

# Sondeos surgentes en la zona de descarga de acuíferos costeros libres: efectos sobre la interfase agua dulce-agua salada

*Artesian wells in the discharge zone of unconfined coastal aquifers: effects on the freshwater-saltwater interface*

Juan Pedro Sánchez Úbeda<sup>1</sup>, María Luisa Calvache Quesada<sup>1</sup>, Carlos Duque Calvache<sup>1, 2</sup>, José Manuel Gómez Fontalva<sup>1</sup> y Manuel López Chicano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica. Avda. Fuentenueva s/n 18071. Universidad de Granada. 18071 Granada, España.

juampesu@ugr.es, calvache@ugr.es, cduque@ugr.es, chemagomez@ugr.es, mlopezc@ugr.es

<sup>2</sup> Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway.

## ABSTRACT

The presence of vertical flow in the discharge zones of coastal aquifers is regarding to specific configuration and quiet common of the flow patterns in these areas. In Motril-Salobreña coastal aquifer it has been verified through the drilling of an artesian well near the shoreline. There have been several 3D mathematical flow models with variable density by SEAWAT to reproduce the effects of the opening of the artesian well on the flow configuration and salinity distribution around the saltwater-freshwater interface. Results show a better fit with observed values (in the artesian well and other nearby points) when the artesian well is modelled as a drain with respect to a pumping well. The main detected affection is determinant in the salinity distribution, causing further expansion of the mixing zone into the aquifer and intrusion of brackish water into the well. The distribution of the slotted intervals and the piezometric head in the drain well determine the depths of greatest contribution of the upwelling water, together with the defined anisotropy and heterogeneity in the model.

**Key-words:** Unconfined coastal aquifer, vertical flow, saline wedge, numerical model, artesian well.

## RESUMEN

La presencia de flujos verticales en las zonas de descarga de acuíferos costeros responde a una configuración específica y bastante común de los patrones de flujo en estas áreas. En el acuífero costero Motril-Salobreña ha sido constatado gracias a la perforación de un sondeo surgente cerca del borde costero. Se han realizado diferentes modelos matemáticos de flujo en 3D con densidad variable mediante SEAWAT para reproducir los efectos de la apertura del sondeo surgente sobre la configuración del flujo y la distribución de salinidad en el entorno de la interfase agua dulce-agua salada. Los resultados muestran un mejor ajuste a los datos observados (en el sondeo surgente y en otros sondeos cercanos) cuando el sondeo es modelado como un dren respecto a un bombeo. La afeción principal detectada resulta determinante en la distribución de salinidades, provocando una mayor expansión de la zona de mezcla hacia el interior del acuífero y una intrusión de agua salobre en el mismo sondeo. La disposición de los tramos filtrantes y la altura piezométrica en el sondeo determinan las profundidades de mayor aporte de agua surgente, junto con la anisotropía y heterogeneidad definida en el modelo.

**Palabras clave:** Acuífero costero libre, flujo vertical, cuña salina, modelo numérico, sondeo surgente.

Geogaceta, 57 (2015), 139-142.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 29 de junio de 2014  
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014  
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

## Introducción

La distribución de las líneas de flujo y equipotenciales en la zona de descarga de un acuífero libre con borde costero ha sido definida en numerosas ocasiones, de las cuales destaca el modelo de Glover (1959), que sienta las bases para un mejor entendimiento de la descarga subterránea al mar. De este se deduce la existencia de fuertes componentes verticales de flujo en las proximidades de la línea de costa, debido en gran parte al estrechamiento de dicha zona de descarga por la formación de una cuña

salina inferior, en delicado equilibrio con el agua dulce del acuífero (Kohout, 1964). El esquema de la figura 1 muestra los principales aspectos que configuran la zona de descarga de un acuífero libre costero y la distribución esperada del flujo. El acuífero Motril-Salobreña reúne los requisitos necesarios para un estudio de estas características. Por un lado, es un acuífero costero con elevada recarga y bajas extracciones, y por otro, se dispone de algunos sondeos profundos en los que se han detectado flujos verticales que generan la surgencia de agua subterránea (Duque *et al.*, 2010).

A 300 m del borde costero se sitúa el sondeo surgente utilizado en el presente estudio. Su profundidad total es de 250 m, a lo largo de la cual se instalaron doce tramos ranurados (Tabla I). La columna litoló-

### Intervalos de profundidad (m)

37-40	115-118	205-208
70-73	130-133	214-220
85-88	151-154	226-229
100-103	166-169	235-238

Tabla I.- Intervalos ranurados del sondeo surgente.

Table I.- Slotted intervals of the artesian well.

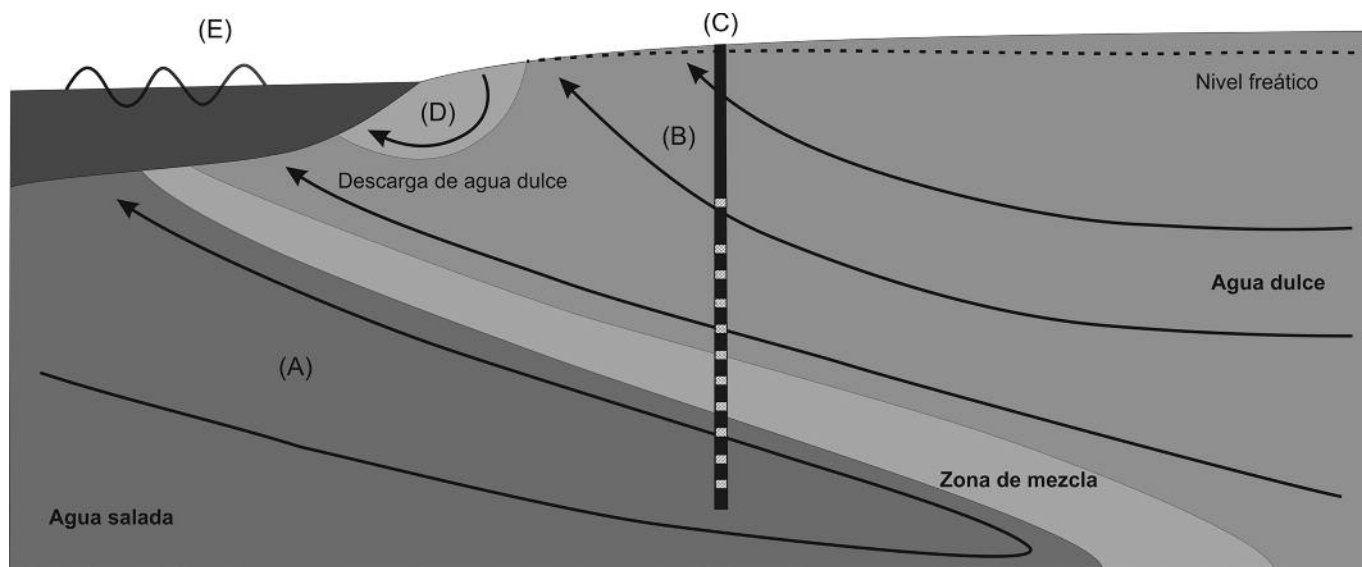


Fig. 1.- Esquema general de la zona de descarga en un acuífero libre costero. (A) zona de circulación por densidad, (B) zona de flujo vertical ascendente, (C) sondeo surgente, (D) recirculación de agua salada y (E) oscilación mareal. Modificado de Werner *et al.* (2013).

Fig. 1.- General scheme of the discharge zone in an unconfined coastal aquifer. (A) density-driven flow zone, (B) vertical flow zone, (C) artesian well, (D) seawater recirculation zone and (E) tidal oscillation. Modified from Werner *et al.* (2013).

gica en este punto se puede simplificar en 3 unidades. Desde la superficie hasta los 65 m dominan arenas finas con limos y algunas intercalaciones de gravas. Desde esta profundidad hasta alrededor de los 135 m se detectaron gravas con cantos de diámetros centimétricos mezcladas con arena. Desde aquí hasta el fondo aparecen abundantes arcillas con capas de gravas intercaladas y de poca potencia.

**Modelo numérico**

Para el modelo numérico 3D se ha utilizado el programa de cálculo *Visual-MODFLOW*, con los códigos *MODFLOW2005* y *SEAWAT*, con el fin de obtener tanto los patrones del flujo subterráneo como la distribución de la salinidad en la zona de descarga (densidad variable). El mapa conceptual desarrollado para modelar dicha zona se muestra en un corte perpendicular

a la línea de costa, en la figura 2, junto con las condiciones de contorno y las dimensiones consideradas. El borde derecho se ha tomado a 5 km de la costa, con el fin de que afectara lo mínimo posible esta condición de contorno en el sector costero, que constituye el área de verdadero interés en este estudio. El borde izquierdo está constituido por un contacto acuífero-mar inclinado (pendiente media obtenida según los perfiles de batimetría en Jabaloy-Sánchez *et al.*, 2014). La parte del mar se ha considerado dentro del dominio del modelo, siendo celdas de cálculo con una permeabilidad asignada extremadamente alta. El resto del modelo lo componen 25 capas de celdas horizontales, repartidas en 7 estratos inclinados, diferentes en función de sus permeabilidades ( $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$ ), constituyendo en conjunto un acuífero multicapa y anisótropo (Fig. 2). El borde derecho tiene condición de nivel constante de 30 m y concentración

constante de 0.5 gr/L. El borde superior izquierdo (nivel del mar) tiene condición de nivel constante e igual a 0 m y concentración constante de 35 gr/L. El resto de bordes es de no flujo.

**Metodología**

Como un paso previo se ha obtenido un modelo estacionario sin cuña de agua salada, calculando mediante *MODFLOW2005* la distribución de líneas de flujo y equipotenciales. Posteriormente se ha calculado un nuevo modelo en densidad variable con *SEAWAT*, utilizando como condición inicial el resultado del anterior, obteniendo en este caso un estado de equilibrio de la cuña salina en condiciones naturales a partir de los 20 años de simulación. Obtenida esta situación de estabilidad entre descarga e intrusión de la cuña (calibrada con datos del sondeo surgente cerrado y otros puntos

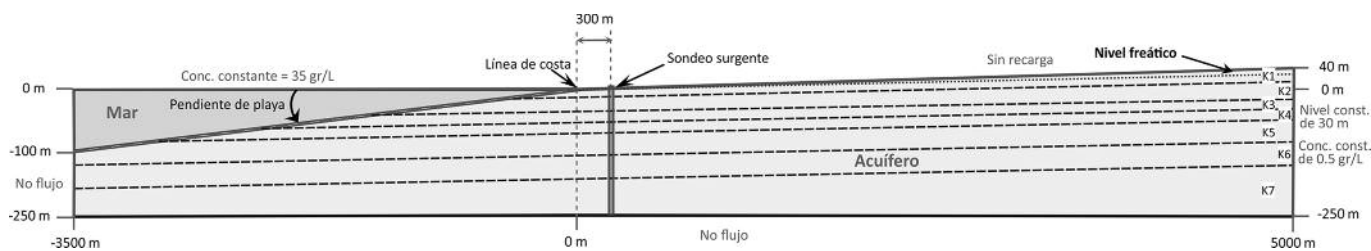


Fig. 2.- Mapa conceptual del modelo realizado. El texto gris claro explica las condiciones de contorno consideradas en la construcción del modelo. KX representa las diferentes zonas o estratos en función de sus permeabilidades ( $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$ ).

Fig. 2.- Conceptual map of the performed model. Light grey text explains the boundary conditions considered in the model building. KX represents the different zones or layers according to their permeability values ( $k_x$ ,  $k_y$  and  $k_z$ ).

aguas arriba), se ha añadido el sondeo surgente, definiéndolo de dos modos diferentes: como un bombeo con sus doce intervalos filtrantes, y como un multidren, con tramos drenantes en los mismos intervalos. Para ajustar la descarga por el sondeo en ambos casos, se ha igualado la cantidad drenada a la bombeada, ajustada también al promedio de los valores aforados en dicho punto.

Para la simulación en ambos supuestos (bombeo y dren) se han tomado los mismos pasos de tiempo, siendo el cálculo diario, hasta un intervalo total de 30 días de apertura del sondeo. La calibración posterior se

ha realizado sobre los resultados finales obtenidos a los 30 días, considerando los valores observados y calculados para las diferentes profundidades filtrantes del sondeo.

### Resultados y discusión

Los perfiles obtenidos para cada caso de simulación del sondeo surgente muestran diferencias significativas, tanto en la distribución del flujo como en la morfología de la interfase agua dulce-agua salada.

En el primer caso considerado, en el cual se ha modelado el sondeo como un

bombeo (Fig. 3), la perturbación de las líneas equipotenciales en la zona cercana al sondeo ya es patente en 10 días de apertura (Fig. 3A), pero resulta bastante más pronunciado a los 20 días y a los 30 días de apertura (Figs. 3B y C, respectivamente). La carga hidráulica en este caso cae principalmente en la parte más profunda del sondeo, donde provoca una dilución localizada de la cuña salina por succión de agua más dulce, pero sin provocar modificación alguna en el contacto agua dulce-agua salada más allá de dicha perturbación alrededor del sondeo. Por tanto, los valores de concentración alrededor del sondeo re-

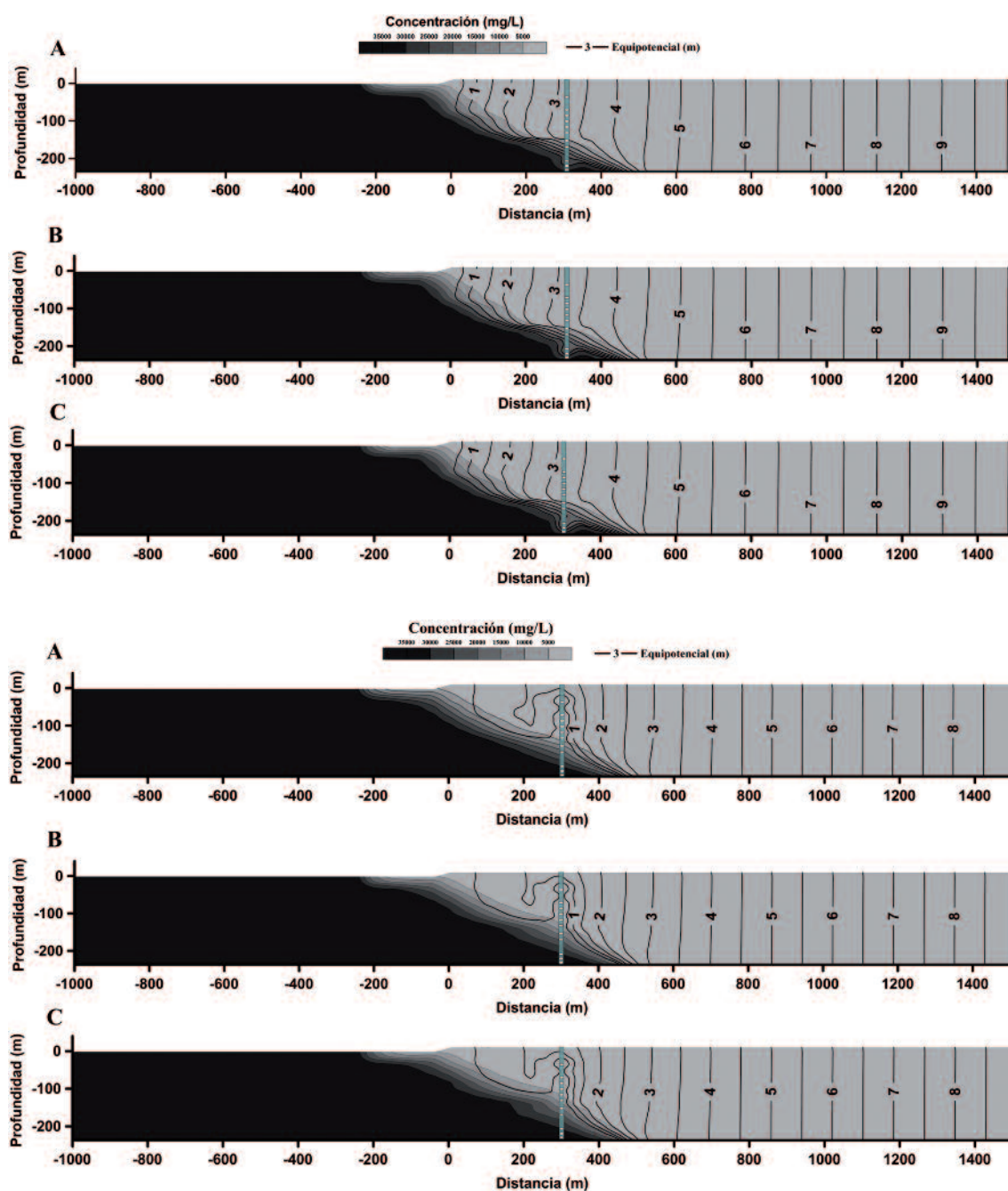


Fig. 3.- Perfiles de concentración y líneas equipotenciales en el supuesto de simulación del sondeo surgente como bombeo, para (A): 10 días, (B): 20 días y (C): 30 días.

Fig. 3.- Profiles of concentration and equipotential lines on the assumption of simulation of the artesian well as a pumping well, for (A): 10 days, (B): 20 days and (C): 30 day30.

Fig. 4.- Perfiles de concentración y líneas equipotenciales en el supuesto de simulación del sondeo surgente como multidren, para (A): 10 días, (B): 20 días y (C): 30 días.

Fig. 4.- Profiles of concentration and equipotential lines on the assumption of simulation of the artesian well as a multi draining well, for (A): 10 days, (B): 20 days and (C): 30 days.

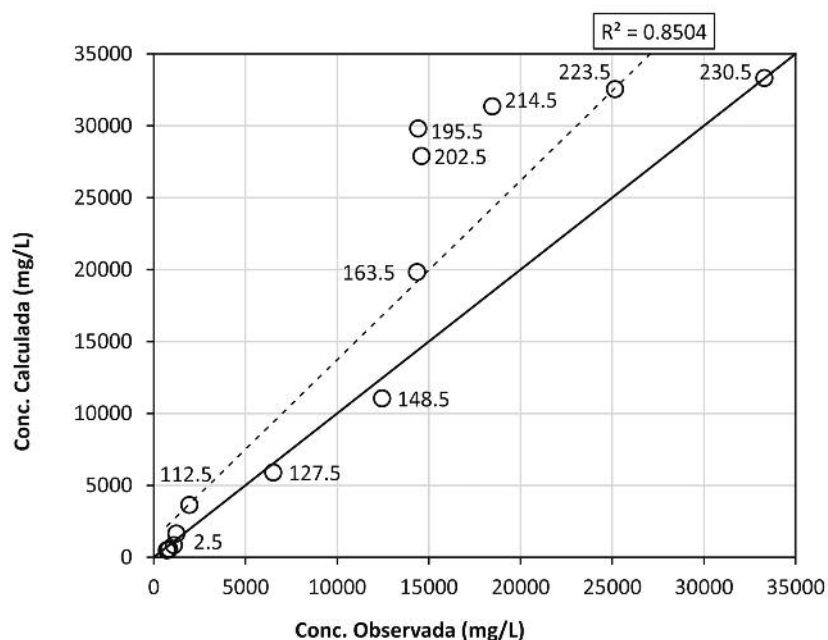


Fig. 5.- Datos de concentración calculados frente a observados para 30 días en el caso de simulación del sondeo como dren. La línea continua representa la correlación igual a 1 y la línea punteada representa el ajuste lineal de todos los puntos dentro del propio sondeo. Valores de profundidad en metros.

Fig. 5.- Calculated versus observed concentration data for 30 days in the case of well as a drain. Solid line is the correlation equal to 1 and dotted line is the lineal fit of all data points into the well. Depth values in meters.

sultan más bajos de lo esperado (menores a los medidos), hecho observado también en estudios similares (Jorroto *et al.*, 2009).

En el segundo supuesto de simulación, en el cual el sondeo ha sido definido como un dren (Fig. 4), la modificación de los patrones de flujo varían de forma drástica en gran parte de la zona de descarga, produciendo un descenso generalizado en toda la zona, pero más pronunciado entre el sondeo y la costa, aguas abajo. Este cambio es observado desde los 10 días de apertura (Fig. 4A), permaneciendo prácticamente estable a los 20 y 30 días de apertura (Figs. 4B y C, respectivamente). En cuanto a la distribución de la concentración, al contrario que en el caso anterior, los diferentes intervalos drenantes del sondeo captan salinidades mayores en el tiempo, dando lugar a un ensanchamiento y cierta deformación de la zona de mezcla o interfase, como se aprecia en la figura 4C para 30 días de apertura.

Otro aspecto determinante en el caso del dren resulta ser la altura o nivel de agua asignado al mismo, pues determina de forma directa la profundidad de captación que tiene el dren, es decir, hasta qué equipotencial capta el dren o tramo drenante,

por debajo de la cual no recibe agua por ser equipotenciales menores.

En cuanto a la calibración del modelo, tras comparar los valores medios medidos con los calculados para cada una de las profundidades filtrantes consideradas y en cada caso de simulación, se ha obtenido un mejor ajuste en el caso del sondeo surgente como dren (Fig. 5), en especial en la zona de agua de menores concentraciones, donde la captación de agua salada más profunda da como resultado una mezcla de concentración variable. Sin embargo, los valores de concentración obtenidos para los tramos más profundos resultan más desviados de los observados, posiblemente debido a la falta de precisión en la anisotropía y heterogeneidad de la capa más profunda del modelo. A estas profundidades, el acuífero presenta varios niveles más groseros de poca potencia (y presumiblemente con conductividades hidráulicas mayores), dentro de un tramo mayoritariamente arcilloso. No obstante, estos parecen tener cierta influencia en el aporte de agua dulce cuando el sondeo surgente permanece abierto, según los resultados obtenidos.

## Conclusiones

La simulación numérica del flujo con densidad variable en el entorno de descarga de acuíferos costeros con flujos verticales ascendentes ha resultado una herramienta muy útil para reproducir la hidrodinámica de estos sistemas. Se ha demostrado que los sondeos surgentes pueden ser reproducidos mediante un dren. Sin embargo, resulta determinante el buen ajuste del nivel en este caso, de modo que la captación de agua en profundidad sea coherente con los valores observados de concentración.

La conductividad hidráulica, la anisotropía y la alternancia de capas de distintas propiedades modifican las líneas de flujo, la posición de la interfase agua dulce-agua salada y la profundidad a la que pueden captar agua los pozos surgentes, por lo que se debe conseguir un considerable acercamiento a la realidad a la hora de diseñar y calibrar el modelo, con el que posteriormente poder simular situaciones como la de este caso de estudio.

## Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a los fondos del CGL2012-32892 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y del grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369.

## Referencias

- Duque, C., López-Chicano, M., Calvache, M.L., Pedrera, A., Galindo, J., Crespo, F. y Gómez-Fontalva, J.M. (2010). In: *XXI SWIM (Salt Water Intrusion Meeting)*. Las Azores, Portugal, 113-116.
- Glover, R.E. (1959). *Journal of Geophysical Research* 64(4), 457-459.
- Jorroto, S., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Sánchez-Martos, F. y Francés, I. (2009). *Comptes Rendus Geoscience* 341, 993-1002.
- Jabaloy-Sánchez, A., Lobo F. J., Azor, A., Martín-Rosales, W., Pérez-Peña, J.V., Bárcenas, P., Macías, J., Fernández-Salas, L.M. y Vázquez-Vilchez, M. (2014). *Geomorphology* 206, 374-391.
- Kohout, F.A. (1964). *US Geological Survey Water Supply paper* 1616-C, 12-32.
- Werner, A., Bakker, M., Post, V., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. y Barry, D. (2013). *Advances in Water Resources* 51, 3-26.