

Fenómenos de inundación subterránea asociados a las crecidas del río Ebro en la ciudad de Zaragoza

The groundwater inundation phenomena as a response to Ebro River flood events in Zaragoza city

Alejandro García Gil^{1,2}, José Ángel Sánchez Navarro¹, Enric Vazquez-Suñé², Eduardo Garrido Schneider³, Antonio Pérez García¹ y Jesús Mateo Lázaro¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Zaragoza, c/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

agargil@unizar.es, joseange@unizar.es, anperez@unizar.es, jesumateo@eid.es

² GHS, Grupo de Hidrogeología Subterránea (IDAEA), CSIC, c/ Jordi Girona, 18-26, 08034 Barcelona, España. enric.vazquez@idaea.csic.es

³ Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Zaragoza. Manuel Lasala 44, 9^oB 50006, Zaragoza, España. egarrido@igme.es

ABSTRACT

The objective of this work is to study groundwater inundation phenomena in the metropolitan area of Zaragoza as a consequence of Ebro river flood events. A groundwater flow numerical model has been used to simulate the hydraulic response of the urban groundwater body to flood events in order to quantify the groundwater-building basements interaction. The model developed has been validated with damage documented proving its utility. The results showed that 107 buildings are vulnerable to groundwater inundation and that the structures affected may experience a pressure load up to 0.7 kg·cm⁻² depending on the structure depth and the flood event considered.

Key-words: Groundwater inundation, flood event, river-aquifer relationship, urban hydrogeology, groundwater modelling.

RESUMEN

En este trabajo se estudia desde un punto de vista cuantitativo la respuesta hidráulica del acuífero aluvial urbano de Zaragoza a las crecidas del río Ebro con el objetivo del estudio de fenómenos de inundación subterránea. La simulación de dicha respuesta mediante un modelo numérico de flujo ha hecho posible evaluar la interacción del nivel freático con las estructuras subterráneas próximas al río Ebro. Los resultados obtenidos han sido validados con afecciones documentadas demostrando la utilidad del modelo. Además, de estos resultados se desprende que un total de 107 edificios son susceptibles de interactuar con el agua subterránea donde las estructuras pueden llegar a ser sometidas a presiones hidrostáticas de hasta 0,7 kg·cm⁻² dependiendo de la profundidad de la estructura y de la crecida considerada.

Palabras clave: Inundación subterránea, relaciones río-acuífero, hidrogeología urbana, modelación matemática del flujo subterráneo.

Geogaceta, 57 (2015), 147-150.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 30 de junio de 2014
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

Introducción

La inundación subterránea produce diferentes daños incluyendo la desestabilización de cimentaciones, filtraciones de agua en estructuras subterráneas y re-movilización de contaminantes responsables de grandes pérdidas económicas en todo el mundo (Cobby *et al.*, 2009; Hughes *et al.*, 2011). Para estudiar la magnitud de este fenómeno en la ciudad de Zaragoza y explicar las afecciones producidas en la última década (Álvarez-Rodríguez, 2002; TRAGASA, 2006) se ha simulado la interacción río-acuífero de los últimos 11 años mediante un modelo numérico de flujo de agua subte-

rránea. Posteriormente se ha comparado el nivel del agua subterránea con la profundidad de los cimientos de los edificios próximos al río Ebro y se ha verificado las afecciones documentadas.

Zona de estudio

Con el objetivo de estudiar la respuesta hidráulica de las crecidas del río Ebro en el acuífero aluvial de Zaragoza se ha definido un dominio de 120 km² que abarca por completo el área metropolitana de la ciudad y 37, 7,4 y 7,1 km de los ríos Ebro, Gállego y Huerva respectivamente (Fig. 1A). La interacción de los ríos con el acuífero alu-

vial en su confluencia en el casco urbano de la ciudad crea un contexto hidrogeológico complejo. En general, el río Ebro y Gállego actúan como ejes de drenaje natural del aluvial que eventualmente, durante las crecidas, se producen fenómenos de almacenamiento en ribera importantes. El acuífero ha sido denominado "Acuífero Aluvial Urbano de Zaragoza" (Garrido *et al.*, 2006, 2010) y se conforma por dos dominios sedimentarios detríticos diferentes. Uno correspondiente a terrazas cuaternarias procedentes de la dinámica fluvial de los ríos Ebro y Gállego, y otro dominio asociado a abanicos aluviales procedentes del río Huerva. Los depósitos de terraza se consti-

tuyen por facies de canal con gravas silíceas y carbonatadas generalmente granosoportadas, que presentan gran continuidad lateral y varios metros de espesor (Luzón *et al.*, 2010). El espesor del acuífero varía entre 5 y 40 m, y el nivel freático se encuentra entre 7 y 34 m de profundidad. Los materiales que conforman el acuífero se apoyan sobre la Formación Yesos de Zaragoza de edad Oligocena-Miocena (Quirantes, 1978).

Las crecidas del río Ebro

Las principales crecidas que afectan al acuífero son las del río Ebro, tanto en términos de cota alcanzada como de caudal. Por ello se han seleccionado 18 crecidas representativas de la curva de gasto (Fig. 1B) obtenida en la estación de aforo nº 9011 del río Ebro perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Las crecidas seleccionadas se produjeron entre 2003 y 2014.

Modelo numérico de flujo

Para la simulación de la respuesta hidráulica del acuífero a las crecidas del Ebro se ha utilizado el código TRANSIN-IV (Medina y Carrera, 1996) mediante la interfaz gráfica VisualTRANSIN (GHS, 2003). El modelo regional elaborado se compone de una malla bidimensional no estructurada de 26778 elementos finitos triangulares y 13529 nodos. La malla presenta un refinamiento con elementos de 1 km en los extremos NO y SE a 50 m en el casco urbano. Partiendo de un régimen de flujo estacionario como condiciones iniciales y utilizando un incremento de tiempo constante diario se han simulado 11 años en régimen transitorio, desde 2003 a 2014.

Las condiciones de contorno más importantes son el río Ebro y el río Gállego ambas implementadas como condición de contorno mixta (Cauchy) transitoria según los respectivos hidrogramas de los ríos obtenidas de las estaciones de aforo más próximas, ambas dentro del dominio del modelo (Fig. 1A). El río Huerva y el Canal Imperial de Aragón (canal de regadío) se han considerado como condición de contorno mixta estacionaria. La conexión hidráulica entre el acuífero aluvial del río Ebro con los aluviales del río Gállego y del río Huerva, así como con el resto del acuífero se ha implementado en el modelo

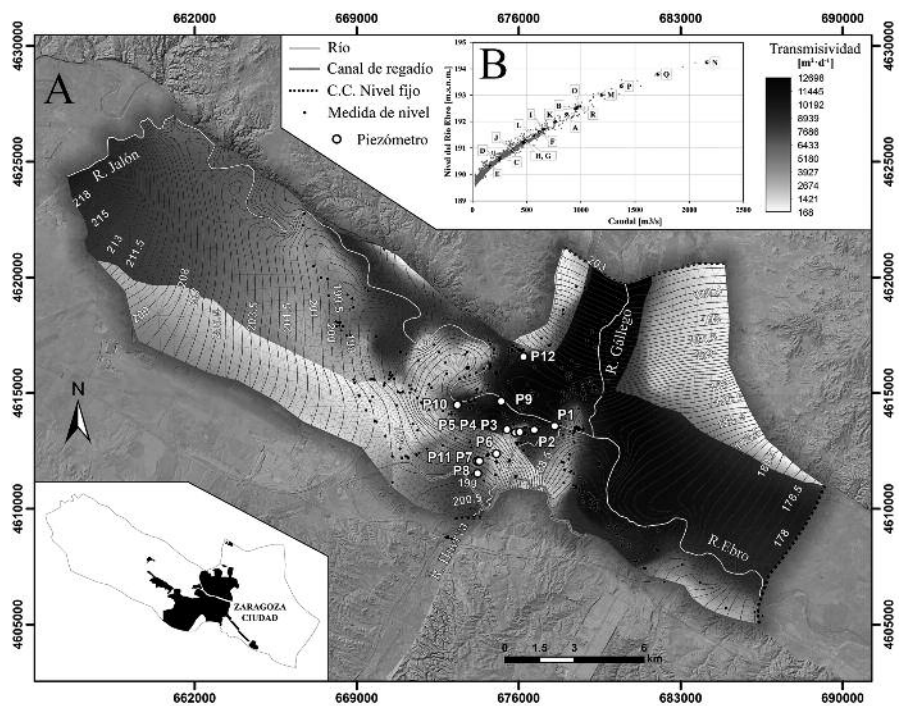


Fig. 1.- A) Localización de la zona de estudio, mapa de isopiezas para intervalos de 0,5 m durante la crecida "R" producida en 2013. Se muestra la red hidrográfica de la zona de estudio y las condiciones de contorno del modelo además del campo de transmisividades y los puntos de observación utilizados. B) Curva de gasto del río Ebro para la estación de aforo 9011 de la Confederación Hidrográfica del Ebro localizada en el sector central de la zona de estudio. En dicha curva de gasto se sitúan las 18 crecidas estudiadas.

Fig. 1.- A) Location of the investigated area with 0.5 head contours during the flood event "R" in 2013. The hydrographic network, boundary conditions of the model, transmissivity field and head observation points are also shown. B) Rating curve of Ebro River from gauging station located in central sector of the investigated area.

como condición de contorno de nivel fijo (tipo Dirichlet) constante correspondiente con isopiezas medidas en dichos límites (Fig. 1A). En concreto, en el límite NO se considera el río Jalón como límite hidráulico del acuífero asignando como nivel fijo las cotas del río hasta su desembocadura al río Ebro. La recarga superficial (condición Neumann) se ha considerado estacionaria considerando 2 zonas principales: una de 70 mm en zona urbana y 76 mm en el resto del dominio en concordancia con la recarga propuesta en trabajos anteriores (Garrido *et al.*, 2006).

La calibración del modelo se ha realizado utilizando datos de nivel piezométrico disponibles del inventario de puntos de agua de la CHE en 430 puntos diferentes. Además, con mayor peso para la calibración, se han utilizado datos de nivel piezométrico de alta cadencia procedentes de 12 piezómetros de la red de control creada y gestionada por el IGME para la CHE (IGME-CHE, 2009). Los resultados de la calibración se presentan en la figura 2. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos durante

el proceso para las terrazas y abanicos aluviales son de 245 y 80 m·día⁻¹ y un coeficiente de almacenamiento específico de 0,019 y 0,018 m⁻¹ respectivamente. El mapa de transmisividades utilizado se presenta en la figura 1A. El factor de goteo obtenido para los ríos Ebro y Gállego es de 9.200 y 12.000 m²·día⁻¹ respectivamente indicando una buena conexión hidráulica entre el río y el acuífero. Por el contrario, el factor de goteo para el río Huerva y el Canal Imperial de Aragón ha resultado de 0,1 y 0,0012 m²·día⁻¹ respectivamente lo que supone tasas de recarga muy bajas inferiores a 20 L·s⁻¹ por km lineal. Este bajo goteo es coherente con el hecho de que el río y el canal se encuentran sobre abanicos aluviales.

A partir de los resultados de la calibración se observa que los ajustes son buenos en general. No obstante existen diferencias notables en algunos puntos explicables probablemente por la existencia de un Azud en las proximidades del punto P1 o la existencia de bombes estacionales no implementados en el modelo (P6, P7 y P11).

Resultados y discusión

Una vez calibrado el modelo numérico los resultados obtenidos han servido para evaluar la interacción del nivel piezométrico con las estructuras subterráneas de la ciudad de Zaragoza en situaciones críticas correspondientes a las crecidas del río Ebro. Para ello se ha estimado la base de las cimentaciones de los edificios próximos (< 1,5 km) a la ribera del río Ebro. En concreto, se ha utilizado la aproximación realizada en trabajos previos (Álvarez-Rodríguez, 2002) en donde se considera el número de sótanos de un edificio y se multiplica por 3 m de profundidad media por sótano, obteniendo así la profundidad de la cimentación. Restando dicha profundidad de la cota topográfica correspondiente se obtiene la cota de la cimentación ahora comparable con el nivel piezométrico. En la figura 3 se muestra dicha comparación en función de la diferencia entre la cota de la base de la cimentación y de la superficie freática. Es decir, cuando el nivel freático se sitúa por encima de la cota de la base de la cimentación la diferencia de cota adquiere un valor negativo y viceversa.

En la figura 3A se muestran los resultados obtenidos de la comparación de cotas para cada edificio próximo al río Ebro. En esta figura se ha resaltado el inventario de edificios afectados por inundación subterránea extraído de TRAGASA (2006), básicamente se trata de daños causados por filtraciones de agua subterránea y fallos en los sistemas de drenaje de estructuras que se encuentran bajo el nivel freático durante todo el año. En ella se puede apreciar una correspondencia entre edificios donde se han documentado daños y los daños predichos por el modelo. Las incongruencias corresponden a situaciones donde el modelo predice una interacción entre la estructura y el nivel freático pero no existe afectación, o a situaciones en que se documenta una afectación y el modelo no lo predice. En el primer caso cabe la posibilidad de interpretar que el modelo carece de la precisión necesaria, que la afectación no se ha documentado, o bien, la estructura ha soportado la carga hidrostática debido a una buena impermeabilización y diseño estructural inicial. En el segundo caso cabe la posibilidad de que el modelo conceptual del modelo numérico necesita ser replanteado o que la aproximación realizada al número de sótanos y su altura es inexacto en ese caso.

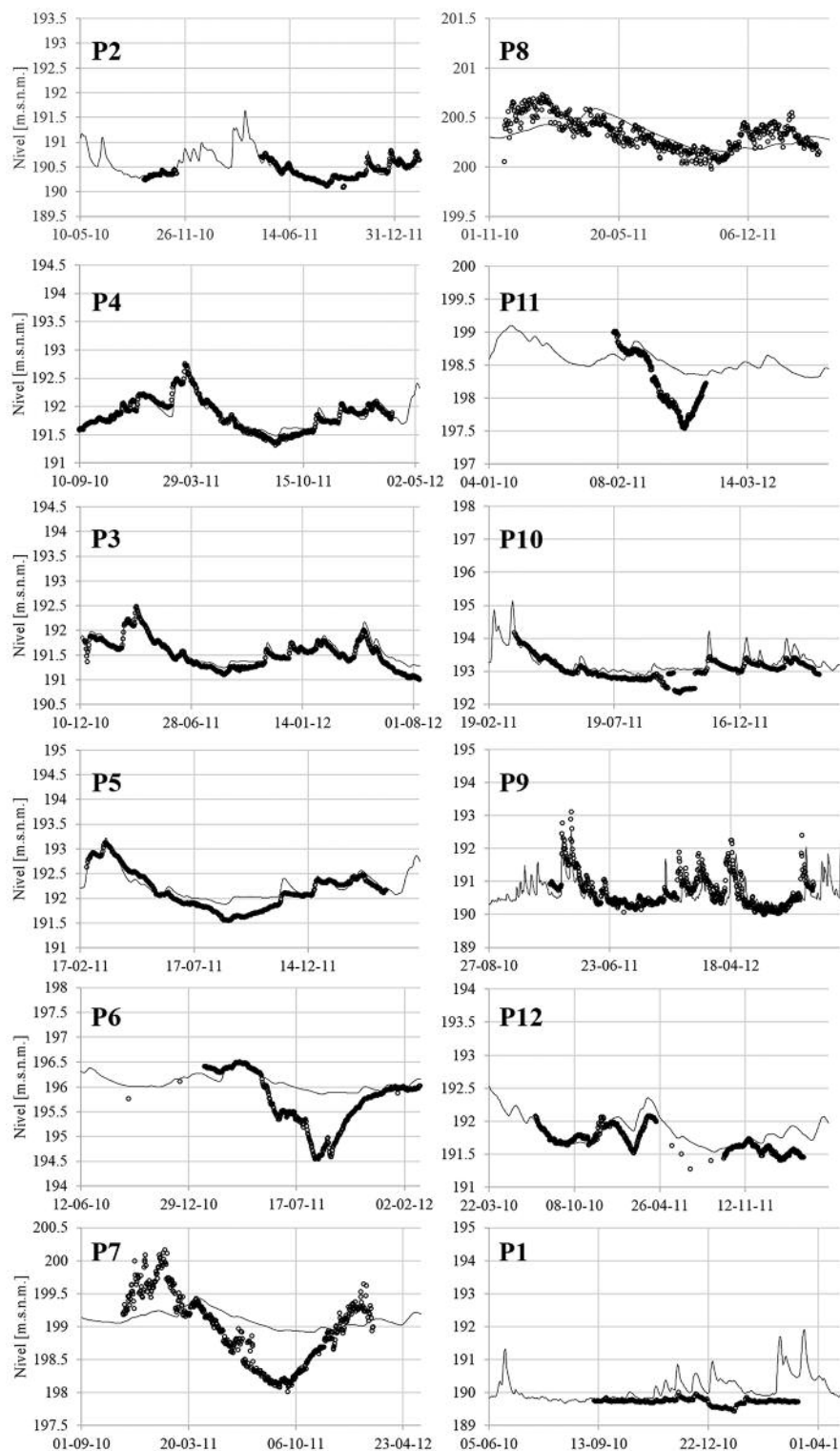


Fig. 2.- Resultados de la calibración del modelo numérico de flujo de agua subterránea. En línea continua se muestra los hidrogramas calculados y en círculos los datos de nivel medidos. La localización de los piezómetros se muestra en las figuras 1 y 3.

Fig. 2.- Calibration results obtained for the groundwater numeric model. The continuous line represents the calculated hydrographs and dots represent the measured data. Location of the piezometers are showed in figures 1 and 3.

Por último en las figuras 3B y C se presenta el número de edificios afectados en

función de las crecidas consideradas. Del gráfico se desprende que existen 46 edificios que siempre experimentan interacción con el nivel freático independientemente de

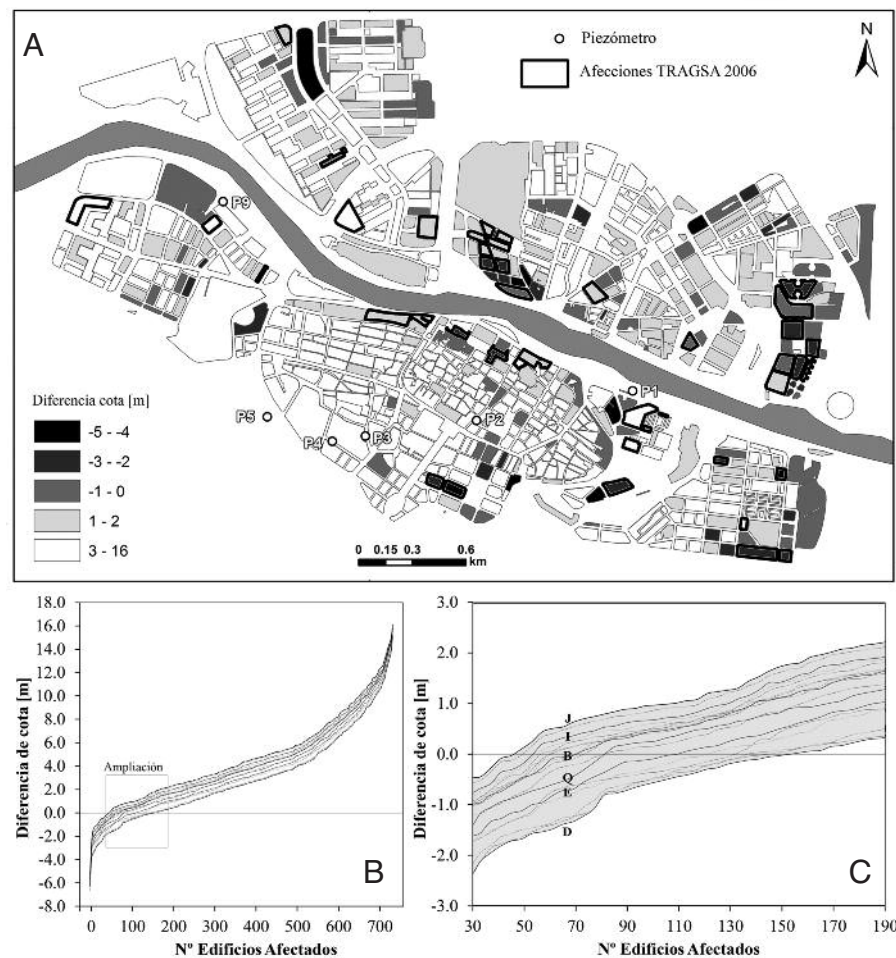


Fig. 3.- A) Mapa de afecciones de estructuras subterráneas debido a fenómenos de inundación subterránea en 2003 (Crecida "A"); afecciones documentadas en TRAGASA (2006) y predichas por el modelo numérico. B) Vulnerabilidad potencial de las estructuras subterráneas a las crecidas del río Ebro y C) una ampliación.

Fig. 3.- A) Groundwater inundation damage map in 2003 (flood event "A") including damages reported in TRAGASA (2006) and predicted by the model. B) Potential groundwater-building interaction and C) a ampliation.

la crecida considerada. Los edificios susceptibles de interactuar con el agua subterránea pasan de 46 con crecidas de 225 m³·s⁻¹ a 162 con crecidas de 2200 m³·s⁻¹. El resto de edificios no son susceptibles de interactuar con el nivel freático. En los casos más desfavorables los edificios llegan a soportar cargas hidráulicas de 6,6 m dependiendo de la profundidad de la base de la cimentación y de la crecida considerada. No obstante, con diferencias de cota de +2 m ya pueden existir fenómenos de capilaridad potencialmente conflictivos lo que podría llegar a afectar a más de 325 edificios. El grafico representa la vulnerabilidad potencial de los edificios cuantificando la carga hidrostática que soportaron en los últimos 10 años. Dada la reversibilidad del proceso esta aproximación sirve de referen-

cia para predecir futuras afecciones en función de las crecidas del río Ebro.

Conclusiones

Mediante la elaboración de un modelo numérico se ha simulado la respuesta hidráulica del acuífero aluvial urbano de Zaragoza a las crecidas del río Ebro. Los resultados del modelo han permitido evaluar la vulnerabilidad de las estructuras subterráneas a las variaciones de nivel freático inducidas por dichas crecidas. De los resultados obtenidos se destaca que un total de 162 edificios son susceptibles de interactuar con el agua subterránea directamente y 325 podrían estar sometidos indirectamente a fenómenos de capilaridad. Por último, en el escenario más desfavora-

ble las estructuras pueden llegar a ser sometidas a presiones hidrostáticas de hasta 0,7 kg·cm⁻² dependiendo de la profundidad de la cimentación y de la crecida considerada.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado por la Universidad de Zaragoza-IDAEA con datos obtenidos por el IGME en el marco del Convenio de Colaboración entre el IGME y la CHE para el estudio del impacto térmico generado por los pozos de climatización en la ciudad de Zaragoza. Este trabajo ha sido financiado, en parte, por el proyecto de MICINN: CGL2009-09165BTE, FEDER, Fondo Social Europeo y Grupo de Análisis de Cuencas Sedimentarias Continentales del Gobierno de Aragón. Alejandro García Gil agradece la ayuda económica recibida del Gobierno de Aragón a través del programa de subvenciones destinadas a la formación y contratación de personal investigador (DGA 2012).

Referencias

Álvarez-Rodríguez, A. (2002). *Informe técnico CEDEX* (Ed.), 90 p.

Cobby, D., Morris, S., Parkes, A. y Robinson, V. (2009). *Journal of Flood Risk Management* 2, 111-119.

Garrido, E., García, M., Arce, M. y Serrano, J. (2006). *Hidrogeología y Aguas subterráneas* 21, 335- 342

Garrido, E., Sánchez Navarro, J.A. y Coloma, P. (2010). *Geogaceta* 49, 115-118.

Grupo de Hidrología Subterránea (GHS) (2003). *Visual Transin Code Manual*, 103 p.

Hughes, A.G., Vounaki, T., Peach, D.W., Ireson, A.M., Jackson, C.R., Butler, A.P., Bloomfield, J.P., Finch, J. y Wheeler, H.S. (2011). *Journal of Flood Risk Management* 4, 143-155.

IGME-CHE (2009). *Convenio específico de colaboración IGME-CHE para el análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza*. Ref. 2009/07.

Luzón, A., Pérez, A., Soriano, A., Gil, H., Yuste, A. y Pocoví, A. (2010). *Geogaceta* 48, 11-14.

Medina, A. y Carrera, J. (1996). *Water Resources Research* 32, 3063-3076.

Quirantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Tesis Doctoral, Departamento de Sedimentología y Suelos (CSIC), 200 p.

TRAGASA (2006). *Trabajos de asistencia técnica en relación con la construcción del azud del Ebro*. Informe técnico, 416 p.