

El balance hídrico en el suelo de 4 pinares (*Pinus halepensis*) de repoblación de la provincia de Alicante

Manrique-Alba, A.^{5*}, Ruiz-Yanetti, S.¹, Chirino, E.^{2,3}, Moutahir, H.^{1,5}, González, C.⁴, Bellot, J.^{1,3,5}

¹ Departamento de Ecología, Universidad de Alicante, Apdo. 99, 03080 Alicante, España.

² Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM).

C/ Charles R. Darwin, 14. Parque Tecnológico. 46980 - Paterna, Valencia, España

³ Unidad Mixta de Investigación Universidad de Alicante-Fundación CEAM. Apdo. 99. 03080-Alicante. España

⁴ Software Developer. Plusamedia LLC, 13764 Kendale Lakes Dr, Miami, FL 33183. EE.UU

⁵ Instituto Multidisciplinar para el estudio del medio "Ramón Margalef", Univ. de Alicante, Apdo. 99, 03080 Alicante.

e-mail: angela.manrique@ua.es

Resumen

El agua es un recurso limitado en las zonas semiáridas, que afecta a los servicios a la población y a la estabilidad de los ecosistemas, especialmente en la cuenca Mediterránea dada la escasez hídrica que se prevé según el IPCC. En este contexto, un conocimiento del balance hídrico en el suelo y su relación con la cubierta vegetal contribuye a mejorar la gestión de los recursos hídricos y de las masas forestales. Los objetivos principales se centran en: (1) Determinar el balance hídrico en el suelo del pinar en condiciones climáticas diferentes, desde semiárido a seco, y (2) Evaluar el efecto de la vegetación (estructura y cubierta) en el balance hídrico del suelo en repoblaciones de la provincia de Alicante. Para ello, se han seleccionado 4 repoblaciones de *Pinus halepensis*, en suelos calcáreos y diferentes condiciones climáticas. En los extremos del gradiente de precipitación; Ventós una zona semiárida y Confrides una zona seca, con 303 y 611 mm de precipitación media anual, respectivamente. El balance se ha realizado con el modelo ecohidrológico HYDROBAL, para el año hidrológico (2012-2013). Las entradas del modelo son variables climáticas, así como parámetros de suelo y de vegetación. Los resultados que proporciona el modelo son la interceptación, la precipitación neta, la escorrentía, humedad en el suelo, evapotranspiración real, infiltración directa, y la infiltración (o recarga de acuífero). Los resultados del balance indican que la cobertura tiene un papel importante en la distribución de la precipitación. Las zonas de mayor cobertura presentan mayor interceptación y evapotranspiración, y por tanto se registra una menor recarga del acuífero. La cobertura del pinar influye de modo inverso, las zonas con menor biomasa de pinar, presentan los mayores % de recarga.

Palabras clave: semiárido, ecohidrología, humedad del suelo, cobertura vegetal.

1. Introducción

El agua es un recurso escaso en las zonas semiáridas, que afecta tanto a los servicios a la población (*blue water*), como a la estabilidad de ecosistemas (*green water*). Concretamente en la cuenca mediterránea, el agua limita fuertemente el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Asimismo, la situación actual se podría agravar en el futuro, por el aumento de la aridez y la temperatura en verano, de acuerdo con los estudios realizados para esta región (Iglesias *et al.*, 2000; IPCC 2007). La aridez proyectada por los modelos de cambio climático puede provocar la desaparición de la cubierta arbórea en las zonas de transición climática entre seco-subhúmedo a semiáridos de la cuenca mediterránea.

Si a este hecho le sumamos la falta de gestión actual en las masas forestales de la zona mediterránea. (p.ej. la superficie forestal arbolada ha aumentado un 20% en la Comunidad Valenciana, según datos del Inventario forestal nacional IFN2-1997 y IFN3-2007 (MMA 1996; MARM, 2007), la susceptibilidad de estas masas frente a las perturbaciones, aumenta con los impactos del cambio climático, siendo necesario aplicar medidas de gestión para paliar esta situación (Fitzgerald *et al.*, 2013).

El tratamiento de las masas forestales en la cuenca mediterránea, debe estar enfocado a la gestión sostenible de la masa, buscando el equilibrio óptimo y más apropiado para el balance de los flujos de agua (David *et al.*, 2011). Ya que una elevada densidad en bosques no gestionados, puede incrementar las pérdidas de lluvia por interceptación y como consecuencia disminuir el flujo de los ríos en las cuencas (Gallart and Llorens 2003, Birot and Vallejo, 2011). En este contexto, la toma de decisiones sobre la gestión forestal en los ecosistemas semiáridos, debe considerar las variables hidrológicas relacionadas con la estructura forestal, tales como la interceptación (Molina and del Campo, 2012) y la evapotranspiración (Ungar *et al.*, 2013).

Consecuentemente, un mayor conocimiento del balance hídrico en estas zonas y la influencia de la vegetación sobre el mismo, contribuyen a mejorar la gestión de los recursos. Se busca un equilibrio en la relación *green/blue water*, mejorando así los recursos hídricos (recarga de acuíferos) y forestales (estabilidad de la masa). En estos ecosistemas, son necesarias directrices sobre cómo gestionar las masas para mantener su productividad, aumentar la humedad del suelo o mejorar la resiliencia de los árboles y de la masa (del Campo *et al.*, 2014).

En este contexto, los principales objetivos de este estudio son:

1. Determinar el balance hídrico en el suelo de pinares de repoblación, en condiciones climáticas diferentes.
2. Evaluar el papel de la cubierta vegetal sobre el balance hídrico. Con estos objetivos, se utiliza el modelo ecohidrológico Hydrobal, de resolución diaria, aplicado con éxito durante la última década en condiciones semiáridas, mejorando la comprensión del papel de la cubierta vegetal en el balance hídrico del suelo (Bellot *et al.*, 1999; Chirino, 2003), así como la evaluación del efecto de los diferentes usos del suelo sobre los recursos hídricos y la recarga de acuíferos (Bellot *et al.*, 2001; Touhami *et al.*, 2013; 2014).

2. Material y métodos

2.1 Zona de estudio y datos ambientales

La zona de estudio se extiende a lo largo de toda la provincia de Alicante, concretamente a 4 unidades experimentales, que tienen en común ser zonas de pinares de repoblación, situados sobre la zona de infiltración de 4 acuíferos con características geológicas similares y monitorizados. Las zonas son, de norte a sur de la provincia de Alicante, y siguiendo un gradiente latitudinal; Confrides ($38^{\circ}42'02''\text{N};0^{\circ}16'37''\text{O}$), perteneciente al gradiente seco, Cabeçó d'or ($38^{\circ}30'28''\text{N};0^{\circ}24'04''\text{O}$), gradiente semiárido, Sierra de Ventós ($38^{\circ}28'43''\text{N};0^{\circ}36'19''\text{O}$) semiárido y Sierra de las Águilas ($38^{\circ}23'11''\text{N};0^{\circ}38'29''\text{O}$), gradiente semiárido (*Fig. 1*).

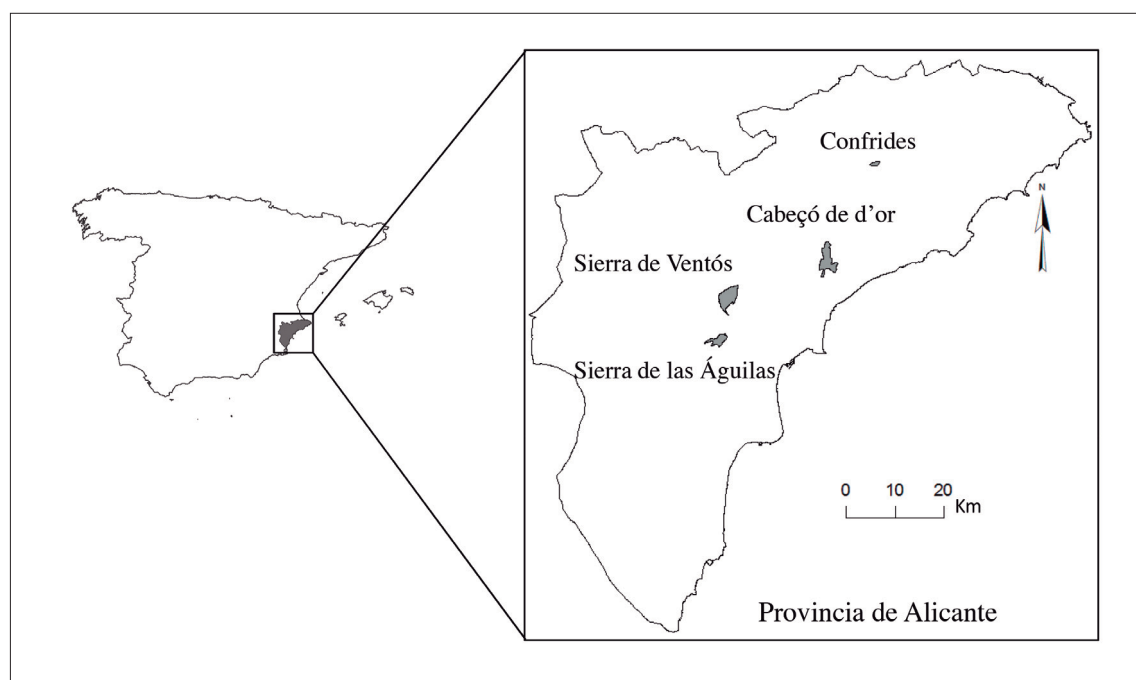


Figura 1. Mapa de localización de las unidades experimentales en la provincia de Alicante.

Las diferentes características climáticas se presentan en un diagrama ombroclimático (*Fig. 2*). La zona con mayor precipitación media anual para el período de 1961 a 2013 es Confrides con 611.8 mm y la zona que presenta una menor precipitación Águilas 298.3mm. Para este mismo período también encontramos diferencias en relación a la temperatura media anual, el valor más alto se encuentra en Ventós y Águilas con 17.3°C y el más bajo en Confrides con 11.7 . Las zonas de Ventós y Águilas presentan déficit hídrico durante 5 meses, con una media de precipitaciones de 18mm mensuales durante el período estival, asimismo Cabeçó d'or y Confrides sólo presentan déficit hídrico durante 3 meses con una media de precipitación durante el período estival de 20.8 y 25.2 mm respectivamente.

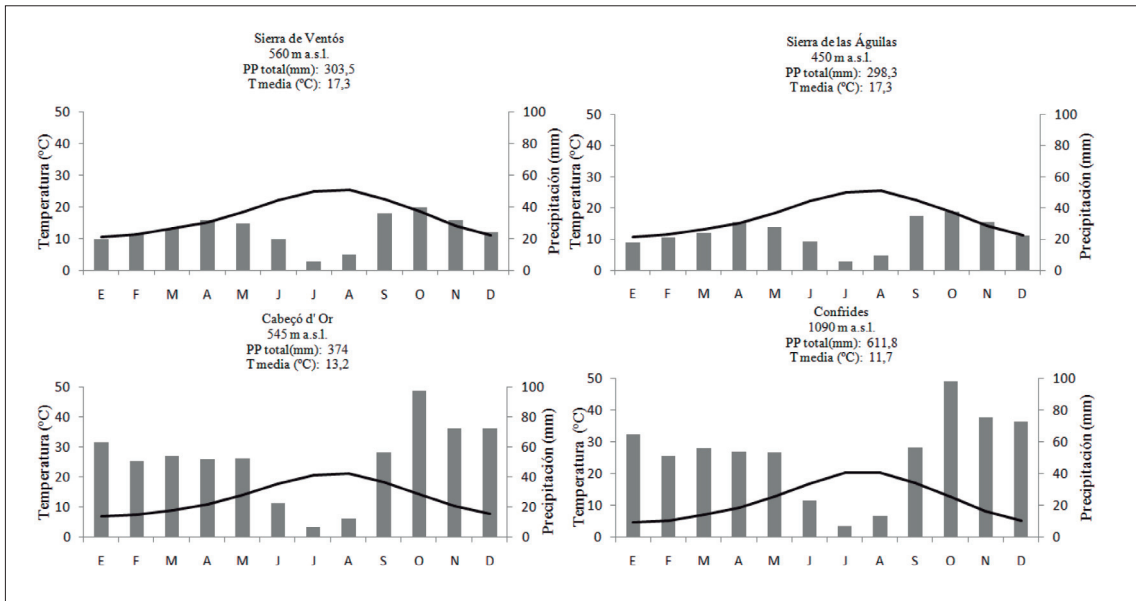


Figura 1. Diagramas ombroclimáticos de las 4 unidades experimentales. Valores medios de Temperatura anual y Precipitación media anual para el periodo (1961-2013).

En cada una de estas zonas, se monitorean las siguientes variables ambientales: precipitación mediante un pluviómetro (Rain Collector II, Davis Instruments Corp; Hayward, CA, USA) conectado a un datalogger (HOBO® pendant Onset Computer Corporation, Inc. Southern MA, USA), para la temperatura del aire y humedad relativa se utilizan sensores HOBO® con datalogger (U23 Pro v2, Onset Computer Corporation, Inc. Southern MA, USA), ambas variables se registran cada hora.

En cada zona, se establecen 3 parcelas (100 m²), en las que se midió la humedad del suelo a dos profundidades (0-15 y 0-30 cm) utilizando 18 y 6 sondas TDR respectivamente (Time Domain Reflectometry TDR100, Campbell scientific, Inc. Logan, Utah, USA). Con el objetivo de aportar al modelo los parámetros de suelo necesarios, se determinaron las siguientes propiedades físicas del suelo: capacidad de campo y densidad aparente (MAPA, 1994), y textura (USDA, 2011). Además se estimó mediante ecuaciones el punto de marchitez (Fuentes y cruz, 1990) y la porosidad total (Kaúrichev, 1984). En la primavera de 2013 se realizó la caracterización de la vegetación mediante 3 transectos de 15 m por zona (inventario de especies y cobertura vegetal por estratos) (Tab. 1, Tab.2).

Tabla 1. Características principales de suelo en las unidades experimentales. Punto de marchitez permanente (Pm), Capacidad de campo (Cc), Porosidad (Prof).

	Pm (%)	Cc(%)	Porosidad (%)	Prof.(cm)	Textura
Aguilas	6	19	47	30	Franca
Ventós	11	21	41	30	Franca
Cabeço d'or	5	22	46	30	Franca-arcillosa
Confrides	7.5	25	46	30	Franca-arcillosa

Una vez recopiladas todas las variables que caracterizan las unidades experimentales, el segundo paso en este trabajo es la introducción de datos en el modelo ecohidrológico HYDROBAL.

2.2 Modelo ecohidrológico HYDROBAL

El modelo ecohidrológico HYDROBAL es un modelo determinístico desarrollado con el objetivo de evaluar el papel de la cubierta vegetal sobre el balance hídrico del suelo. El modelo simula la dinámica temporal del balance hídrico del suelo con una resolución diaria integrando las condiciones meteorológicas, las características de la vegetación y del suelo, a escala de parcela y cuenca hidrológica. HYDROBAL utiliza como variables de entrada las variables climáticas de precipitación diaria y temperaturas mínima, máxima y media diarias. Utiliza un conjunto de parámetros de suelo (profundidad del suelo, humedad del suelo inicial y máxima en el período de seguimiento, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y porosidad total), y de la vegetación (composición de especies, cobertura y estructura de la vegetación).

Tabla 2. Características principales de la masa forestal de las zonas de estudio. Fracción de cubierta (Fcc), Densidad de arbolado (pies ha⁻¹), Altura de arbolado (metros) y área basal (m² ha⁻¹).

	Fcc (%)	Densidad (pies ha ⁻¹)	Altura (metros)	Área Basal (m ² ha ⁻¹)
Aguilas	29.8	420	2.5	7.8
Ventós	46.5	600	3.6	14.4
Cabeçó d'or	37.2	800	3.5	10.0
Confrides	58.6	1600	6.7	29.2

Las variables de salida son: evapotranspiración de referencia, evapotranspiración actual, interceptación, precipitación neta, escorrentía superficial, drenaje profundo y humedad del suelo. Conceptualmente, HYDROBAL a partir de la precipitación bruta, estima los flujos de agua (transcolación, escorrentía cortical e interceptación) a través del dosel vegetal considerando la composición, coberturas y estratificación de las especies, para lo cual utiliza ecuaciones de regresión obtenidas de investigaciones previas (Bellot and Chirino, 2013), simulaciones en laboratorio (Derouiche, 1996; Abdelli, 1999) o reportadas en la bibliografía (Belmonte and Romero, 1998). Este módulo finaliza con la estimación la precipitación neta. A partir de la precipitación neta, el modelo estima el volumen de escorrentía superficial y el drenaje en profundidad por percolación. Del volumen de agua que queda en el suelo, se estima la evapotranspiración actual y la reserva de agua en el suelo. Como indicador funcional de la capacidad de transpiración de la cubierta vegetal, el modelo utiliza el factor K. Es un parámetro empírico que integra las características ecofisiológicas y estructura de la vegetación, y es utilizado para ajustar y calibrar el modelo, teniendo en cuenta las diferencias entre los diversos tipos de cobertura vegetal (este factor es obtenido para cada zona durante la aplicación del modelo).

La calibración del modelo ha sido realizada mediante la humedad en el suelo observada y la escorrentía superficial (Bellot *et al.*, 1999; 2001; Chirino, 2003). Las simulaciones obtenidas a partir del modelo HYDROBAL han sido validadas mediante la comparación de la humedad del suelo estimada vs. humedad del suelo observada, reportando coeficientes de correlación significativos en las 4 zonas de experimentación, 0.96 en Ventós, 0.89 en Águilas, 0.77 Cabeçó d'or y 0.76 en Confrides, y de acuerdo con (Frueh y Hopmans, 1997), un error de predicción medio de 3.3%.

El modelo ecohidrológico HYDROBAL se encuentra en fase de registro (Solicitud N°. A-759-2013) en las oficinas del Registro de la Propiedad Intelectual de la Comunidad Valenciana. Una descripción más detallada de la estructura y funcionamiento del modelo se puede encontrar en Bellot y Chirino (2013). Durante la última década, HYDROBAL se ha aplicado satisfactoriamente en condiciones semiáridas para evaluar el papel de diferentes tipos de cobertura vegetal sobre el balance hídrico del suelo (Bellot *et al.*, 1999; Chirino, 2003); así como, para evaluar el efecto de diferentes escenarios de uso del suelo sobre la recarga de acuíferos (Bellot *et al.*, 2001; Touhami *et al.*, 2013; 2014).

2.3 Balance hídrico

Para el cálculo del balance *Green water* se calcula como la fracción de agua de lluvia que representa la suma de los flujos de vapor emitidos a la atmósfera. Compuesto, por un lado, por una parte productiva, expresada como la transpiración. Y una parte no productiva, expresada como la evaporación, directamente desde el suelo o desde la cubierta vegetal debida a la interceptación (Falkenmark and Rockström, 2005). Igualmente, *Blue water* se define como la fracción de agua de lluvia que forma parte de la escorrentía superficial y que se infiltra produciendo recarga de agua subterránea (Biroty Gracia, 2011).

3. Resultados

Las simulaciones realizadas para los acuíferos del gradiente de precipitación en el año hidrológico 2012-2013, proporcionan resultados para las principales variables hidrológicas de interés (*Tab. 3*). Los resultados del balance en porcentaje sobre el total de precipitación de cada zona, indican que en todos los casos la interceptación es una de los factores más determinantes, ya que reduce considerablemente la precipitación neta. Estos valores están en un rango entre 38.2% Confrides, elevado valor que se relaciona con la mayor densidad en el pinar 1600 pies·ha⁻¹, y 21.6% en Cabeçó d'or. Las zonas de Águilas y Ventós se comportan de manera muy similar entre ellas y presentan valores entre 24-27.7% (*Tab. 3*). Los valores de evapotranspiración actual (E_{ta}) representan un porcentaje igualmente importante en las masas estudiadas. Este dato se sitúa entre el 40-41.7% en las zonas de Águilas, Ventós y Cabeçó, representando entre 161.5-168.6 L·m⁻². En estas zonas la fracción de cabida cubierta no supera el 46.5%. En contraste, en Confrides con una mayor cobertura, cerca del 60%, E_{ta} re-

presenta un 36.5% del total de precipitación, lo que equivale a $326.6 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 3). En términos de porcentajes de infiltración, en Confrides se recarga un 29% de la precipitación, lo que equivale a 263.8 L m^{-2} , en Águilas este valor aumenta hasta el 41% ($163.6 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$). Se muestra como el porcentaje de recarga disminuye con una mayor cobertura. Aunque debido al elevado valor de precipitación en Confrides, en términos de L m^{-2} la recarga sea mayor en esta zona. Por último, los valores medios de humedad en el suelo durante el ciclo hidrológico están dentro de un rango entre 14.7-17.6%, encontrando los menores valores donde la cobertura es mayor.

Tabla 3. Resultados del modelo para cada uno de los acuíferos. En Lm^2 en (arriba) y en % sobre el total de Precipitación (abajo). Precipitación (Pp), Interceptación (Int), Precipitación neta (Pp neta), Escorrentía superficial (Esc), Diferencia de humedad en el suelo ($\Delta\theta$), Infiltración (Inf), Evapotranspiración actual (E_a), *Green water* (GW), *Blue water* (BW).

Datos (%)	Pp	Int	Pp neta	Esc	Dq	Inf	Eta	GW	BW
Águilas	394	94.64	299	1.4	-30.9	163.6	161.5	256.1	165.1
Ventós	406	112.9	293	1.4	-24.9	151.7	163	275.9	153.1
Cabeçó d'or	404	87.5	316	1.5	-27.3	173.2	168.6	256.2	174.7
Confrides	894	341.5	552	4.2	-31.1	263.8	326.6	668.1	267.9
Datos (%)									
Águilas	100	24	76	0.4	-10.3	41.5	40.9	64.9	41.8
Ventós	100	27.7	72.3	0.4	-8.3	37.2	40	67.7	37.5
Cabeçó d'or	100	21.6	78.4	0.4	-9.1	42.8	41.7	63.4	43.2
Confrides	100	38.2	61.8	0.5	-10.4	29.5	36.5	74.7	29.9

Por otro lado, los resultados obtenidos nos proporcionan información relevante sobre el papel que ejerce la cubierta vegetal sobre el balance hídrico, la influencia de la cobertura vegetal se deduce del porcentaje que compone en cada acuífero el término *green water* (Tab. 3). Encontramos el mayor consumo por parte de la masa en el acuífero de Confrides 74.7%, al contrario el menor consumo se encuentra en Cabeçó d'or (63.4%).

De las relaciones entre los conceptos *green/blue water*, se obtienen ratios oscilan entre 1.4-1.8 en las zonas de Cabeçó d'or, Ventós y Águilas, que se corresponden con una menor Fracción de cabida cubierta. No obstante en la zona de Confrides la ratio es 2.5, lo que indica que *green water* representa más del doble de *blue water*, esta solo representa una pequeña parte del total de la lluvia en masas de alta densidad, comparado con la parte que se evapotranspira.

4. Discusión

El efecto de la vegetación sobre el balance hídrico del suelo ha sido motivo de diversos estudios previos. Focalizando en las variables hidrológicas relacionadas con la

vegetación, encontramos estudios concernientes a la interceptación (Llorens and Domingo, 2007; Muzylo *et al.*, 2009), y a la evapotranspiración (Stothoff *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2001).

Por otro lado, estudios realizados en cuencas forestadas que analizan la recarga de acuíferos (Bellot *et al.*, 1992; 2004; Bellot and Ortiz de Urbina, 2008; Alcalá *et al.*, 2011; Touhami *et al.*, 2013), indican que una mayor cobertura vegetal incrementa la evapotranspiración y reduce las reservas de agua en el suelo, e incluso disminuye la escorrentía.

Respecto a los resultados obtenidos en el estudio para las diferentes variables, se puede considerar la interceptación una de las variables más influyentes en el balance debido a la limitación de la llegada de agua al suelo que supone.

En repoblaciones semiáridas la interceptación por parte de la copa de *Pinus halepensis*, puede reducir la cantidad de agua de lluvia que llega a la superficie del suelo entre un 15 y un 35% del total de precipitación (Bellot *et al.*, 1999). Estos valores están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos en las zonas de estudio, donde los valores oscilan entre 21.7% en las zonas de menor cobertura hasta el 38.2% en zonas de mayor cobertura (*Tab. 3*). Valores similares se reportan en (Llorens and Domingo, 2007), en una revisión de estudios sobre el tema, donde se establece como valor medio de interceptación para *Pinus halepensis* 21.2(\pm 1.24)%.

En estudios previos (Bellot *et al.*, 1999; 2004), sugieren que las repoblaciones de *Pinus halepensis* no tienen un efecto negativo sobre la humedad edáfica, o provocan una disminución de la misma, especialmente cuando se comparan con matorrales o formaciones herbáceas. Dentro de las repoblaciones el microambiente proporcionado por los pinos no promueve un aumento de la humedad edáfica superficial (0-20cm) durante la mayor parte del año (Maestre, 2003).

El efecto negativo de las repoblaciones en la humedad edáfica puede aumentar a medida que lo hace la densidad de árboles plantados (Bellot *et al.*, 2004). Los valores obtenidos para Eta en Chirino (2003) para una zona de repoblación de *Pinus halepensis* son del 58.26% sobre el total de precipitación, estos valores están por encima del rango obtenido en el estudio (36.5-41.7%), estas variaciones podrían estar relacionadas con las diferentes características pluviométricas del periodo de estudio.

De acuerdo con el estudio de Bellot y Chirino (2013), en una zona de repoblación, las tasas de Eta son diferentes para un año húmedo y un año seco, siendo el porcentaje de Eta sobre el total de lluvia, menor en un año húmedo. Los estudios precedentes relacionados con recarga de acuíferos en medios semiáridos (Chirino, 2003; Touhami *et al.*, 2013; Bellot y Chirino, 2013). Coinciden en señalar el efecto de la vegetación sobre la recarga del acuífero, Touhami (2013), afirma que las zonas con menor cobertura de vegetación reportan mayores valores de recarga, siendo este efecto más notable en los años húmedos.

En términos generales, se ha observado que hay una relación de tipo lineal entre el porcentaje de cubierta en una cuenca y los aportes anuales, las observaciones muestran el efecto de la cubierta sobre el balance de agua, de modo que los suelos

bajo cubierta forestal suelen estar más secos que bajo cubierta herbácea (Gallart *et al.*, 2002), disminuyendo apreciablemente la recarga de los acuíferos (Calder *et al.*, 2003).

5. Conclusiones

La aplicación del modelo de balance hídrico del suelo HYDROBAL ha permitido, además de cuantificar la recarga del acuífero con un buen ajuste, establecer la importancia del papel de la vegetación en el balance hídrico. Los resultados indican que existe una relación inversa entre la cobertura y la recarga de los acuíferos, siendo las ratios *green/blue water* más elevadas en las zonas con mayor densidad del pinar. Por lo tanto, se considera interesante proponer una gestión de las masas más densas en la zona de Confrides, con el objetivo de reducir la densidad, lo que contribuiría a una mayor recarga del acuífero, ya que en las zonas mediterráneas el agua es un recurso limitante.

Asimismo, se considera importante continuar con el estudio para poder abordar años con características pluviométricas diferentes.

6. Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por el MINECO a través del proyecto ECOBAL CGL2011-30531-C02-01). A. Manrique-Alba agradece además al MINECO la beca FPI para llevar a cabo su doctorado.

6. Bibliografía

- Abdelli, F., 1999. *Análisis comparativo de distintas comunidades vegetales a la distribución del agua de lluvia, a la conservación del agua en el suelo y a la recarga de acuíferos en medios semiáridos*. Tesis Máster. IAMZ.
- Alcalá F. J., Cantón, Y., Contreras, S., Were, A., Serrano-Ortiz, P., Puig Defábregas, J., Solé-Benet A., Custodio, E., Domingo, F., 2011. Diffuse and concentrated recharge evaluation using physical and tracer techniques: results from a semiarid carbonate massif aquifer in southeastern Spain. *Environ Earth Sci.* 62, 541–557. doi: 10.1007/s12665-010-0546-y.
- Bellot, J., Lledó, M.J., Piñol, J. Y Escarré, A., 1992. Hydrochemical budgets, nutrient cycles and hydrological responses in de *Quercus ilex* L. forest of Prades Catchments. In: Teller., Mathy., Jeffers (eds.), *Responses of Forest Ecosystems to Environmental Changes*. Elsevier, London, pp. 389-396.
- Bellot, J., Sánchez, J.R., Chirino, E., Hernández, N., Abdelli, F., Martínez, J.M., 1999. Effect of different vegetation types on the soil water balance in semiarid areas of South Eastern Spain. *Phys.Chem.Earth.* 24, 353-357. doi:10.1016/S1464-1909(99)00013-1

- Bellot, J., Bonet, A., Sánchez, J.R., Chirino, E., 2001. Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape Urban Plan.* 55, 41-53. doi:10.1016/S0169-2046(01)00118-9
- Bellot, J.; Maestre, F.T.; Chirino, E., Hernández, N., De Urbina, J.O., 2004. Afforestation with *Pinus halepensis* reduces native shrub performance in a Mediterranean semiarid area. *Acta Oecol.* 25, 7-15. doi:10.1016/j.actao.2003.10.001.
- Bellot, J., Ortiz De Urbina, J.M., (2008). Soil water content at the catchment level and plant water status relationships in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *J. Hydrol.* 357: 67-75.
- Bellot, J., Chirino, E., 2013. Hydrobal: An eco-hydrological modelling approach for assessing water balances in different vegetation types in semi-arid areas. *Ecol. Modell.* 266, 30-41. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.07.002
- Belmonte, F., Romero, A., 1998. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: "interception flow collection box". *Hydrol. Process.* 12, 471-481. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980315)12:3<471
- Biot, Y., Vallejo, R., 2011. Green water to sustain forest ecosystems processes and their functions. In: Biot, Y., C. Gracia., M. Palahí (eds.), *Water for forests and people in Mediterranean region. A challenging balance. What science can tell us #1*. European Forest Institute, Joensuu, pp. 67-71.
- Biot, Y., Gracia, C., 2011. Una visión general del ciclo del hidrológico: agua verde y agua azul. In: Biot, Y., C. Gracia., M. Palahí (eds.), *Water for forests and people in Mediterranean region. A challenging balance. What science can tell us #1*. European Forest Institute, Joensuu, pp. 17-21.
- Calder, I., Reid, I., Nisbet, T.R., Green, J.C., 2003. Impact of lowland forests in England on water resources: Application of the Hydrological Land Use Change (HYLUC) model. *Water Resour. Res.* 39, 1939. doi: 10.1029/2003WR002042
- Chirino E., 2003. *Influencia de las precipitaciones y de la vegetación en el balance hídrico superficial y la recarga de acuíferos en clima semiárido*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3386>
- David, J.S., Bellot, J.; Biot, Y.; David, T.S., 2011. Water fluxes in forests. In: Biot, Y., C. Gracia., M. Palahí (eds.), *Water for forests and people in Mediterranean region. A challenging balance. What science can tell us #1*. European Forest Institute, Joensuu, pp. 37-42.
- Del Campo, A.D., Fernandes, T. J. G., Molina, J.A., 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management?. *Eur. J. For. Res.* 133, 879-894. doi: 10.1007/s10342-014-0805-7
- Derouiche, A., 1996. *Estimation et modelisation des composantes du bilan hydrique chez différentes firmatios arborees, arbustives et herbacees mediterraneennes*. Tesis Máster. IAMZ.
- Falkenmark, M., Rockström, J., 2005. *Balancing water for humans and nature: the new approach in Ecohydrology*. Earthscan.
- Fuentes Yagüe, J., Cruz Roche, J., 1990. Curso elemental de riego. In: Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación (eds), *Manuales de Capacitación*. Madrid, pp. 3-21.
- Fitzgerald, J., Jacobsen, J.B., Blennow, K., Thorsen, B. J., Lindner, M., 2013. Climate

Change in European Forests: How to Adapt. In: European Forest Institute Policy Brief 9, Joensuu.

- Frueh, W.T., Hopmans, J.W., 1997. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravelly soils. *Soil Science*. 162, 554-564.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Regüés, D., 2002. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 6, 527 - 537. doi:10.5194/hess-6-527-2002
- Gallart, F., Llorens, P., 2003. Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Phys. Chem. Earth*. 29,769-773. doi:10.1016/j.pce.2004.05.004
- Iglesias, A., Rosenzweig, C., Pereira, D., 2000. Agricultural impacts of climate change in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environ. Change*. 10:69–80. doi: 10.1016/S0959-3780(00)00010-8
- IPCC., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaúrichev, I.S., 1984. *Prácticas de edafología*. Mir, Moscu.
- Llorens, P., Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *J. Hydrol.* 335, 37– 54. doi:10.1016/j.jhydrol. 2006.10.032
- Maestre, F.T., Cortina, J., Bautista, S., Bellot, J., 2003. Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of Shrubs under semiarid climate?. *For. Ecol. Manage.* 176, 146-160.
- MAPA(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).,1994. *Métodos Oficiales de Análisis*. Madrid.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente)., 1996. *Segundo Inventario Forestal Nacional (1986 -1996): bases de datos e información cartográfica*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente rural y Marino)., 2007. *Tercer Inventario Forestal Nacional 1997- 2007: bases de datos e información cartográfica*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Molina, J.A., del Campo, A.D., 2012. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *For. Ecol. Manage.* 269, 206–213. doi:10.1016/j.foreco.2011.12.037
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F., Gash, J.H.C., 2009. A review of rainfall interception modelling. *J. Hydrol.* 370, 191–206. doi: 10.1016/j.jhydrol. 2009.02.058
- Stothoff, S.A., Or, D., Groeneveld, D. P., Jones, S.B., 1999. The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock. *J. Hydrol.* 18, 169–190 doi: 10.1016/S0022-1694(99)00038-4
- Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J.R., Moutahir, H., Pulido-Bosch, A., Martínez Santos, P., and Bellot, J., 2013.Recharge estimation of a smallkarstic aquifer in a semiarid Mediterranean region (southeastern Spain) using a hydrological model, *Hydrol.Processes*. 27, 165-174.doi: 10.1002/hyp.9200
- Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J.R., Pulido-Bosch, A., Martínez-Santos, P., Moutahir, H., and Bellot, J., 2014. Comparative performance of soilwater balance models in computing semiarid aquifer recharge. *Hydrolog. Sci. J.* 59, 1-11. doi: 10.1080 /02626667.2013.802094

- Ungar, E.D., Rotenberg, E., Raz-Yaseef, N., Cohen, S., Yakir, D., Schiller, G., 2013. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *For. Ecol. Manage.* 298, 39-51. doi:10.1016/j.foreco.2013.03.003
- USDA(U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service)., 2011. Soil Survey Laboratory Information Manual. Soil Survey Investigations Report No. 45, Version 2.0. National Soil Survey Center, Nebraska.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour. Res.* 37, 701-708. doi:10.1029/2000WR900325.