

# BALANCE HÍDRICO EN PINARES XERÓFILOS DEL CENTRO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

**Juan Ignacio García-Viñas y Valentín Gómez-Sanz**

ECOGESFOR – Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: [juanignacio.garcia@upm.es](mailto:juanignacio.garcia@upm.es), [valentin.gomez@upm.es](mailto:valentin.gomez@upm.es)

## Resumen

Dentro del contexto actual de cambio global, las alteraciones en los patrones normales de las relaciones hídricas suelo-vegetación van a ser especialmente trascendentes en la dinámica espacio-temporal de las comunidades vegetales, llevando a situaciones de equilibrio nuevas, que sería conveniente identificar y evaluar para garantizar su uso y gestión sostenible. En este escenario, las formaciones xerófilas del entorno mediterráneo pueden y deben jugar un papel protagonista, dado el uso especializado que hacen de las disponibilidades hídricas. Con el objeto de profundizar en el conocimiento de las peculiaridades ecológicas que muestra el balance hídrico en formaciones de pinar de rodeno del centro de la Península Ibérica, se ha seleccionado un total de 11 localizaciones de seguimiento de la humedad edáfica, representativas de distintas condiciones de cubierta de pinar (espesura) y de posición fisiográfica (unidades de respuesta hidrológica), sobre arenosoles de características muy homogéneas. Los resultados obtenidos muestran relaciones trascendentes entre las condiciones de cubierta (estado de desarrollo y espesura) y el comportamiento temporal de la humedad edáfica, para las distintas unidades de respuesta hidrológica. Estas relaciones pueden ayudar a fundamentar recomendaciones de gestión que minimicen los posibles riesgos derivados de la dinámica de cambio climático actual.

Palabras clave: *Pino rodeno, Humedad edáfica, Unidad de respuesta hidrológica, Arenosoles*

## INTRODUCCIÓN

Las formaciones xerófilas del entorno mediterráneo muestran, entre sus caracteres ecológicos más diferenciadores, un uso especializado de las disponibilidades hídricas. En el actual contexto de cambio global, es precisamente el agua utilizable por la vegetación uno de los componentes del sistema más susceptible de alteración en sus patrones espacio-temporales de comportamiento. A escala estación, la determinación del balance hídrico posibilita la evaluación de las interacciones entre energía y agua, estimando

simultáneamente qué cantidad de energía es utilizable y qué cantidad de agua está disponible para la vegetación (STEPHENSON, 1990; 1998; CALDER, 1998; BARNES *et al.*, 1998).

En la identificación del balance hídrico, la energía es habitualmente considerada a partir de la evapotranspiración potencial (ETP), también llamada demanda de evaporación, y el agua disponible es definida como la cantidad total de agua líquida que alcanza el suelo, menos el cambio neto en la cantidad de agua almacenada en el mismo y el balance de escorrentía, tanto vertical como horizontal (EVET, 2000; CHEN & HU, 2004).

El agua en el suelo juega un papel fundamental en el balance hídrico. El reparto de las entradas por precipitación en infiltración, escorrentía (superficial y subterránea) y evapotranspiración está altamente determinado por el contenido de agua en el suelo (RODRÍGUEZ-ITURBE, 2000; CHEN & HU, 2004; KUMAR et al., 2010). Concretamente, la evapotranspiración actual, o real (ETR), está condicionada por la cantidad de agua disponible en el suelo, por lo que puede ser estimada a partir de la Tasa de Disponibilidad Hídrica (TDH) del mismo (GÓMEZ-SANZ & GARCÍA-VIÑAS, 2011), y por la demanda climática de evaporación, a partir de la expresión  $ETR = TDH \cdot ETP$  (CALDER, 1998; KUMAR et al., 2010). La ETR representa, de esta forma, la disponibilidad simultánea de agua y energía, y consecuentemente, la capacidad de la vegetación para fijar carbono (STEPHENSON, 1990).

El conocimiento de las diferencias en los componentes del balance hídrico (precipitación efectiva, evapotranspiración real, cambio en el contenido en humedad edáfica y balance de escorrentía) entre distintas cubiertas vegetales y condiciones edáficas es todavía bastante escaso (CALDER, 1998; EVET, 2000; KUMAR et al., 2010). Esta carencia limita la capacidad del gestor para identificar y evaluar los cambios en la dinámica espacio-temporal de las comunidades vegetales, derivados de las alteraciones trascendentes en los patrones normales de las relaciones hídricas suelo-vegetación.

En este contexto, el trabajo de investigación que en parte resume esta comunicación se centra en profundizar en el conocimiento de las peculiaridades ecológicas que muestra el comportamiento del sistema hidrológico asociado a formaciones de pinar de rodeno del centro de la Península Ibérica, a partir de la evaluación del grado de dependencia que se establece entre los distintos componentes del balance hídrico bajo diferentes condiciones de cubierta.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El ámbito territorial conocido como “Tierra de pinares”, ubicado en la meseta septentrional española, acoge un sistema hidrológico singular, asociado a la presencia dominante de una formación superficial de arenas eólicas cuarzosas incoherentes que se comporta como un acuífero libre, con la superficie freática relativamente somera. El área concreta de estudio queda enclavada en la comarca segoviana de “El Carracillo” (Figura 1), delimitada por las coordenadas UTM: 391500 / 4569750; 396500 / 4572750. Responde a un territorio de suave orografía, determinada por depósitos eólicos cuaternarios de arenas cuarzosas sobre los que se instala una cubierta vegetal dominada por *Pinus pinaster* Aiton, apareciendo de forma intercalada superficies dedicadas a cultivos de regadío. Las condiciones climáticas (mediterráneo continental) y edáficas (arenoso-



**Figura 1.** Localización general del área de estudio

les, según la WRB-2006) son particularmente homogéneas, por lo que las diferencias en cuanto a la respuesta vegetal están determinadas por la variabilidad fisiográfica.

El trabajo partió de la identificación de Unidades territoriales de Respuesta Hidrológica homogénea (URH) y de la selección e inventariación de 11 localizaciones, dispuestas espacialmente a lo largo de un perfil topográfico característico de la singular fisiografía del territorio, y que recogen la variabilidad observada en la respuesta vegetal. Las mediciones de la humedad edáfica se efectuaron con un equipo TDR (TRADE SYSTEM, modelo 6050X1) equipado con unas varillas de acero de longitud de 0 a 45 cm, siguiendo una periodicidad mensual, a lo largo de 2 años completos (GÓMEZ SANZ & GARCÍA VIÑAS, 2006).

Los datos relativos a las variables climáticas, para el período de seguimiento, se han obtenido de la red INFORIEGO de la Junta de Castilla y León, concretamente de la estación de SG01 - Gomezerracín (Segovia), que se encuentra en las proximidades del área de estudio y es homologable climáticamente con ella. Las variables manejadas han sido Precipitación (P, mm) registrada entre dos medidas consecutivas de la humedad edáfica y ETP (mm), estimada según el método de Penman-Monteith para el mismo período de tiempo.

Las cubiertas vegetales presentes en cada localización fueron caracterizadas a partir del inventario dasométrico detallado de una parcela

circular de unos 12,6 m de radio ( $\pm 500 \text{ m}^2$ ). El resultado de este proceso aparece resumido en la tabla 1. La variable de masa seleccionada como explicativa ha sido el Índice de Hart (IH; %), puesto que al integrar las dimensiones vertical (altura dominante) y horizontal (espaciamiento medio) se considera un buen evaluador de las condiciones de espesura de la masa.

La tasa de disponibilidad hídrica es expresada (GÓMEZ-SANZ & GARCÍA-VIÑAS, 2011) como:

$$TDH = \begin{cases} 1 & \text{Si } \theta > \theta_s \\ (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) & \text{Si } \theta_r \leq \theta \leq \theta_s \\ 0 & \text{Si } \theta < \theta_r \end{cases}$$

Aquí,  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua en el suelo en un momento dado,  $\theta_s$  es el contenido en saturación y  $\theta_r$  es el contenido en el punto de marchitamiento.

La hipótesis de partida es que la tasa de disponibilidad hídrica al final del período de observación ( $TDH_{t+1}$ ) es función de la disponibilidad hídrica al inicio del período ( $TDH_t$ ) de la precipitación que alcanza el suelo –interacción precipitación y cubierta, expresada como  $P \cdot (1 - 100/IH)$ –, de la evapotranspiración actual –interacción entre la demanda evaporativa, el estado hídrico del suelo al inicio del período y las condiciones de cubierta, expresada como  $ETP \cdot TDH_t / IH$ – y del balance de escorrentía, tanto vertical –percolación o elevación del nivel freático–, como horizontal, determinado por el tipo de Unidad de Respuesta Hidrológica.

Localización	Altura Dominante (m)	Densidad (pies/ha)	Índice de Hart (%)	Descripción
1	16	547	26,7	Repoblado en fustal de alta densidad
2	0	>10.000	0	Regenerado natural
3	19	945	17,1	Repoblado en fustal de alta densidad
4	13	448	39,1	Fustal natural de baja densidad
5	13	547	35,3	Fustal natural de baja densidad
6	7,5	199	101,6	Fustal natural de baja densidad
7	20,5	498	23,5	Repoblado en fustal de alta densidad
8	0	>10.000	0	Regenerado natural
9	12,3	249	55,4	Fustal natural de baja densidad
10	20	348	26,8	Repoblado en fustal de baja densidad
11	0	0	0	Sin cubierta vegetal arbórea o arbustiva

Tabla 1. Caracterización dasométrica y selvícola de las localizaciones

Utilizando como algoritmo un Modelo Lineal General, se han identificado las relaciones de dependencia entre la variable respuesta ( $TDH_{t+1}$ ) y las variables explicativas a partir del análisis de la varianza observada. El nivel de significación para los contrastes paramétricos ha sido de 0,05. El análisis numérico ha sido realizado con el software SPSS.15.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables incluidas en el modelo cumplen de manera suficiente los requisitos paramétricos de normalidad y homocedasticidad. El modelo generado explica una variabilidad de un 47%, y en él, todas las variables, a excepción de la interacción  $P \cdot (1-1/IH)$ , pueden considerarse de efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta. La tabla 2 incluye la descomposición de la varianza y el contraste F para cada una de las variables manejadas.

La variable respuesta,  $TDH_{t+1}$ , muestra una alta correlación con el estado hídrico del suelo al inicio del periodo de observación. Es la variable más explicativa, dado que condiciona las pérdidas por evapotranspiración actual, variable esta última que en un ámbito de escasas precipitaciones es la que más modula la respuesta vegetal (CALDER, 1998; LE MAITRE *et al.*, 1999). En concordancia con ello, la interacción  $ETP \cdot TDH_t / IH$  se muestra

también correlada de manera significativa con la variable respuesta.

Respecto de las variables no continuas, sólo la URH genera medias estadísticamente diferentes para la variable respuesta. Concretamente, las localizaciones situadas en zona de ligera depresión topográfica, con el nivel freático suficientemente somero (URH III) muestran valores medios muy superiores al resto de URHs. La causa de esta elevada disponibilidad hídrica está en el aporte de agua, básicamente por capilaridad, desde el nivel freático. Esta situación es especialmente evidente en el período de menor entrada de agua por precipitación (período seco), garantizando unas tasas de agua utilizable que aseguran un crecimiento continuado en la práctica totalidad del periodo vegetativo. La tabla 3 recoge para cada URH los valores descriptivos del valor de la media marginal poblacional modificada para las variables continuas del modelo como covariables.

En el otro extremo, está la URH IV, que se corresponde con localizaciones en depresión y de marcado comportamiento endorreico. La mayor presencia de elementos finos en el suelo provoca una mayor humedad edáfica, pero retenida con una fuerza mayor que en otras localizaciones. Esta circunstancia hace que el agua en forma utilizable esté disponible en menor cantidad, en especial en las épocas secas, condicionando el comportamiento del resto de componentes del balance hídrico.

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	15.327,139	7	2.189,591	30,902	0,000
Intersección	3.284,344	1	3.284,344	46,352	0,000
$TDH_t$	7.329,257	1	7.329,257	103,437	0,000
$ETP \cdot TDH_t / IH$	586,045	1	586,045	8,271	0,004
$P \cdot (1-1/IH)$	53,435	1	53,435	0,754	0,386
URH	1.057,402	1	1.057,402	14,923	0,000
TCV	653,923	1	653,923	9,229	0,003
URH * TCV	0,000	0	.	.	.
Error	17.359,937	245	70,857		
Total	105.043,445	253			
Total corregida	32.687,076	252			

Donde: TDH<sub>t</sub> = Tasa de Disponibilidad Hídrica al inicio del período (%); ETP = Evapotranspiración Potencial (mm); IH = Índice de Hart (%); P = Precipitación acumulada en el período (mm); URH = Unidad de Respuesta Hidrológica; TCV = Tipo de Cubierta Vegetal

Tabla 2. Análisis de varianza del Modelo Lineal General

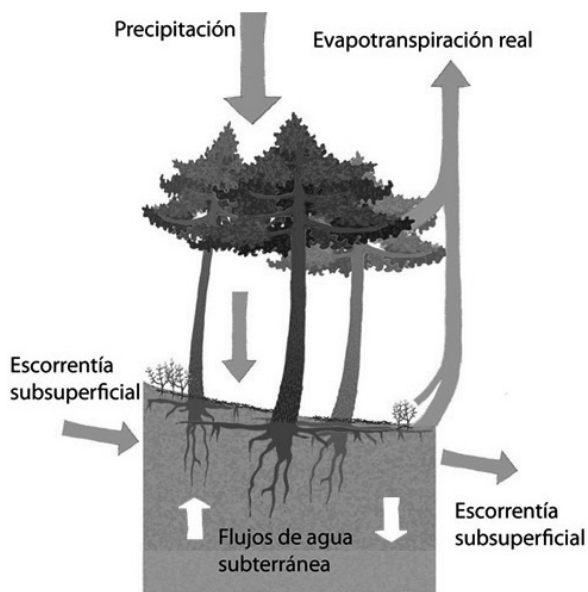


Figura 2. Esquema conceptual sobre el balance hídrico a escala estación

Unidad de Respuesta Hidrológica	Media	Error típ.	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
URH I	15,459	0,916	13,655	17,263
URH II	15,891	1,023	13,876	17,905
URH III	22,766	1,493	19,825	25,707
URH IV	13,365	1,869	9,683	17,047

Tabla 3. Medias marginales de la Tasa de Disponibilidad Hídrica al final del periodo (%) por Unidades de Respuesta Hidrológica

En una situación intermedia quedan las localizaciones llanas (URH II) y las sobreelevadas (URH I). Al encontrarse suficientemente desconectadas de los niveles freáticos, y no ser puntos de acumulación de los flujos superficiales y subsuperficiales, su balance hídrico está muy determinado por la entrada de agua al suelo por precipitación.

También las condiciones de la cubierta vegetal (factor TCV) resultan estadísticamente significativas en la variable respuesta. La tabla 4 muestra los valores de las medias marginales

poblacionales modificadas. Las masas de fustal, predominantemente procedente de repoblación, en alta espesura presentan los valores de disponibilidad hídrica más elevados. La relación es evidente, a mayor cantidad de agua útil a lo largo del periodo vegetativo, mayores tasas de crecimiento. Se ubican espacialmente en las áreas catalogadas como URH III, por lo que han sido las preferidas por los propietarios para instalar masas con una clara vocación productora.

Tras la corta final, y en ausencia de trabajos de repoblación, el hueco creado es automáticamente

Tipo de Cubierta Forestal	Media	Error típ.	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
A - Alta Espesura	21,902	1,532	18,884	24,920
B - Baja Espesura	15,459	0,916	13,655	17,263
C - Regenerado	17,620	1,307	15,046	20,193
D - Sin cubierta forestal	13,365	1,869	9,683	17,047

Tabla 4. Medias marginales de la Tasa de Disponibilidad Hídrica al final del periodo (%) por Tipo de Cubierta Vegetal

ocupado por un regenerado vigoroso, favorecido por las buenas condiciones de humedad edáfica. Los altos valores de evapotranspiración real derivan en un crecimiento elevado de los pies del regenerado, dando lugar a pies de excesiva esbeltez.

Los valores medios marginales más bajos aparecen para las localizaciones sin cubierta forestal arbórea o arbustiva. En este caso, la intensa evaporación en los meses estivales y la fuerte retención de agua en el suelo hacen que la disponibilidad hídrica sea más limitada, dificultando la instalación de especies de porte arbóreo, e incluso arbustivo. La vegetación allí instalada corresponde a un herbazal de especies anuales, especialmente adaptadas a las peculiaridades del balance hídrico en esas localizaciones.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran diferencias trascendentes en el balance hídrico, derivadas de la interacción entre el estado previo de disponibilidad hídrica en el suelo y las condiciones de cubierta (estado de desarrollo y espesura) para las distintas unidades de respuesta hidrológica. En el ámbito territorial de desarrollo de este trabajo, el balance hídrico a nivel estación está muy determinado por la posición fisiográfica, que genera unidades de respuesta hidrológica con elevada influencia en la respuesta vegetal observada.

Dado que el estado de la cubierta viene muy determinado por el uso forestal de la misma (función y tratamiento), la interpretación de los resultados obtenidos permite extraer recomendaciones de gestión que ayuden a minimizar los posibles riesgos asociados a la, cada día menos cuestionada, dinámica de cambio climático actual.

## BIBLIOGRAFÍA

BARNES, B.V.; ZAK, D.R.; DENTON, S.R. & SPURR, S.H.; 1998. *Forest Ecology* (4th Edition). John Wiley and Sons Inc. New York.

- CALDER, I.R.; 1998. Water use by forest, limits and controls. *Tree Physiol.* 18: 625-631.
- CHEN, X. & HU, Q.; 2004. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation. *J. Hydrol.* 297: 285-300.
- EVETT, S.R.; 2000. Energy and Water Balances at Soil-Plant-Atmosphere Interfaces. In: M.E. Sumner (ed.), *Handbook of Soil Science*: A129 - A182. CRC Press. New York.
- GÓMEZ-SANZ, V. & GARCÍA-VIÑAS, J.I.; 2011. Soil moisture spatio-temporal behavior of Pinus pinaster stands on sandy flatlands of central Spain. *Forest Systems* 20(2): 293-302.
- GÓMEZ SANZ, V. & GARCÍA VIÑAS, J.I.; 2006. Land use change impact on soil moisture in sandy flatlands of central Spain. In: J.A. Martínez-Cassasnovas, I. Pla Sentís, M.C. Ramos Martín & J.C. Balassh Solanes (eds.), *Proceedings of the International ESSC Conference on "Soil and Water Conservation under Changing Land Use"*: 63-67. Universitat de Lleida. Lleida.
- KUMAR, S.; SEKHAR, M.; REDDY, D.V. & MOHAN KUMAR, M.S.; 2010. Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty: comparison between laboratory and field experiment. *Hydrol. Process.* 24: 3426-3435.
- LE MAITRE, D.C.; SCOTT, D.F. & COLVIN, C.; 1999. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. *Water SA* 25(2): 137-152.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; 2000. Ecohydrology: a climatic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resour. Res.* 36: 3-9.
- STEPHENSON, N.L.; 1990. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *Ame. Nat.* 135(5): 649-670.
- STEPHENSON, N.L.; 1998. Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *J. Biogeogr.* 25: 855-870.