

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ACUÍFEROS DE LA PLANA DE LA GALERA Y DEL ALUVIAL DE TORTOSA

J. Samper¹, Y. Li¹, B. Pisani¹, L. Ribeiro², Y. Fakir³, T. Stigter⁴

¹ Escuela de Caminos, Universidad de A Coruña, España, Email: jsamper@udc.es.

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

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

⁴ Instituto Superior Técnico (Lisboa), Universidad de Algarve, Portugal, e-mail: tiber.stigter@ist.utl.pt.

RESUMEN. Existe un amplio consenso acerca de que los posibles impactos del cambio climático deben ser tenidos en cuenta en la planificación y la gestión de los recursos hídricos. En este trabajo se presentan los modelos de flujo subterráneo del acuífero multicapa de la Plana de la Galera y del acuífero aluvial de Tortosa que se han resuelto con el programa en elementos finitos CORE^{2D} V4. Primeramente, se presenta una evaluación preliminar del flujo subterráneo en los acuíferos mediante un modelo de flujo bidimensional en un plano vertical. Después se describe un modelo bidimensional en planta calibrado con datos piezométricos de los últimos 20 años. Se han evaluado los efectos del cambio climático en la piezometría y en los caudales de descarga subterránea en los manantiales sobre turbas en el delta del Ebro conocido como "Ullals". Los resultados de este trabajo contribuirán a mejorar la gestión de los recursos en zonas del Mediterráneo.

ABSTRACT. The increasing evidence of climatic change motivates the need to identify its possible impacts and quantify them to minimize its negative effects. Groundwater resources and their associated ecosystems could be affected by climate change. This paper presents groundwater flow models of La Plana de la Galera and Tortosa alluvial aquifers near Delta del Ebro which have been solved with the finite-element code CORE^{2D} V4. A preliminary model of two-dimensional flow in a vertical plane was made as a first step. Subsequently, a plane, two-dimensional model has been calibrated with piezometric data collected from the last 20 years. The effects of climate change on the water table and on groundwater discharge in the springs in the Ebre delta known as "Ullals" have been assessed. The results of this study will improve the management of water resources in Mediterranean areas.

et al. (2010) utilizaron el programa IHMS para modelizar las cuencas de Kouris y Akrotiri en Chipre, D'Agostino et al. (2010) utilizaron el código DiCaSM en la cuenca de Candelaro (Italia), Yihdego y Webb (2010) aplicaron el código PIRFICT a una cuenca en Victoria Occidental (Australia) y Lespinas et al. (2010) utilizaron el código DEM para modelizar cuencas costeras Mediterráneas en Francia.

Una vez que los modelos hidrológicos han sido calibrados con datos históricos se pueden utilizar para predecir los posibles impactos del cambio climático en el futuro. Numerosos estudios muestran que el cambio climático afectará a los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, y por lo tanto, a los ecosistemas que de ellos dependen. Por ejemplo, Gul y Rosbjerg (2010) utilizaron el programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para evaluar los impactos del cambio climático en la hidrología en una pequeña cuenca de Dinamarca.

En el marco del proyecto CLIMWAT se ha desarrollado una metodología multimodelo para estudiar los efectos del cambio climático en acuíferos costeros y ecosistemas asociados (Stigter et al., 2010). Dicha metodología se ha aplicado en tres cuencas del ámbito mediterráneo: la de la laguna de Oualidia (El Sahel, Marruecos), el acuífero de Querença-Silves (El Algarve, Portugal) y las cuencas de la Plana de la Galera y el aluvial del Ebro en Tortosa (España).

En este trabajo se presentan los modelos de flujo subterráneo de la Plana de la Galera y del aluvial del Ebro (Fig. 1) que se han construido con el código en elementos finitos CORE^{2D} V4 (Samper et al., 2003; 2011). Se han calibrado con datos históricos y se han utilizado para realizar simulaciones en escenarios de cambio climático.

1.- Introducción

El clima de la Tierra está cambiando debido al calentamiento global. En zonas costeras mediterráneas ya se han detectado cambios que se prevé que se acentúen en el presente siglo, tales como el aumento de las temperaturas medias, la disminución de las precipitaciones anuales y el aumento del nivel medio del mar.

En los últimos años se han desarrollado y aplicado múltiples herramientas numéricas para estudiar los impactos del cambio climático en zonas costeras. Por ejemplo Ragab

2.- Hidrogeología

La Plana de la Galera se encuentra en una fosa tectónica que se rellenó por abanicos aluviales cuaternarios situados por encima de materiales mesozoicos calcáreos. El acuífero cuaternario de la Plana de la Galera está formado por conglomerados y gravas calcáreas. Por debajo de los materiales cuaternarios y terciarios se encuentran las calizas mesozoicas del acuífero regional kárstico multicapa que está confinado bajo el techo del cuaternario.

La profundidad del cuaternario es del orden de 100-300 m mientras que la del mesozoico de 1000-1500 m. La

cuenca del Cenja.

Tabla 1. Conductividades hidráulicas de las zonas del modelo en perfil vertical del acuífero de la Plana de la Galera y del aluvial del Ebro.

| Zona | Material | Conductividad (m/d) |
|------|---|---------------------|
| 1 | Aluvial actual (Cuaternario) | 200 |
| 2 | Aluvial antiguo | 50 |
| 3 | Conglomerados cuaternarios (Plana de la Galera) | 1.87 |
| 4 | Calizas mesozoicas (Plana de la Galera) | 0.06 |

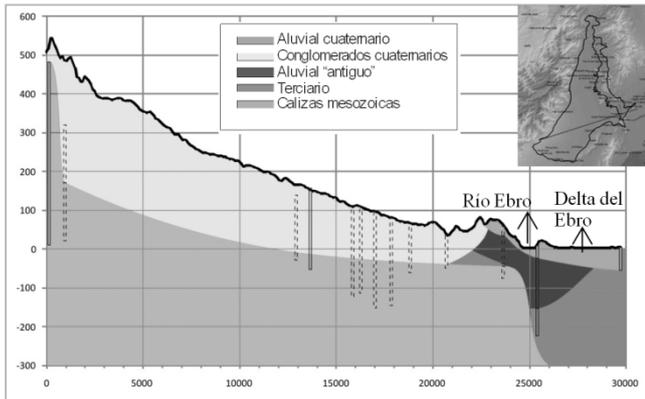


Fig. 3. Perfil geológico de la Plana de la Galera. Se indican los sondeos utilizados para la elaboración del perfil.

El modelo se calibró con datos de niveles piezométricos medidos en 4 puntos distribuidos a lo largo de la traza del perfil desde la Cenja hasta L’Aldea en el delta del Ebro (Fig. 2).

4.- Modelo numérico 2D en planta

4.1.- Descripción del modelo

A partir del modelo estacionario en perfil vertical se construyó un modelo 2D en planta de flujo de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa que primero se resolvió en régimen estacionario y posteriormente en régimen transitorio. La zona del modelo ocupa una superficie de 434.7 km² (Fig. 4).

A partir de la información geológica (Fig. 3) se diferenciaron las siguientes 5 zonas hidrogeológicas en el dominio del modelo en planta (Fig.5 izquierda): el aluvial cuaternario, el aluvial terciario, dos zonas de conglomerados cuaternarios y la zona de calizas mesozoicas. Las zonas de recarga coinciden con las zonas utilizadas en el modelo de balance hídrico construido con VISUAL-BALAN que se delimitaron teniendo en cuenta los usos del suelo y el regadío (Fig. 5 derecha; Pisani et al., 2011). Se han utilizado las recargas mensuales calculadas con VISUAL-BALAN.

A lo largo del límite occidental del modelo se produce una recarga de 27 hm³/año procedente de los Puertos de Tortosa y Beceite que se supone distribuida de forma homogénea a lo largo de todo el contorno (CHE, 1999) (Fig. 4).

En el límite suroriental se ha considerado una recarga

distribuida proveniente de la Sierra del Montsiá que ha sido calibrada. La variación temporal de estas entradas laterales se tomó igual a la calculada con el modelo de balance para la recarga en las zonas sin riego. El contorno sur del modelo coincide con el río de la Cenja en el que descarga el acuífero mesozoico excepto en algunos tramos del cauce en los que las aguas se infiltran en sumideros kársticos.

La red hidrográfica local está formada básicamente por los barrancos que sólo llevan agua en episodios de lluvias intensas. En estos cursos de agua se ha utilizado una condición de contorno mixta según la cual descarga del acuífero es igual al producto de un coeficiente de goteo por la diferencia entre el nivel del acuífero h y el del río, H , que se ha tomado igual a la cota del fondo del cauce.

Se han incluido en el modelo 28 puntos de bombeo en los que se suponen integrados todos los bombeos estimados en la Plana de la Galera (Fig. 4).

En el modelo se ha adoptado la hipótesis de que todos los pozos bombean el mismo caudal. El volumen medio anual bombeado ha sido estimado por la CHE (1999) en 30 hm³/año. Un 44% del caudal total se bombea del cuaternario y un 56% del acuífero regional. El 90% de los bombeos se destinan al riego y el resto al abastecimiento y otros usos. Los retornos de riego están incluidos en la recarga calculada por el modelo de balance.



Fig. 4. Límites de los acuíferos de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa. Se muestran los puntos de observación de niveles, los pozos de bombeo y las condiciones de contorno. Las zonas de recarga del modelo

se indican con distinto sombreado.

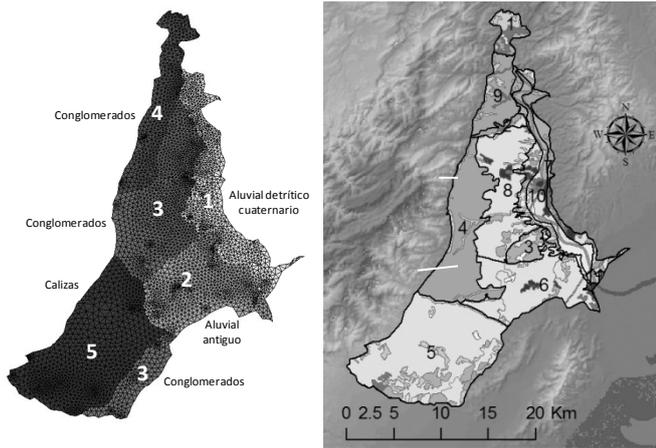


Fig. 5. Malla de elementos finitos del modelo de flujo subterráneo de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa y zonas de materiales (izquierda) y zonas de recarga (derecha).

4.2.- Calibración del modelo

En una primera fase se realizaron pasadas del modelo en régimen estacionario para obtener una calibración preliminar de la conductividad hidráulica. La Fig. 6 presenta el mapa de isopiezas calculado en régimen estacionario para el periodo 1959-2008. En una segunda fase se calibraron los valores de la conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento a partir del modelo transitorio. Los valores finalmente adoptados se muestran en la Tabla 2. La Tabla 3 muestra las medias anuales de las principales componentes del balance de agua en el acuífero en el periodo histórico 1959-2008.

Tabla 2. Valores de la conductividad hidráulica y del coeficiente almacenamiento calibrados en el modelo en planta de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa.

| Zona | Material | Conductividad (m/d) | Coficiente de almacenamiento |
|------|------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1 | Q4 aluvial | 200.0 | 1×10^{-2} |
| 2 | T3 aluvial | 120.0 | 1×10^{-4} |
| 3 | T3 sur conglomerados | 8.0 | 3×10^{-3} |
| 4 | T3 norte conglomerados | 2.1 | 3×10^{-3} |
| 5 | T3 calizas | 1.1 | 5×10^{-3} |

5.- Predicción de los impactos del cambio climático

5.1.-Predicciones con el modelo 2D en perfil

Con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático en los niveles piezométricos y en las descargas a ríos y manantiales se realizó una pasada del modelo con la recarga media anual estimada para 2070-2099. Dicha recarga varía entre 91.3 mm/año cerca del río Ebro y 95.6 mm/año en las zonas más altas. La recarga media anual estimada para el periodo 2070-2099 es un 20% menor que la del periodo 1959-2008.

Tabla 3. Balance de agua en los acuíferos de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa en el período histórico 1959-2008.

| Zonas | Recarga (hm^3/a) | | | Descarga (hm^3/a) | | | |
|------------|------------------------------------|-------------|---------------|-------------------------------------|-------------|----------------|---------|
| | Precipitación y retornos de riego | Borde oeste | Borde sureste | Borde sur | Borde oeste | Cursos de agua | Bombeos |
| Q subtotal | 68.94 | 27.41 | 22.63 | 15.51 | 12.05 | 61.42 | 30.00 |
| Q total | 118.98 | | | 118.98 | | | |

La Fig. 7 muestra los niveles medios calculados en los periodos de calibración y de simulación con el modelo en perfil vertical. La piezometría actual está más cerca de la superficie del terreno. Los niveles más altos se observan en la zona más occidental ($h > 310$ m) mientras que los niveles más bajos se encuentran en las zonas más próximas al río Ebro ($h < 3$ m). Los resultados del modelo indican que se producirá un descenso general de los niveles piezométricos a consecuencia del cambio climático, salvo en las zonas cercanas al río afectadas por un ascenso del nivel del mar.

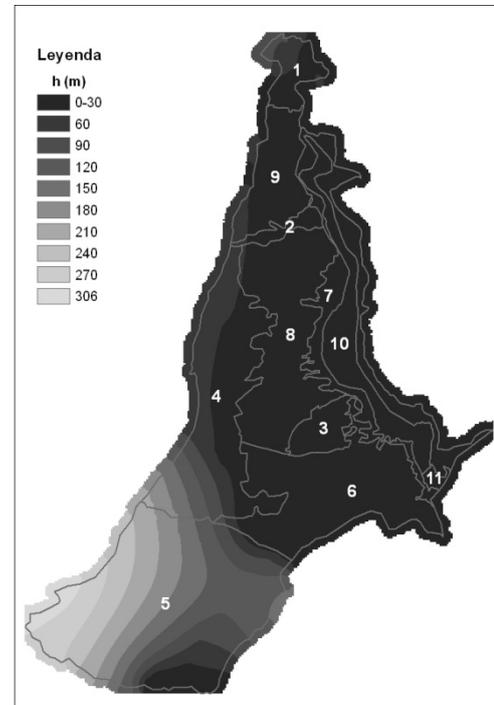


Fig. 6. Mapa de isopiezas calculado con el modelo estacionario para el periodo histórico 1959-2008. Se indican las zonas de recarga del modelo.

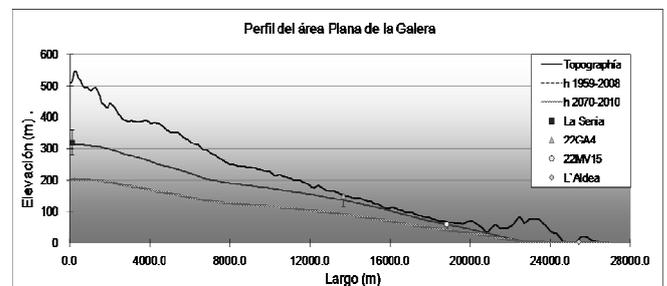


Fig. 7. Superficies freáticas calculadas con el modelo estacionario de flujo en un perfil vertical en el periodo histórico (1959-2008) y en el de predicción (2070-2099).

Las descargas del acuífero a los barrancos de la zona, que en la actualidad sólo se observan en periodos lluviosos, disminuirán. Asimismo, se prevé una disminución de las descargas en los manantiales de la Carroba y del delta del Ebro.

5.2.- Predicciones con el modelo 2D en planta

Para realizar las predicciones de los cambios en los niveles piezométricos y el flujo subterráneo producidas por el cambio climático se utilizaron las series mensuales de recarga al acuífero estimadas para los periodos 2020-2050 y 2070-2099. En dichos periodos las simulaciones se realizaron en años hidrológicos comenzando el 1 de octubre de 2019 y de 2069, respectivamente.

Se realizaron pasadas en régimen transitorio con un intervalo de tiempo mensual. Los niveles calculados en condiciones estacionarias se utilizaron como condiciones iniciales del modelo transitorio en cada uno de los periodos de predicción. La Tabla 4 muestra la recarga media en cada zona y en cada periodo de cálculo.

El aumento del nivel del mar provocará la subida del nivel del río Ebro. Se ha supuesto que dicho ascenso variará de forma lineal desde la desembocadura hasta aproximadamente 100 m aguas arriba de Amposta. Se prevé además que las entradas de agua subterránea desde los Puertos de Beceite y Tortosa al oeste y desde la Sierra de Montsiá al sureste disminuirán un 23% en el periodo 2021-2050 y un 33% en el periodo 2070-2099. Para realizar las predicciones se ha supuesto que el nivel del mar en el periodo 2021-2050 será como media 0.5 m más alto que el actual y en el periodo 2070-2099, 1 m más alto.

Los efectos del cambio climático en la piezometría permiten distinguir tres zonas: 1) En las zonas cercanas al Ebro y al mar los niveles se elevarán ligeramente; 2) En las zonas alejadas del mar el nivel medio del acuífero bajará (Fig. 8), 3) En zonas intermedias, los cambios en la piezometría no muestran patrones claros.

Se prevén unos descensos máximos de 69.1 m para 2021-2050 y de 102.5 m para el periodo 2070-2099, respectivamente. Ambos máximos se producirán en las zonas más elevadas del término municipal de la Cenia.

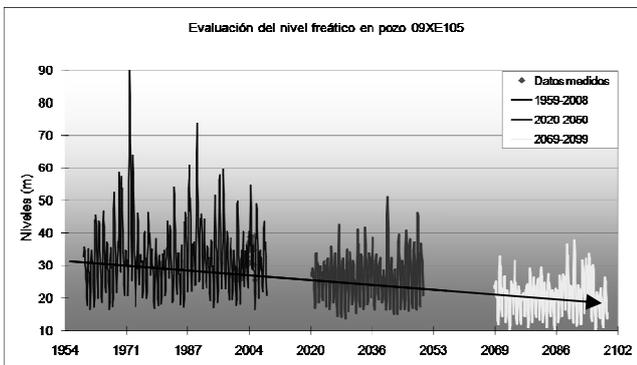


Fig. 8. Niveles observados y calculados en el periodo histórico 1959-2008 y en los de predicción 2021-2050 y 2070-2099 en un pozo del acuífero de la Plana de la Galera situado en el término municipal de Cherta. Se aprecia una tendencia descendente de los niveles freáticos.

La Fig. 9 muestra los cambios previstos en la piezometría media para el periodo 2070-2099. El nivel freático del aluvial en las zonas más próximas al Ebro y al mar subirá debido al aumento del nivel del mar. Se prevén ascensos de 0.4 m para 2021-2050 y de 0.8 m para 2070-2099.

Tabla 4. Recarga media anual calculada con VISUAL-BALAN en las zonas de recarga que se muestran en la Fig. 9.

| Zona de recarga | 1959-2008 (mm/a) | 2021-2050 (mm/a) | 2070-2099 (mm/a) |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 75.1 | 80.2 | 67.0 |
| 2 | 240.7 | 268.5 | 253.5 |
| 3 | 243.4 | 253.1 | 300.0 |
| 4 | 154.9 | 122.2 | 105.1 |
| 5 | 152.4 | 116.9 | 96.9 |
| 6 | 131.0 | 122.3 | 92.6 |
| 7 | 222.8 | 230.0 | 262.0 |
| 8 | 126.7 | 106.4 | 93.2 |
| 9 | 90.3 | 70.9 | 62.4 |
| 10 | 431.8 | 366.2 | 308.2 |
| 11 | 748.9 | 692.3 | 587.1 |

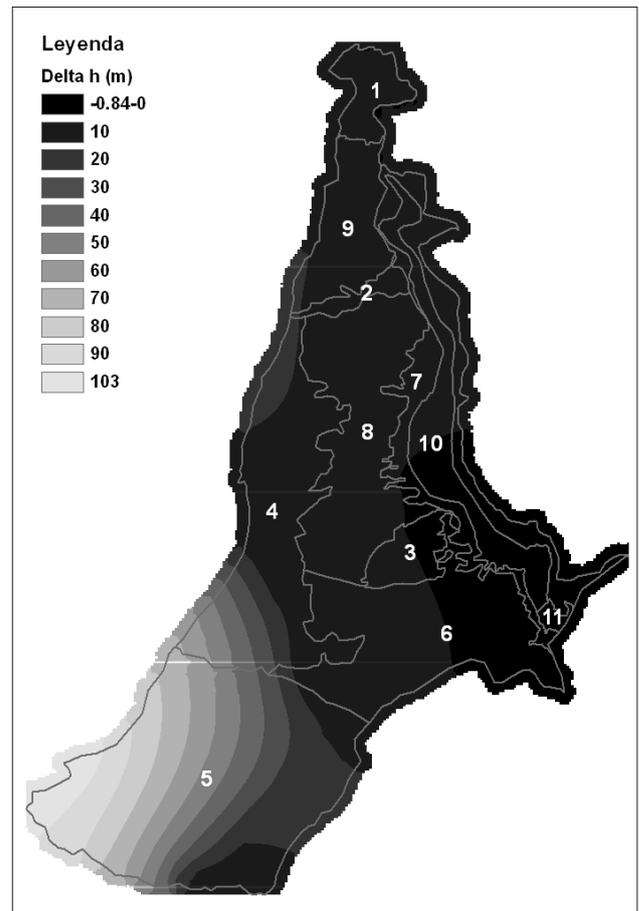


Fig. 9. Variación media de la superficie freática prevista. Se muestra la diferencia entre los niveles actuales y los previstos en el periodo 2070-2099. Se indican las zonas de recarga del modelo.

6.-Conclusiones

Se han evaluado los posibles impactos del cambio climático en los niveles piezométricos y en las descargas subterráneas a los ríos y manantiales de la Plana de la Galera y el aluvial de Tortosa en los periodos 2021-2050 y 2070-2099.

La recarga media anual en la Plana de la Galera disminuirá un 20% respecto a la recarga media del periodo 1959-2008. En cambio, para el aluvial de Tortosa se prevén disminuciones menores: 5% en 2021-2050 y 13% en 2070-2099. También disminuirán las descargas del acuífero a los barrancos de la zona que en la actualidad sólo se observan en periodos lluviosos. Asimismo, se prevé una disminución de las descargas en los manantiales de la Carroba y del delta del Ebro. En general, los niveles piezométricos bajarán, salvo en las zonas cercanas al río afectadas por un ascenso del nivel del mar. Los descensos máximos del nivel piezométrico previstos para 2021-2050 y 2070-2099 son de 69.1 m y 102.5 m, respectivamente. Ambos máximos se producirán en las zonas más elevadas del término municipal de la Cenia. El nivel freático en las zonas más próximas al Ebro y al mar se elevará debido al aumento del nivel del mar, previéndose ascensos de 0.4 m para 2021-2050 y de 0.8 m para 2070-2099.

Para reducir las incertidumbres de este trabajo se deberán estudiar con más detalle las condiciones de contorno, especialmente los flujos laterales a través de los límites con otros acuíferos limítrofes y la relación con el río de la Cenia. Además se deberán ampliar las series de caudales de los principales manantiales de la zona.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en el Proyecto CLIMWAT del Programa CIRCLE-MED de ERA-NET. Para la realización de los trabajos de la cuenca española se ha contado con financiación de la Xunta de Galicia (Ref. 08MDS016118PR). Se agradece especialmente a la Agència Catalana de l'Aigua y a Carlos Loaso su contribución al proyecto, proporcionando información, aportando medios y destinando tiempo para las visitas de campo. También se agradece la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Ebro por facilitar la información utilizada en el estudio y a Emilio Custodio de la Universidad Politécnica de Cataluña por sus sugerencias e indicaciones en las fases iniciales del proyecto. Finalmente, se desea reconocer la aportación de todas las personas que han participado en el proyecto CLIMWAT.

7.- Referencias

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>

D'Agostino, D.R., Trisorio, L.G., Lamaddalena, N. y Ragab, R. (2010). Assessing the Results of Scenarios of Climate and Land use Changes on the Hydrology of an Italian Catchment: Modelling Study. *Hydrological Processes*. 24(19): 2693-2704.

EMRL, 2007, <http://www.aquaveo.com/sms>

Gul, G.O. y Rosbjerg, D. (2010). Modelling of Hydrologic Processes and Potential Response to Climate Change through the use of a Multisite SWAT. *Water and Environment Journal*. 24(1): 21-31.

Lepinas, F., Ludwig, W. y Heussner, S. (2010). Impact of Recent Climate Change on the Hydrology of Coastal Mediterranean Rivers in Southern France. *Climatic Change*. 99(3-4): 425-456.

Molinero, J., Samper, J. y Juanes, R. (2002). Numerical Modeling of the Transient Hydrogeological Response Produced by Tunnel Construction in Fractured Bedrocks. *Engineering Geology*. 64, 369-386.

Molinero J. y Samper J. (2004). Groundwater Flow and Solute Transport in Fracture Zones: An Improved Model for a Large-Scale Field Experiment at Äspö (Sweden), *J. Hydraulic Research*. Vol. 42, 2004, Extra Issue, 157-172.

Pisani, B., Samper, J., Ribeiro, L., Fakir, Y. y Stigter, T. (2011). El Proyecto CLIMWAT: evaluación y gestión de los impactos del cambio climático en acuíferos costeros y ecosistemas asociados. Clima y balance hídrico en la Plana de la Galera (Cataluña, España). En: *X Jornades de Zona no Saturada, ZNS'11*, este volumen.

Ragab, R., Bromley, J., Doerflinger, G. y Katsikides, S. (2010). IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 2. Application of Linked Unsaturated, DiCaSM and Saturated Zone, MODFLOW Models on Kouris and Akrotiri Catchments in Cyprus. *Hydrological Processes*. 24(19): 2681-2692.

Samper, J. y García Vera, M.A. (2004). Visual-Balan, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros, En: VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, Vol. XXVI. 595-604.

Samper, J., Pisani, B., Alvares, D. y García, M.A. (2007). GIS-BALAN: un modelo hidrológico semi-distribuido acoplado a un sistema de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos. *Estudio de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII*. J. V. Giráldez Cervera y F. J. Jiménez Hornero, 341-346

Samper, J., Yang, C., Montenegro, L. (2003). CORE2D Version 4: A code for non-isothermal water flow and reactive solute transport. Users Manual. Universidad de La Coruña.

Samper, J, C Yang, L Zheng, L Montenegro, S Moreira y C Lu (2011) Chapter 7. CORE2D V4: A code for water flow, heat and solute transport, geochemical reactions, and microbial processes, En: *Ground Water Reactive Transport Models*, Electronic book, 144-167, ISBN 978-1-60805-029-1.

Stigter, T., Ribeiro, L., Oliveira, R., Samper, J., Fakir, Y., Fonseca, L., Monteiro, J.P., Nunes, J.P. y 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.

Yihdego, Y. y Webb, J.A. (2010). Characterizing Groundwater Dynamics using Transfer Function-Noise and Auto-Regressive Modeling in Western Victoria, Australia. Proceedings of the 5th IASME/WSEAS Int Conf on Water Resources, Hydraulics & Hydrology. Proceedings of the 4th IASME/WSEAS Int Conf on Geology and Seismology - Water and Geoscience. 96-101.