas homogéneas permite tener en cuenta la variabilidad espacial de la meteorología sin que sea necesario calibrar un gran número de parámetros. La zona más pequeña tiene 9 km² y la mayor 124.5 km².

3.2- Generación de series climáticas futuras

De los escenarios climáticos futuros se seleccionaron 4 experimentos (Tablas 1 y 2) del proyecto europeo ENSEMBLES (Van der Linden y Mitchell, 2009). En este proyecto se generaron proyecciones hasta 2100 con una buena resolución espacial (25x25 km²) que cubren las 3 zonas de estudio del proyecto CLIMWAT (Stigter et al, 2010). El escenario de emisión de CO₂ adoptado en ENSEMBLES es el A1B, considerado como medio. Las series mensuales de ENSEMBLES de precipitación y temperatura en el periodo de control 1961-1990 se redujeron de escala para cada zona homogénea mediante regresión lineal que se utilizó posteriormente para reducir de escala las proyecciones mensuales de ENSEMBLES. Alvares et al. (2009) describen el procedimiento utilizado para la reducción de escala.

Las series diarias para 2070-2099 se generaron a partir de las series mensuales reducidas de escala utilizando el generador de series sintéticas del código GEN-BALAN (Alvares y Samper, 2009; Alvares et al, 2009).

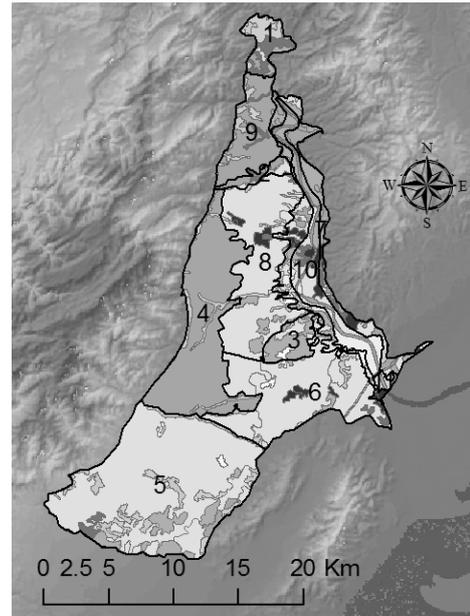


Fig. 3. Mapa de zonas homogéneas del balance hídrico.

3.3- Cálculo del balance hídrico en los escenarios futuros.

Se ha calculado el balance hídrico con cada una de las series de precipitación y temperatura generadas a partir de los resultados de los 4 modelos de ENSEMBLES seleccionados.

4.- Proyecciones

4.1- Proyecciones climáticas

Las Tablas 1 y 2 muestran las temperaturas y las precipitaciones medias estacionales observadas en 1961-1990 y las proyectadas para 2070-2099. Se espera para 2070-2099 un aumento en la temperatura media anual de 4 °C, siendo más importante en verano y otoño (+5°C) que en el resto del año (+3 °C). Los 4 modelos climáticos prevén un aumento de las temperaturas medias estacionales. Las previsiones de temperatura son más homogéneas que las de precipitaciones. Los modelos analizados concuerdan en la disminución de la precipitación en primavera, en un 22% de media. En las otras estaciones hay más variabilidad. Para el invierno, por ejemplo, dos modelos prevén disminuciones (-3% y -13%) y los otros dos aumentos (+13% y +46%). Para la precipitación media anual hay más homogeneidad, estimándose una disminución media de 7%.

En la Tabla 3 se muestran los cambios previstos en el balance hídrico del suelo en dos zonas representativas de la Plana de la Galera, una con olivares en secano y la otra con frutales regados por goteo. En ambas zonas se prevé una disminución de las precipitaciones y de la escorrentía superficial.

Tabla 1. Cambios previstos en la temperatura para 2070-2099.

		Dic- Ene- Feb	Mar- Abr- May	Jun- Jul- Ago	Sep- Oct- Nov	Anual
Observación 1961-1990	°C	10.8	15.5	24.4	18.4	17.3
C4IRCA3	°C	14.0	20.1	31.9	24.5	22.6
	Cambio(°C)	+3.2	+4.5	+7.5	+6.1	+5.3
CNRM- RM5.1	°C	13.3	18.7	29.2	22.2	20.8
	Cambio(°C)	+2.5	+3.1	+4.8	+3.8	+3.6
Had	°C	13.3	19.4	28.6	23.2	21.1
	Cambio(°C)	+2.5	+3.8	+4.2	+4.8	+3.9
ICTP- REGCM3	°C	13.0	17.8	29.0	21.7	20.3
	Cambio(°C)	+2.2	+2.2	+4.6	+3.3	+3.1
Promedio	°C	13	19	30	23	21
	Cambio(°C)	+3	+3	+5	+5	+4

Tabla 2. Cambios previstos en la precipitación para 2070-2099.

		Dic- Ene- Feb	Mar- Abr- May	Jun- Jul- Ago	Sep- Oct- Nov	Anual
Observación 1961-1990	mm	134	164	96	242	636
C4IRCA3	mm	195	125	68	175	563
	Cambio(%)	+46	-24	-29	-28	-12
CNRM- RM5.1	mm	129	138	95	277	640
	Cambio(%)	-3	-16	-1	+14	+1
Had	mm	151	150	68	197	565
	Cambio(%)	+13	-9	-29	-19	-11
ICTP- REGCM3	mm	117	101	112	264	593
	Cambio(%)	-13	-39	+17	+9	-7
Promedio	mm	148	128	86	228	590
	Cambio(%)	+11	-22	-10	-6	-7

Como consecuencia del aumento de las temperaturas se prevé también un aumento de la ETP. Sin embargo, para la zona regada se prevé una disminución de la ETR del 8%, mientras que para la zona de secano la ETR permanecerá casi constante. Se destaca especialmente que la recarga al acuífero en la zona regada aumentará un 14% mientras que en la zona en secano disminuirá un 36%.

La Tabla 4 presenta los cambios previstos en la recarga media al acuífero de la Plana de la Galera para 2070-2099. Se muestra el promedio de los escenarios considerados. Se prevé una disminución de la recarga media anual del 21%, con una máxima disminución en primavera (-33%) y la mínima en invierno (-7%).

Tabla 3. Cambios previstos en el balance hídrico de dos zonas homogéneas representativas de la Plana de la Galera.

Zona	Componente	1961- 2008 (mm)	2070- 2100 (mm)	Cambio (mm)	Cambio (%)
3 (riego por goteo)	Precipitación	605	566	-39	-6
	Riego	500	500	0	0
	ETR	851	783	-68	-8
	Escorrentía superficial	15	10	-5	-33

		Recarga	239	273	+34	+14
5 (cultivos en secano)	Precipitación	654	591	-63	-10	
	Riego	0	0	0	0	
	ETR	476	472	-4	-1	
	Escorrentía superficial	28	23	-5	-18	
	Recarga	150	96	-54	-36	

Tabla 4. Impactos del cambio climático en la recarga al acuífero de la Plana de la Galera.

	1961- 1990	2070-2100	
	mm	mm	Cambio (%)
Dic-Ene- Feb	45	42	-7
Mar-Abr- May	35	24	-33
Jun-Jul- Ago	20	17	-14
Sep-Oct- Nov	50	35	-29
Anual	151	118	-21

5.- Discusión de resultados

Las predicciones de los modelos indican una disminución de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas medias y de la ETP. La ETR depende de la ETP, pero también de la disponibilidad de agua en el suelo. De esta forma, el aumento de la temperatura media producirá un aumento en la ETR solamente si hay agua disponible en el suelo.

La disminución estimada de la recarga media anual al acuífero de La Plana de la Galera para 2070-2099 es de 33 mm (Tabla 4), muy similar a la de la precipitación (43 mm). Sin embargo, si los resultados se analizan por zonas se encuentran diferencias grandes dependiendo de si se riega (por goteo) o no. Las predicciones indican que en las zonas en secano la ETR y la escorrentía superficial cambiarán muy poco, mientras que la recarga disminuirá tanto como la precipitación ($\Delta R = -54$ mm, $\Delta P = -63$ mm). En términos relativos, una disminución de la precipitación media anual del 10% produce una disminución de la recarga del 36%. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Ortuño et al. (2009), Alvares et al (2009) y CHE (2007). Ortuño et al. (2009) prevén para 2071-2100 reducciones de entre 18 y 31 % en la recarga de varios acuíferos en Cataluña.

En las zonas regadas por goteo, en cambio, la ETR disminuirá más que la precipitación, y la diferencia se deberá a un aumento de la recarga al acuífero. La diferencia entre las respuestas de las zonas de regadío y las de secano se debe a la recarga en tránsito, que es el agua que desciende desde el suelo edáfico a la zona no saturada y que constituye una recarga potencial al acuífero. El modelo de balance realizado con VISUAL-BALAN se ha calibrado considerando la existencia de recarga en tránsito directa por fisuras, que es la fracción de la recarga en tránsito que atraviesa más rápidamente el suelo edáfico cuando las condiciones de agrietamiento por sequedad así lo permiten. Por lo tanto, en la simulación realizada, las condiciones de sequedad en verano provocarán un aumento de la recarga por infiltración del agua de riego. Este es un resultado aparentemente contradictorio que se deberá revisar en trabajos futuros.

Estas predicciones se han realizado suponiendo que no habrá cambios en los usos del suelo ni en los volúmenes de regadío. En el futuro será necesario ampliar el análisis teniendo en cuenta otras posibilidades e hipótesis. Otro aspecto a tener en cuenta es que las predicciones de los modelos climáticos difieren entre sí, a veces de manera considerable. Por ejemplo, para el trimestre diciembre-marzo del periodo 2070-2099 el modelo C4IRCA3 prevé un aumento en la precipitación media del 46% mientras que el modelo ICTP-REGCM3 prevé una disminución del 13%. Esto implica un aumento de la recarga al acuífero de 26% en el primer caso y una disminución de 22% en el segundo. La consideración de valores medios no debe hacer olvidar que las predicciones tienen asociadas unas horquillas, determinadas por las incertidumbres del problema.

A las incertidumbres asociadas a los modelos climáticos, a la reducción de escala y a las hipótesis del balance hídrico hay que añadir también la asociada a la existencia y magnitud de la recarga en tránsito directa. No se dispone de aflores de caudales en la zona, pero la utilización de piezómetros adicionales y de datos de bombeos permitirán mejorar la calibración del modelo del balance hídrico y reducir las incertidumbres de los resultados, especialmente de la recarga en tránsito.

6.- Conclusiones

Se han presentado las principales características del proyecto CLIMWAT y los posibles impactos del cambio climático en el balance hídrico de la Plana de la Galera.

Las proyecciones para 2070-2099 indican una disminución de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas medias respecto al periodo de referencia 1961-1990. Se espera para 2070-2099 un aumento en la temperatura media anual de 4 °C, siendo más importante en verano y otoño (+5°C) que en el resto del año (+3 °C). Los 4 modelos climáticos de ENSEMBLES que se utilizaron prevén el aumento de las temperaturas medias estacionales. Las previsiones de cambios en las precipitaciones de los distintos modelos tienen mucha más dispersión que las de la temperatura media. Los 4 modelos prevén la disminución de

la precipitación en primavera, en un 22% de media. En las otras estaciones hay más variabilidad. Para el invierno por ejemplo, dos modelos prevén disminuciones (-3% y -13%) y los otros dos aumentos (+13% y +46%). Las predicciones de precipitación media anual son más homogéneas, estimándose una disminución media de 7%.

Se prevé para finales de siglo una disminución del 21% de la recarga media anual al acuífero de La Plana de La Galera. La máxima disminución será en primavera (-33%) y la mínima en invierno (-7%). Los predicciones difieren significativamente de una zona a la otra, dependiendo de si se riega (por goteo) o no. La recarga al acuífero disminuirá casi tanto como la precipitación en las zonas en secano, mientras que la recarga aumentará en las zonas regadas por goteo. Esto es debido al hecho de que el modelo de balance realizado con VISUAL-BALAN se ha calibrado considerando la existencia de recarga en tránsito directa por fisuras cuando el suelo edáfico presenta grietas por sequedad. Las condiciones de sequedad en verano provocarán un aumento de la infiltración del agua regada.

A pesar de sus incertidumbres, los resultados de este estudio muestran en términos generales los posibles cambios que se pueden esperar en la Plana de la Galera. Se constata que los usos del suelo y las prácticas agrícolas pueden influir notablemente en los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

Las principales incertidumbres de las predicciones incluyen las incertidumbres de los modelos climáticos, las debidas a la reducción de escala, los posibles cambios en el futuro en el uso del agua y del suelo, y las asociadas al modelo de balance hídrico entre las que destaca la estimación de la recarga en tránsito, especialmente la directa cuya relevancia y magnitud se deberá estudiar con más profundidad. Para mejorar la calibración del modelo de balance y reducir la incertidumbre de sus resultados, se propone utilizar datos adicionales de bombeos y registros piezómetros.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto CLIMWAT del Programa CIRCLE-MED del espacio europeo de investigación ERA-NET. La parte española del proyecto se ha realizado con financiación de un proyecto de la Xunta de Galicia (Ref. 08MDS016118PR). Se agradece muy especialmente a la Agència Catalana de l'Aigua y a Carlos Loaso por su contribución al proyecto, proporcionando información, aportando medios y destinando tiempo para las visitas de campo. También se agradece la colaboración prestada por la Confederación Hidrográfica del Ebro por facilitar la información utilizada en el estudio. Finalmente, se agradecen los comentarios de los dos revisores anónimos que han servido para mejorar la versión final de este trabajo y a todas las personas que han participado en el proyecto CLIMWAT.

7.- Referencias

- Allen DM, Mackie DC y Wei M (2004). Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeol. J.* 12, 270-290.
- Alvares D y Samper J (2009). Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GISBALAN, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona. Vol IX. Pp 491-498.
- Alvares D., Samper J y García Vera MA (2009). Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos. En: *IX Jornadas de Zona no*

- Saturada, ZNS'09*, Barcelona. Pp 499-506.
- Bossard M, Feranec J, Otahel J (2000). Corine Land Cover technical guide – Addendum 2000. EEA Technical Report 40.
- Brouyère S, Carabin G y Dassargues A (2004). Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeol. J.* 12, pp. 123–134.
- Candela L, von Igel W, Elorza FJ y Aronica G (2009). Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *J. Hydrol.* Volume 376, Issues 3-4, 510-527. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.057
- CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro) (1999). Delimitación de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). Consultor: INTECSA. Informe inédito. Zaragoza. <http://oph.chebro.es/documentacion/masasagua/subterranas/masasaguasubterra.htm>
- CHE (2004). Mapas de cultivos y regadíos: <http://oph.chebro.es/ContenidoCartoRegadios.htm>
- CHE (2007). Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro: www.chebro.es/contenido.streamFichero.do?idBinario=6163
- Fowler HJ, Blenkinsop S y Tebaldib C (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Int. J. Climatol.* 27: 1547–1578.
- Green TR, Taniguchi M y Kooi H (2007). Potential impacts of previous term climate change on human activity on subsurface water resources, *Vadose Zone J.* 6, pp. 531–532.
- Kundzewicz Z, Mata L. J, Arnell N, Döll P, Jiménez B, Miller K, Oki T, Şen Z y Shiklomanov I (2008) The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrol. Sci. J.* 53(1), 3–10.
- Ortuño F, Jódar J y Carrera J. (2009). Cambio climático y recarga de acuíferos en Catalunya. En: Agua y Cambio Climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña. Agència Catalana de l'Aigua. http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/impactes_hidrologics/capitol11_lowress.pdf
- Samper J, Huguet LI, Ares J, García Vera MA (1999). Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. ENRESA 05/99. Madrid. 134 pp.
- Samper J, Li Y, Pisani B, Ribeiro L, Fakir Y, Stigter T (2011). Evaluación de los impactos del cambio climático en los acuíferos de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa. En: X Jornadas de la Zona no Saturada, ZNS'11, este volumen.
- Stigter T., Ribeiro L., Oliveira R., Samper J., Fakir Y., Fonseca L., Monteiro J.P., Nunes J.P., Pisani B. (2010). Studying the impact of climate change on coastal aquifers and adjacent wetlands. Geophysical Research Abstracts 12: EGU2010-15399; Proceedings of the EGU 2010 General Assembly, Mayo 2010, Viena.
- Stoll S, Hendricks Franssen HJ, Butts M y Kinzelbach W (2011). Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 21–38.
- Van der Linden P., Mitchell J.F.B. Eds, (2009), ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.