

# Método PLR para la separación del flujo de base continuo y su aplicación con la serie temporal del río Bergantes

*PLR method for the separation of continuous base flow and its application with the time series of the Bergantes river*

Jesús Mateo Lázaro<sup>1</sup>, José Á. Sánchez Navarro<sup>1</sup>, Alejandro García Gil<sup>1</sup>, Vanesa Edo Romero<sup>1</sup> y Jorge Castillo Mateo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza, España.

[jesmteo@unizar.es](mailto:jesmteo@unizar.es) / [joseange@unizar.es](mailto:joseange@unizar.es) / [a.garcia@igme.es](mailto:a.garcia@igme.es) / [vanesa\\_edo@hotmail.com](mailto:vanesa_edo@hotmail.com)

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas. Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza, España.

[720193@unizar.es](mailto:720193@unizar.es)

## ABSTRACT

The main objective of this work is to present the models based on Parallel Linear Reservoirs (PLR models) as an ideal method to carry out the base-flow separation from time series of total discharge. A new method of analysis and separation of flow components based on equations of dynamic relations between parallel connected deposits is developed in this article. Reference is also made to the methodology of adjustment and calibration of PLR models based on the recession curves of the real hydrographs. The Dynamic Relations equation sets up a single solution for the parameters that govern PLR models, and allows the separation of the flow components as an optimal mathematical solution. With these models more than two flow components can be established to assess the water routing through the basin. The models are tested against the continuous register of the Bergantes river located in the NE of Spain. Simulations were carried out with two reservoirs (2R models) and with three reservoirs (3R models). With the results of the models, flow duration curves (FDCs) were elaborated, thus allowing assessing the origin of the water resources of the basin, their guarantee of regulation and availability.

**Key-words:** Availability of water resources; base-flow separation; analysis of recession curves; PLR models; SHEE software.

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es presentar modelos basados en depósitos lineales en paralelo (PLR) como método idóneo para la separación del flujo de base a partir de series temporales de descarga total. Se desarrolla un nuevo método de análisis y separación de las componentes de flujo basado en ecuaciones de relaciones dinámicas entre depósitos conectados en paralelo. También se hace referencia a la metodología de ajuste y calibración de los modelos PLR a partir de curvas de recesión de hidrogramas reales. La ecuación de relaciones dinámicas establece una solución única para los parámetros que rigen los modelos PLR, y permite separar las componentes de flujo como una solución matemática óptima. Con estos modelos, para evaluar el recorrido del agua a través de la cuenca, se pueden establecer más de dos componentes de flujo. Con el registro continuo del río Bergantes se hacen simulaciones de modelos de dos depósitos (2R), y de tres depósitos (3R), y se elaboran curvas de probabilidad de excedencia (FDCs), que son idóneas para evaluar el origen del recurso hídrico de la cuenca, su garantía de regulación y su disponibilidad.

**Palabras clave:** Disponibilidad de recursos hídricos; separación del flujo de base; análisis de curvas de recesión; modelos PLR; programa SHEE.

*Geogaceta*, 62 (2017), 99-102  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 5 de febrero de 2017  
Revisión: 26 de marzo de 2017  
Aceptación: 26 de abril 2017

## Introducción

En este artículo se desarrolla una nueva metodología para la separación en componentes de flujo, de las series temporales de caudal total, registrado en las estaciones de aforo. El método se basa en modelos de depósitos lineales en paralelo (PLR) y más concretamente en la ecuación de relaciones dinámicas propuesta por Mateo-Lázaro *et al.* (2015), que tiene tres puntos a destacar: (1) La ecuación facilita la etapa de calibración que, mediante ajuste de mínimos cuadrados determina una única y óptima

solución, frente a otras metodologías que encuentran soluciones con selección manual en la estimación de parámetros. Tal sería el caso de los ajustes logarítmicos o gráficos de los modelos de celdas. (2) Normalmente se establece una separación de flujo en dos componentes, rápido y lento, pero con los modelos PLR puede haber componentes intermedias que, en ocasiones, representan bien los reservorios reales de las cuencas. (3) A diferencia de otras metodologías, con ésta, si se conoce una componente o la descarga total, la ecuación de relaciones dinámicas permite deducir las

demás componentes de flujo como solución única, sin necesidad de realizar estimaciones de reparto de flujo de forma manual.

Los modelos de depósitos han sido usados tradicionalmente en hidrología para representar diferentes estadios y características de las cuencas.

El flujo de base de los cauces superficiales y manantiales lleva siendo estudiado durante más de un siglo (Boussinesq, 1877; Maillet, 1905). Moore (1997), Griffiths y Clausen (1997), y Dewandel *et al.* (2003) sintetizan una gran cantidad de trabajos de esta disciplina.

### Fundamentos del método PLR

En los modelos PLR, las relaciones dinámicas entre depósitos se rigen por la ecuación 1, definida por primera vez en Mateo-Lázaro *et al.*, (2015).

$$\left(\frac{Q_i}{Q_{0i}}\right)^{\frac{1}{\alpha_i}} = \left(\frac{Q_i}{Q_{0i}}\right)^{\frac{1}{\alpha_i}} = \left(\frac{Q_{nr}}{Q_{0nr}}\right)^{\frac{1}{\alpha_{nr}}} \quad [1]$$

donde nr es el número de reservorios (también llamados celdas y depósitos) que componen el modelo. En modelos de dos depósitos, uno representa el flujo rápido y el otro es el flujo de base.  $Q_{0i}$  and  $\alpha_i$  son parámetros del modelo que se determinan a partir de curvas de recesión de los hidrogramas.  $\alpha_i$  se denomina coeficiente de recesión o decaimiento (*depletion or recession coefficient*), y también se conoce como factor de respuesta (*response factor*).  $Q_{0i}$  es, en un instante dado, el caudal que proviene del depósito i, siendo el mismo instante para todos los  $Q_{0i}$ .

En Mateo-Lázaro *et al.*, (2017) se expone detalladamente el desarrollo matemático completo del método de separación de flujo con la ecuación 1. Otros ejemplos de aplicación se pueden encontrar en Mateo-Lázaro *et al.* (2013, 2014, 2015, 2016a, 2016b y 2017).

#### Calibración de los modelos PLR

Para usar el modelo, previamente se calibran los parámetros de control  $Q_{0i}$  y  $\alpha_i$  a

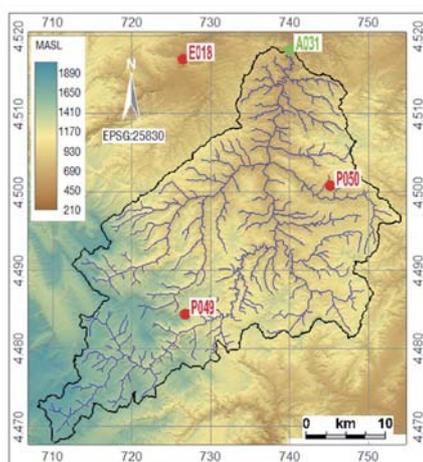


Fig. 1.- Altimetrical representation of the Bergantes watershed, with the locations of the stream gauge (green color) and rain gauges (red and green colors). See color figure in the web.

Fig. 1.- Altimetrical representation of the Bergantes watershed, with the locations of the stream gauge (green color) and rain gauges (red and green colors). See color figure in the web.

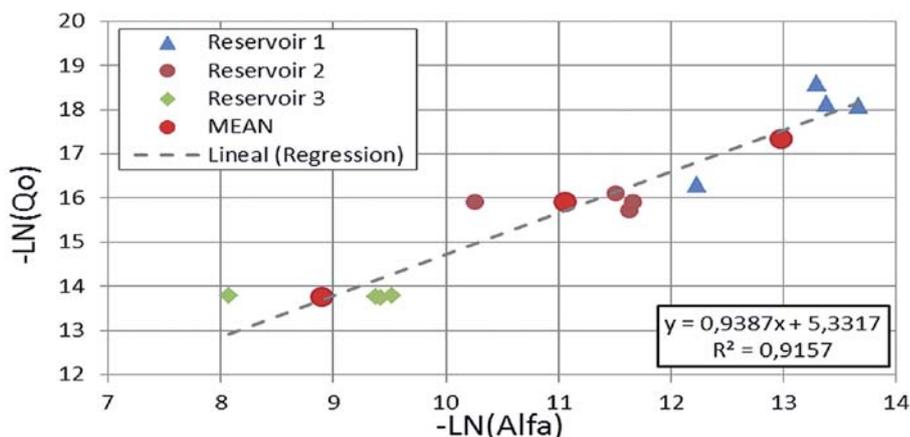


Fig. 2.- Calibration parameters,  $Q_0$  and  $\alpha$ , of the 4 recession curves for the 3R model. See color figure in the web.

Fig. 2. Calibration parameters,  $Q_0$  and  $\alpha$ , of the 4 recession curves for the 3R model. See color figure in the web.

partir de curvas de recesión de la serie temporal de descarga.

Las curvas de recesión son segmentos del hidrograma fuertemente condicionados por la aportación de agua desde los reservorios naturales, es decir, que representan la respuesta de la suma de múltiples contribuciones provenientes de los reservorios naturales de las cuencas.

Estos segmentos pueden analizarse individual o colectivamente. Se adopta tradicionalmente un enfoque gráfico, sin embargo, en Mateo-Lázaro *et al.* (2015), recientemente se desarrolla un método completamente automático basado en el ajuste mediante mínimos cuadrados combinando la ecuación de Maillet (1905) con la ecuación 1 de relaciones dinámicas.

#### Aplicación al río Bergantes

La aplicación de la metodología descrita se ha llevado a cabo con la serie temporal de descarga del río Bergantes en la estación de aforos A031 del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAHI) del Ministerio de Medio Ambiente de España. Los registros de la serie son cada 15 minutos, comienzan el 6 de febrero de 1997 y terminan el 18 de mayo de 2015 resultando unos 620.000 registros. En la figura 1 se representa la Cuenca del río Bergantes, su relieve, la red de drenaje y la estación de aforo.

### Resultados

#### Establecimiento de modelos PLR

Para establecer los modelos PLR se han seleccionado 4 curvas de recesión representativas aplicando la metodología de ajuste para dos tipos de modelo, de 2 depósitos (2R) y de 3 depósitos (3R). Los parámetros de las 4 curvas se proyectan en la figura 2 en escala logarítmica,  $-\ln(\alpha)$  vs  $-\ln(Q_0)$  para el modelo 3R, donde los parámetros están alineados. El modelo genérico aplicable a la serie temporal completa se establece con la media de los parámetros de cada modelo de evento, que es la resultante que arroja mejor ajuste por mínimos cuadrados y se acerca a la recta de regresión. En la tabla I se dan los parámetros de cada modelo genérico 2R y 3R.

#### Separación de flujos con modelos PLR

Con los parámetros  $Q_0$  y  $\alpha$  de los modelos genéricos de la tabla I, se ha realizado la separación del flujo de cada depósito para la serie continua. En las figuras 3 y 4, se representan 6 tramos que pertenecen a la serie temporal del Bergantes.

El flujo de base del modelo 3R, es menor que en el modelo 2R, pero se contempla un depósito intermedio que influye decisivamente en la regulación de la cuenca.

Model	Alfa1	Alfa2	Alfa3	Qo1	Qo2	Qo3
2R	4,54E-06	4,33E-05		7,48E-08	2,69E-07	
3R	2,30E-06	1,57E-05	1,37E-04	2,85E-08	9,68E-08	2,32E-07

Tabla I.- Parámetros de calibración de los modelos 2R y 3R.

Table I.- Calibration parameters of the 2R and 3R models.

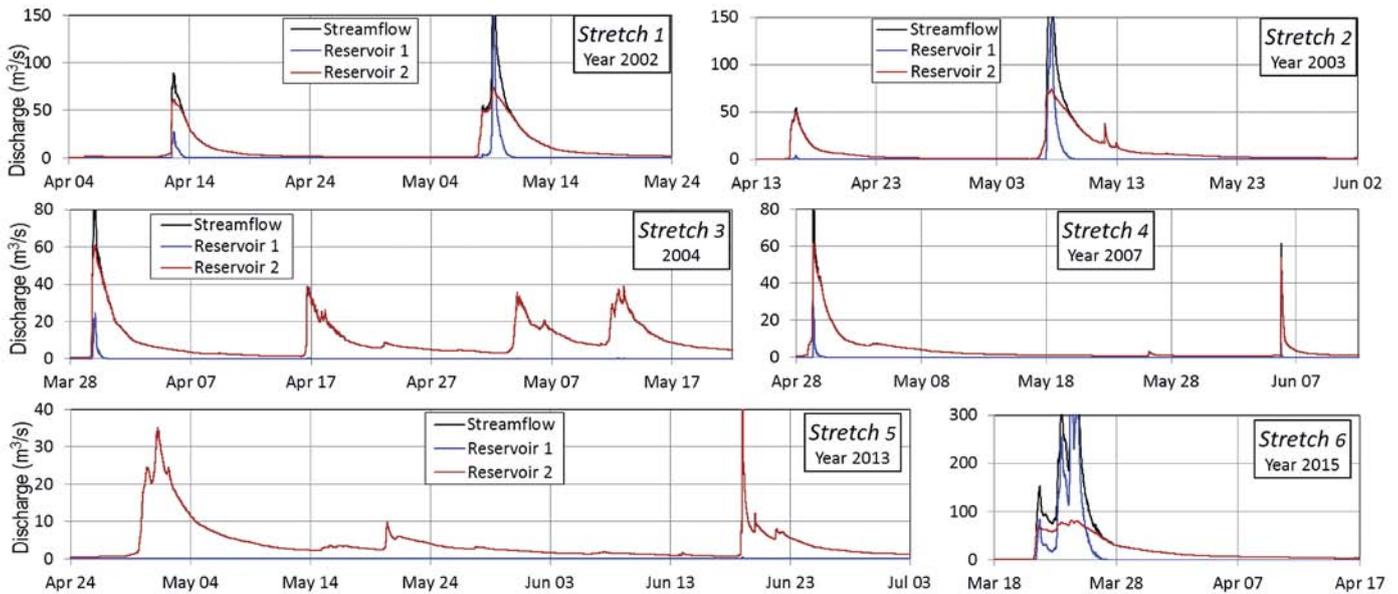


Fig. 3.- Separación de flujo con el modelo 2R, para los seis tramos seleccionados de la serie temporal de la cuenca del río Bergantes. Ver figura en color en la web.  
 Fig. 3.- Flow separation with the 2R model for the six stretch selected of the time series of the Bergantes river catchment. See color figure in the web.

Desde el punto de vista puramente matemático ambos modelos, 2R y 3R, se pueden ajustar con un gran rendimiento a las curvas de recesión reales, pero en términos de conceptos convencionales de separación del flujo de base, el modelo 3R parece más plausible que 2R, especialmente con caudales bajos o moderados (menores de 40-50 m³/s), que son los que circulan con mayor frecuencia.

Esta cuenca se podría describir con tres flujos, uno rápido correspondiente al flujo superficial que tiene relevancia durante las crecidas del río. Un flujo inter-

medio que se podría correlacionar con la circulación en galerías cársticas de mayor tamaño y flujo difuso, y un tercer flujo lento que correspondería a la circulación a través de diaclasas de acuíferos cársticos y a los suelos granulares de las terrazas aluviales.

**Discusión y Conclusiones**

La ecuación de relaciones dinámicas entre depósitos ecuación 1 (Mateo-Lázaro et al., 2015), permite establecer modelos de separación de flujo en dos o más compo-

nentes y con muy pocos parámetros ( $Q_{oi}$  and  $\alpha_i$ ), es decir, son *parsimonious models*, término como se les conocen en el mundo anglosajón.

*Flow duration curves (FDCs)*

Con la serie temporal completa y los resultados de separación de flujo, en la figura 5 se han generado curvas de probabilidad de excedencia (FDCs) para el modelo 3R. Se trata de curvas de frecuencia acumulada que muestran porcentajes de tiempo durante el cual, una determi-

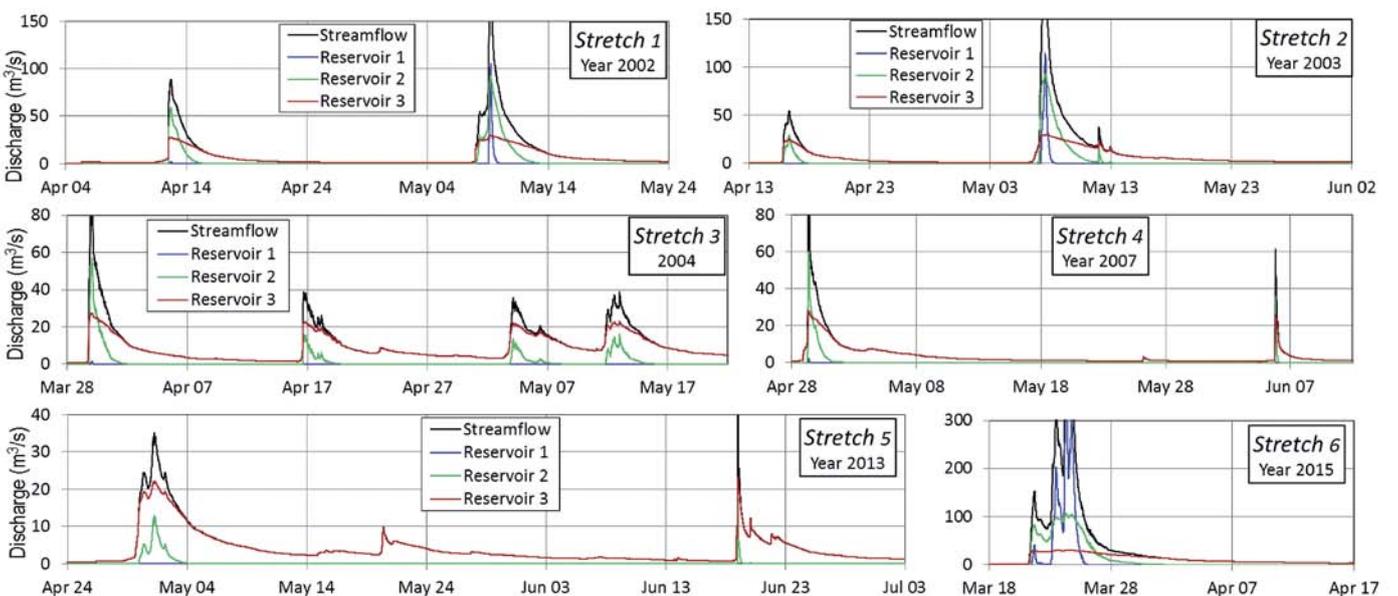


Fig. 4.- Separación de flujo con el modelo 3R, para los seis tramos seleccionados de la serie temporal de la cuenca del río Bergantes. Ver figura en color en la web.  
 Fig. 4.- Flow separation with the 3R model for the six stretch selected of the time series of the Bergantes river catchment. See color figure in the web.

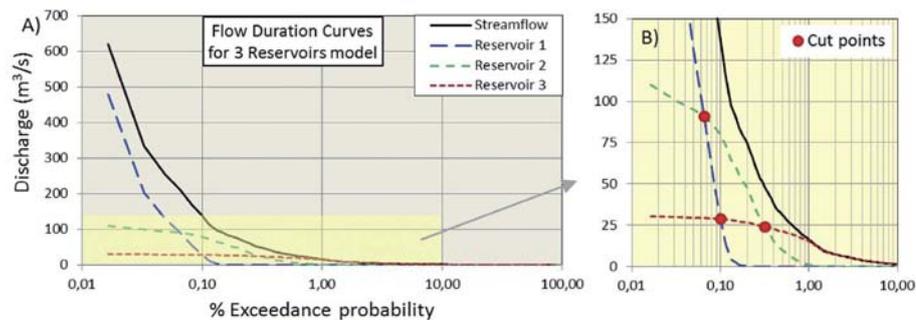


Fig. 5.- Parámetros de calibración,  $Q_0$  y  $\alpha$ , de las 4 curvas de recesión para el modelo 3R. Ver figura en color en la web.

Fig. 5. Calibration parameters,  $Q_0$  and  $\alpha$ , of the 4 recession curves for the 3R model. See color figure in the web.

nada descarga se iguala o supera (exceedance probability). Las FDCs también se pueden aplicar a cada componente de flujo, y así analizar las características de los depósitos naturales de la cuenca asignados a cada flujo.

Para establecer las FDCs, los valores de caudal se ordenan de mayor a menor, acompañados de los valores de separación asociados a cada valor de caudal total. En todas las FDCs, descarga total, flujo de base, flujo rápido y flujo intermedio, siguen una distribución decreciente.

Las diferencias entre las curvas de cada componente son evidentes. La curva de flujo rápido (QFDC) decrece rápidamente, frente a la curva del flujo de base (BFDC) que se mantiene en el tiempo. La QFDC presenta valores muy elevados al principio, pero la mayor parte del tiempo presenta valores más bajos que los de la BFDC.

Las curvas de cada componente se cortan en determinados puntos, un punto para el modelo 2R y tres puntos para el modelo 3R. En la figura 5b se muestran a mayor escala los puntos de corte para modelo 3R, donde se observa que con muy poca frecuencia, 0,07% - 0,32% (0,24 - 1,15 días/año), es el reservorio intermedio el que predomina. Solamente 0,24

días/año, y coincidiendo con los episodios de crecida del río, es el depósito rápido el que aporta mayor caudal. En cambio, es el depósito del flujo de base quien contribuye la mayor parte del tiempo, 364 días/año. En cuencas con crecidas más frecuentes como la del Alcanadre, el flujo de base sigue predominando durante 350 días/año.

*Contribución de cada componente de flujo a la descarga total*

Si se integran las FDCs se puede obtener el volumen de agua que aporta cada componente de flujo a la descarga total. Los resultados en volumen medio anual y como porcentaje de cada depósito están en la tabla II. Para el modelo 3R se deduce que para el río Bergantes en términos de promedio anual, la descarga total es de 41 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 5 hm<sup>3</sup> circulan por el depósito rápido, 8 hm<sup>3</sup> circulan por el intermedio y 28 hm<sup>3</sup> circulan por el reservorio del flujo de base.

Ahora se tiene conocimiento de la relevancia del depósito lento, con dos aspectos a destacar, uno en cuanto al volumen anual del agua que circula por el depósito, 28 hm<sup>3</sup> que es el 68% de la descarga total del río. El segundo aspecto

Model	Discharge volume (hm <sup>3</sup> /year)				Ratio (%)			
	Streamflow	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Streamflow	Cell 1	Cell 2	Cell 3
2R	41	8	33		100%	19%	81%	
3R	41	5	8	28	100%	13%	19%	68%

Tabla II.- Distribución de la descarga de cada celda o depósito.

Table II.- Distribution of discharge in each cell or reservoir.

hace referencia a la capacidad de regulación del recurso hídrico, como un embalse natural que reparte el agua durante 364 días/año, y que representa la principal aportación de agua superficial del río Bergantes.

**Agradecimientos**

Se señala reconocimiento expreso a editores y revisores, Eduardo Garrido y anónimo. Por otra parte, este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Grupo de Investigación "Análisis de Cuenca Sedimentarias Continentales" del Gobierno de Aragón y Fondos FEDER a quienes se transmite gratitud.

**Referencias**

Boussinesq, J. (1877). *Memoires presentes par divers savants a l'Academic des Sciences de l'Institut National de France. Tome XXIII* N 1.

Dewandel, B. Lachassagne, P. Bakalowicz, M. Weng, P.H. y Al-Malki, A. (2003). *Journal of Hydrology* 274, 248-269.

Griffiths, G.A. y Clausen, B. (1997). *Journal of Hydrology* 190, 60-74.

Maillet, E. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Scientifique A. Hermann* Paris 218.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez-Navarro, J.A. García-Gil, A. y Edo-Romero, V. (2013). *Computers & Geosci* 51, 418-429.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez, J.A. García-Gil, A. y Edo-Romero, V. (2014). *Environmental Earth Sciences* 71(6), 2925-2939.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez-Navarro, J.A. García-Gil, A. y Edo-Romero, V. (2015). *Journal of Hydrology* 524, 507-521.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez, J.A. García-Gil, A. y Edo-Romero, V. (2016a). *Journal of Hydrology* 538, 598-608.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez-Navarro, J.A. García-Gil, A. Edo-Romero, V. y Castillo-Mateo, J. (2016b). *Engineering Geology* 214, 11-19.

Mateo-Lázaro, J. Sánchez-Navarro, J.A. García-Gil, A. Edo-Romero, V. y Castillo-Mateo, J. (2017). *Journal of Hydrology, in press*.

Moore, RD. (1997). *Journal of Hydrology* 198, 260-270.