



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1509

Organiza





Sistema integrado de cuantificación, evaluación y seguimiento de las funciones ecohidrológicas en montes arbolados de la cuenca del río Lozoya (Comunidad de Madrid) en el proyecto HIDROFOREST

ANTONIO D. DEL CAMPO GARCÍA (1), JAVIER PÉREZ ROMERO (1), PATRICIA RIQUELME OSADO (2), MARÍA SERRADA REDONDO (2), LAURA BLANCO CANO (1), LAURA ARNAL ROIG (1), JUAN RAMÓN TORRES SÁNCHEZ (1).

(1) Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Forestal (RE-ForeST).

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de Valencia. Camí de Vera s/n, Valencia.

(2) Dirección General de Biodiversidad y Gestión Forestal. Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior. Comunidad de Madrid, C/ Alcalá 16, 2ª pl. Madrid.

Resumen

La coyuntura ambiental y socioeconómica actual (y prevista) obliga necesariamente a una gestión forestal que objetive explícitamente servicios ecosistémicos adicionales a los que durante décadas han marcado el diseño técnico y las prácticas selvícolas. Tal es el caso de los bosques ubicados en cabecera de cuenca cuando proveen recursos hídricos fundamentales para las áreas metropolitanas, como el río Lozoya (Comunidad de Madrid). Más allá de una protección pasiva del recurso agua, las cerca de 50000 ha de masas arboladas contribuyentes al sistema hidrológico del Lozoya pueden recibir una gestión específica que optimice sus funciones de retención, provisión, uso y regulación de agua, según su vocación en cada caso, sin obviar otras funciones ecológicas concurrentes. El proyecto Hidroforest, impulsado por la D.G. de Biodiversidad y Gestión Forestal de la Comunidad de Madrid, se presenta como la primera iniciativa española que, basándose en un sistema integral de cuantificación, evaluación y seguimiento ecohidrológico del bosque, permite abordar una gestión forestal que genere adicionalidad en las diversas funciones ecohidrológicas (secuestro de C, agua, resistencia al fuego, eco-resiliencia, etc.). Esta comunicación expone los componentes y operatividad del sistema: masas consideradas, procesos y funciones ecohidrológicas monitorizados, red de parcelas y de sensores, indicadores de seguimiento/evaluación, gemelo digital, etc.

Palabras clave

servicios ecosistémicos, provisión agua, uso eficiente del agua, protección suelo, regulación hidrológica.

1. Introducción

Los bosques de cabecera cumplen múltiples funciones entre las que destacan las de provisión, regulación y protección de los recursos hídricos y de los servicios ecosistémicos (SE) basados en el agua (CARVALHO-SANTOS et al., 2014; WEI et al., 2023). Esta multifuncionalidad del bosque requiere que la gestión forestal la objetive explícitamente, (WINKEL et al., 2022), algo que ya prevén las leyes y normativas vigentes como la Ley de Montes (43/2003, de 21 de noviembre y sus revisiones), la Estrategia Europea en favor de los Bosques para 2030 y los reglamentos europeos de aplicación directa (ej. el 2024/3012, o el 2024/1991); todos ellos contemplan la multifuncionalidad, cuantificación y adicionalidad de la gestión forestal en distintos SE. Junto a estos aspectos normativos y técnicos, la creciente variabilidad climática con sus impactos sobre el bosque (en particular las



sequías prolongadas), y las demandas de una sociedad post-industrial, subrayan igualmente la necesidad de cuantificar de una forma más directa el efecto de la gestión forestal sobre las funciones del bosque (SEIDL et al., 2016). El impacto del cambio global en SE tales como la productividad forestal, los recursos hídricos, el hábitat para la fauna o la biodiversidad ha traspasado el campo de lo científico y ha calado en acciones de política internacional (Plan Estratégico de las Naciones Unidas para los Bosques 2017-2030, 2017), que abogan por una gestión forestal adaptativa que objetive preservar o mejorar los SE de los bosques (MILLAR et al., 2007; SEIDL et al., 2016).

Esta gestión holística ha de operar en un marco ecológico y social muy complejo, con multitud de componentes, interrelaciones e incompatibilidades entre algunos SE, donde los indicadores pueden ser herramientas adecuadas pues permiten enunciados cuantitativos pese a la complejidad del entorno (MÜLLER et al., 2013; LINSER et al., 2018; WINKEL et al., 2022). Sus inconvenientes potenciales son la sobre-simplificación, la agregación, el modelado y la abstracción, por lo que suelen adolecer de una alta incertidumbre respecto a si el indicando está bien representado por el indicador (BOSSSEL, 2001). Una revisión de la literatura relativa a los indicadores potenciales para la gestión forestal ecohidrológica está fuera del alcance de este trabajo, pero los autores remarcan que no existe un conjunto suficiente de indicadores de base ecohidrológica que cumplan los criterios científicos y prácticos deseables (MÜLLER et al., 2013; CARVALHO-SANTOS et al., 2014) y que permitan diferenciar (y a la vez agregar) distintas funciones ecohidrológicas del bosque tales como la regulación de avenidas, la retención de agua, la provisión de agua en cantidad y calidad o el uso eficiente del agua por el propio ecosistema forestal (MCPFE, 2003; MONTREAL PROCESS, 2009; www.foresteurope.org).

Los ecosistemas forestales de la cuenca del río Lozoya (Madrid) tienen una importancia clave en aspectos ecológicos, económicos y de uso público de la región. Son el origen de los más de 600 hm³ de agua almacenada en sus embalses, lo que supone en promedio el 64% de los recursos hídricos gestionados por el Canal de Isabel II y el 40% del suministro de agua de la población madrileña. Además, mediante su regulación de la cantidad, calidad y disponibilidad de agua en el tiempo, proporcionan protección contra la erosión del suelo y las inundaciones y proveen múltiples servicios de uso recreativo a la población de las áreas metropolitana y rural de la región y allende. La cuenca tiene sobre todo una indiscutible función hidrológica, y una potencialidad elevada para aumentar la provisión de agua mediante una gestión forestal “dirigida” en más de 25000 hectáreas de pinar y rebollar, con un aumento potencial de unos 24 hm³ en la reserva hídrica anual del sistema hidrológico del Lozoya (DEL CAMPO et al., 2022a). No obstante, es preciso indicar que estos aumentos tienen una vida efímera de 3 a 9 años (DEL CAMPO et al., 2022b), tras lo cual sería precisa una nueva intervención para mantener las aportaciones.

Por tanto, más allá de una gestión o protección pasiva del recurso agua, la función hidrológica debe potenciarse mediante una gestión ecohidrológica activa que se valga de indicadores que permitan optimizar o maximizar determinadas funciones ecohidrológicas (retención, provisión, regulación, etc.), compatibilizando con otras funciones ecológicas y sociales concurrentes. El proyecto Hydroforest, impulsado por la D.G. de Biodiversidad y Gestión Forestal de la Comunidad de Madrid, se presenta como una iniciativa pionera en España que, basándose en un sistema integral de cuantificación, evaluación y seguimiento ecohidrológico del bosque,



permite informar sobre los efectos de la gestión forestal (y su posible adicionalidad) en las diversas funciones ecohidrológicas (secuestro de C, agua, resistencia al fuego, ecoresiliencia, etc.). El proyecto contempla una red de seguimiento y control que aporta datos e información precisa para evaluar unos indicadores y realizar un correcto diagnóstico de la efectividad y lo apropiado de la gestión forestal, algo que ya se está implementado en otros lugares del mundo (NAGEL et al., 2017; VOROBEVSKII et al., 2024).

2. Objetivos

El objetivo de la presente comunicación es la descripción detallada de las partes y elementos del sistema de monitorización ecohidrológica desplegado en el seno del proyecto Hydroforest de la Comunidad de Madrid. En concreto, se justifican las masas forestales consideradas, los procesos y funciones ecohidrológicas seleccionados para el seguimiento y evaluación, la ubicación de la red de parcelas, el tipo de sensores y los indicadores de seguimiento/evaluación. En particular, dada la extensión limitada de esta comunicación, se cubrirán específicamente los siguientes objetivos específicos:

- Individualizar distintas funciones ecohidrológicas de interés y asociarlas a los SE y los posibles objetivos de gestión forestal.
- Derivar un primer conjunto de indicadores de evaluación y seguimiento de las distintas funciones identificadas.

Como puede observarse de los objetivos enunciados, esta comunicación no se ajusta al método científico de postulado y contraste de hipótesis y por tanto la estructura de la misma se ha modificado sucintamente para una mejor exposición de los contenidos.

3. Metodología

a. Encuadre biogeográfico del Proyecto y formaciones forestales incluidas en el seguimiento.

La comarca de la Sierra Norte madrileña (1.260 km²) se encuentra situada en el extremo norte de la Comunidad Autónoma de Madrid y comprende 42 municipios. Dentro de esta comarca se encuentra la cuenca del río Lozoya, con 924,9 km² (un 73,4% de la comarca) vertientes al embalse de El Atazar, justo antes de la confluencia por la derecha con el río Jarama.

La cuenca tiene un uso fundamentalmente ganadero y forestal. Comprende varios pisos bioclimáticos, lo que le confiere una gran diversidad de ecosistemas forestales y tipos de hábitats naturales, destacando por su superficie los pinares (repoblados o naturales, con unas 17000 ha en la cuenca) y los robledales (de melojo fundamentalmente; también cerca de las 17000 ha en la cuenca); en menor medida se dan otros bosques de frondosas (encinares), bosques de ribera, pastizales explotados por el ganado, piornales y otros matorrales sucesionales, roquedos y canchales.

El pino silvestre guadarrámico se da en masas muy densas y puras que se distribuyen entre los 1200 y 1800 metros preferentemente, aunque localmente alcanzan cotas superiores a los 2000 metros. Estos pinares, a diferencia de los tipos eurosiberiano y sub-mediterráneo, presentan sequía estival, que, aunque muy corta, es un factor de riesgo potencial para su estabilidad. Vegetan en suelos bien drenados ricos en materia orgánica, bastante profundos, de textura arenosa, con



un pH de moderado a muy ácido (CAÑELLAS et al., 2000). Se trata de cambisoles districos o eutricos y luvisoles férricos. Es la formación más importante desde el punto de vista del volumen maderable, con un 38% del total de las existencias autonómicas, superando los 200 m³/ha (IFN4). Las masas del piso supramediterráneo son fruto de repoblaciones muy antiguas, mientras que las formaciones del piso oromediterráneo son autóctonas y muchas de ellas han alcanzado el estado de madurez (RASCÓN y CORROTO, 2019).

Los melojares se extienden fundamentalmente entre altitudes de 1200 a 1600 metros. Se trata de bosques muy ricos, ya que el desfronde del roble enriquece los suelos silíceos aumentando su pH. Por debajo de los 1200 metros el melojo busca zonas con compensación edáfica del déficit hídrico. Vegeta preferentemente sobre litologías silíceas como las que aparecen en la zona de estudio (gneises, granitos, pizarras, cuarcitas, sedimentos arenosos del cuaternario, etc.). La estructura de las masas corresponde normalmente a montes bajos o montes medios. El resalveo y cortas al uso en la especie generan además de leñas, beneficios silvopastorales, reducción del riesgo de incendio, y liberación de la competencia con efectos en la mitigación del estrés hídrico y mejora el crecimiento de los ejemplares residuales (CAÑELLAS et al., 2004; SALOMÓN et al., 2017).

3.

a. Funciones ecohidrológicas y servicios ecosistémicos de interés

Por los motivos ya expuestos, se han identificado hasta cuatro funciones ecohidrológicas clave en el proyecto y que serán el objeto del seguimiento y cuantificación (Tabla 1).

Tabla 1. Funciones ecohidrológicas de interés a objetivar con la gestión forestal ecohidrológica en la cuenca del Lozoya.



Función	Objetivos específicos	Servicios ecosistémicos asociados (mejorados con la función)	Condicionantes
<ul style="list-style-type: none"> Infiltrar (en el suelo) y retener (en el dosel) temporalmente (a corto plazo) el máximo volumen de agua posible originado por una lluvia intensa. Mantener los reservorios hídricos del bosque (suelo principalmente) con alta capacidad de almacenar agua ante lluvias intensas Aumentar la rugosidad y tortuosidad en el tránsito del agua superficial y mantener coberturas forestales completas 	<ul style="list-style-type: none"> Reducción y retraso de caudales punta, y laminación de avenidas Protección del suelo frente a erosión y a deslizamientos de ladera Provisión de agua de alta calidad Alto secuestro de C (en suelo y suelo) Evolución a estados maduros del bosque, lo que a menudo conlleva elevados índices de biodiversidad si no hay riesgos de perturbaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Si son masas artificiales provenientes de repoblación, el exceso de densidad las hace muy propensas a perturbaciones como sequías e incendios (alta carga de combustible, fuegos más intensos de copa). Son muy susceptibles al estancamiento por lo que necesitan tratamientos de mejora para regular densidad Poca producción de madera o biomasa (tratamientos de baja intensidad) Elevado consumo de agua por interceptación y transpiración 	
<ul style="list-style-type: none"> Maximizar la entrada de agua (infiltración) en el compartimiento suelo y 	<ul style="list-style-type: none"> Mejora de la salud del suelo y protección frente a la erosión Mejora de 		



3.

a. Red de parcelas ecohidrológicas

La ubicación de parcelas experimentales representativas en un área tan extensa se ha desarrollado profusamente en un trabajo previo (DEL CAMPO et al, 2022c) donde se identificaron situaciones ecohidrológicas diferenciadas en la cuenca y supuso el punto de partida para definir el número y tipo de parcelas experimentales. A ello se han añadido criterios prácticos de accesibilidad, titularidad, y previsión de ejecución de tratamientos selvícolas. Así, se han seleccionado un total de cinco casos de estudio correspondientes a masas de las dos especies predominantes tanto puras como en mezcla y en diferentes clases naturales de edad (latizal, fustal denso, fustal con regenerado).

La Figura 1 muestra el tipo y ubicación de cada una de las cinco parcelas instaladas. Una parcela se encuentra en una masa pura de rebollo (*Quercus pyrenaica*) con actuaciones de resalveo (Braojos_QUPY), dos parcelas más están en masas mixtas de pinar-rebollar (Canencia y Rascafría-Parque Natural) y las dos restantes (Braojos_PISY y La Puebla) se corresponden con repoblaciones maduras de silvestre (*Pinus sylvestris*) con tratamientos de mejora/regeneración. En cuatro de los cinco sitios se ha dispuesto una unidad experimental con gestión (T) y otra sin tratar o control (C). Cada unidad experimental tiene una superficie aproximada de 0.25 ha. La red de parcelas se ha seleccionado tratando de acoplar la parcela a tratamientos selvícolas recientes o previstos y cercana a estación de aforos de la red foronómica existente. La parcela de Rascafría, por la figura de protección ambiental que le afecta, tiene una función protectora de conservación de la biodiversidad y del valor paisajístico, por lo que no lleva tratamiento asociado. Su seguimiento permitirá valorar aspectos relativos a la fijación de C, provisión de agua en cantidad y calidad en ausencia de intervención, siendo a su vez una comparativa con respecto a lo registrado en las restantes situaciones.

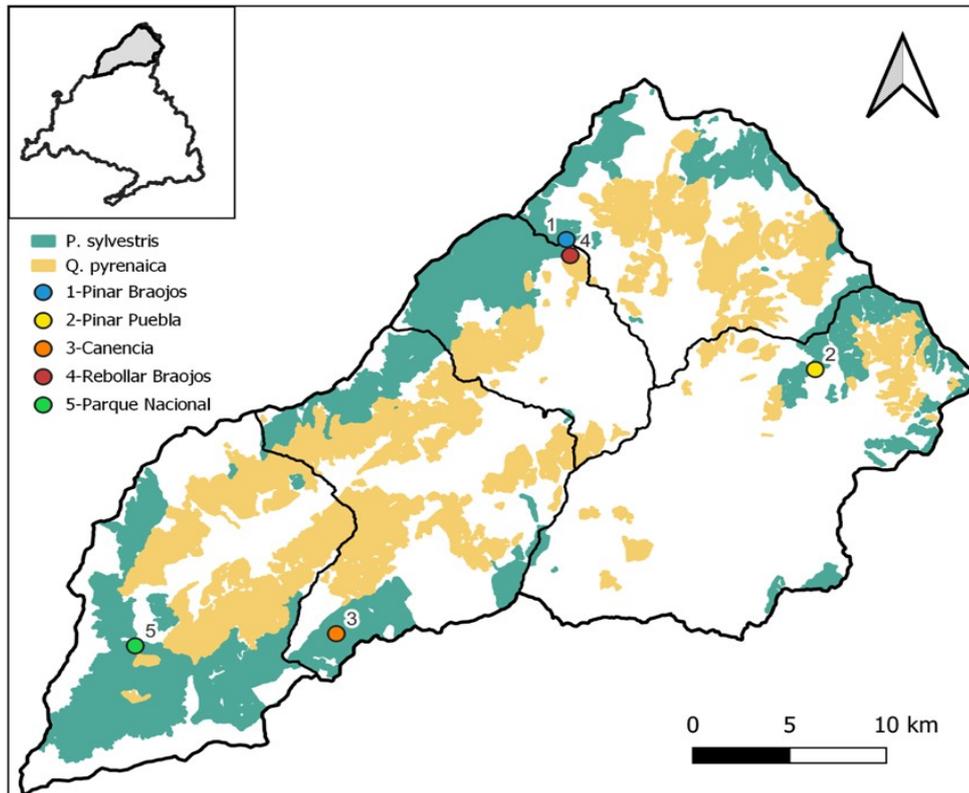


Figura 1: Cuenca del Lozoya en la sierra Norte de Madrid con indicación de la distribución de las masas de pino silvestre y rebollo y localización de las cinco parcelas ecohidrológicas contempladas en el proyecto Hidroforest (Fte. Elaboración propia)

El objetivo fundamental de estas parcelas es contribuir a cuantificar y contrastar las funciones ecohidrológicas de las masas forestales de la cuenca del Lozoya de la Tabla 1, dada su contribución a los embalses integrados en la UTE 05 de abastecimiento de agua potable de Madrid. La escala de parcela/ladera permite generar datos experimentales muy detallados que sirven, por un lado, para ofrecer una información veraz y en tiempo real, y por otro, para calibrar y validar localmente modelos ecohidrológicos que simulen y extrapolen espacialmente el estado de los SE y funciones ecohidrológicas en la cuenca. Al disponer de testigos y tratamientos, se puede constatar in situ la efectividad de aplicar tratamientos de gestión forestal ecohidrológica. Con ello se puede conocer la adición de la silvicultura ecohidrológica como línea de gestión forestal. Otros objetivos secundarios son los relacionados con el seguimiento de otros bienes y servicios derivados de la gestión forestal (secuestro y protección de C, biodiversidad, etc.) y en especial su efecto sobre la resiliencia y estabilidad de los ecosistemas frente al cambio climático.

3.

a. Determinaciones y sensorización ecohidrológica

El planteamiento básico del seguimiento ecohidrológico en cada parcela es el registro detallado de variables clave en los tres compartimentos que componen el complejo suelo-planta-atmósfera (SPAC). Para ello, se emplean tanto medidas automáticas con sensores controlados por un sistema de adquisición de datos centralizado (datalogger), como medidas manuales de menor frecuencia, pero igualmente importantes para una correcta cuantificación de los flujos, los procesos

y las variables de estado. En general, los sensores usados incorporan el protocolo de comunicación SDI-12 y el datalogger almacena información a intervalos variables que es descargada en remoto gracias a la conexión con un sistema de telemetría de datos centralizado. En la Tabla 2 se encuentra el detalle del registro automatizado con sensores adquiridos en el mercado.

Tabla 2. Sensores seleccionados para la monitorización ecohidrológica junto a la parte del complejo suelo-planta-atmósfera (SPAC) que monitorizan y la variable miden. Además, se mencionan las unidades en las que se miden las variables, el número de sensores (Rep) y la frecuencia de toma de dato de cada una en minutos (Freq (min)). (1) Meter-Environment, METER Group, Inc. USA; (2) Campbell Scientific, USA; (3) UGT SFM-4 Sensor, Germany.

SPAC	Variable	Unidad	Sensor	Rep.	Freq (min)
Suelo	kPa	Teros 22 (1)	2		10
m3/m3	TDR CS655 (2)	6		10	
ts	Deg C	TDR CS655 (2)	6		10
h	cm	Transductor (2)	4		10
resistividad	Resistivímetro	3		Única	
Velocidad	Sismógrafo	1		Única	
Planta	cm/h; l/h	Implexx SFM (3)	5		30
m3/m3	Implexx SFM(3)	5		30	
mm	Dendrómetro (3)	5		30	
cm	Forcípula			Discontinuo	
p	MPa	Scholander	5		Discontinuo
p	MPa	PSY1 o FloraPulse	3		30
Kg/m2	TLS	1		Única	
Atmósfera	mm	Vue50 (2)	1		10
W/m2	“	1		10	
m/s	“	1		10	
Deg C	“	1		10	
kPa	“	1		10	
kPa	“	1		10	
hPa	“	1		10	



hPa	“	1	10
%	“	1	10
nº, km	“	1	10
Micro cuencas (suelo-Agua)	g/l	Turbidímetro (2)	1 10
cm	Transductor de presión (2)	3	10
m3/s	Parshall + sensor sónico (2)	1	10
mm, °C, %	Pluvio, sensor T/HR, mástil (2)	1	10
Complemt.	(2)		1
		1	
		1	
		1	
		1	
		1	
		1	

La meteorología se cuantifica a una altura de 2 metros sobre el dosel gracias a una estación climática completa instalada en una torre fija. Entre las mediciones, se encuentran las relacionadas con la lluvia, la humedad, temperatura del aire, y otras que permiten la estimación de la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de FAO-Penman-Monteith, variable de gran interés para una descripción adecuada y comparable de la demanda atmosférica.

La vegetación se caracteriza tanto en términos hídricos como estructurales y de biomasa. En cuanto al ciclo hidrológico, se llevan a cabo mediciones de transpiración y contenido hídrico del tronco en 5-6 árboles representativos de las clases diamétricas de la parcela de estudio. Para la transpiración se emplean sensores de flujo de savia. A la misma altura que los sensores anteriores, se disponen dendrómetros de radio que permiten medir la variación diaria que representa el crecimiento secundario (incremento en diámetro). En el melojo (no resinosa) se han instalado microtensiómetros en tronco para estimar el potencial hídrico del tronco. Al igual que en el caso de las mediciones atmosféricas, el protocolo de comunicación es SDI-12. Como medidas puntuales, se hacen las propias de inventario (incluyendo levantamiento con LiDAR TLS), índice de área foliar y fracción de cabida cubierta con periodicidad única, estacional o anual según la variable.

En cuanto al suelo, se usan sondas de humedad del suelo en 6 puntos de muestreo ubicados a una distancia equidistante siguiendo un diseño sistemático, y a 3 profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm), además de una sonda de potencial hídrico a la profundidad de 50 cm en dos hoyos. Aguas arriba y aguas abajo de la parcela se instalan dos piezómetros (4 en total) hechos manualmente (no llegan a



roca madre en la mayoría de los casos) para identificar, mediante transductores de presión (sensores de nivel), drenajes laterales subsuperficiales y saturación del suelo. Paralelamente, se lleva a cabo un muestreo al inicio para obtener las propiedades edafo-hídricas más comunes tales como la pedregosidad, la textura, la densidad aparente y el carbono y nitrógeno orgánicos, entre otras. La estructura del subsuelo se determina mediante métodos geoelectrónicos y sísmicos.

Además, fuera de la parcela, se han identificado los regueros o cauces próximos que drenan las parcelas y se instalan (no en todos los casos) medidores de caudal tipo Parshall con sensor de nivel sónico. Igualmente, en estos puntos se hacen piezómetros con maquinaria especializada procurando coger las zonas basales de conexión con la capa freática local.

3.

a. Selección de indicadores

Para la selección de indicadores, es preciso tener una serie de criterios generales (BOSSEL 2001; MÜLLER et al., 2013; LINSER et al., 2018; CARVALHO-SANTOS et al., 2014). En particular para el caso que nos ocupa, deben ser indicadores robustos desde un punto de vista físico, para que puedan ser evaluados directamente con la información registrada en campo, pero también derivados de las simulaciones generadas mediante modelos ecohidrológicos. La base ecohidrológica del proyecto garantiza que los grupos fundamentales del ecosistema (agua, materia, energía y estructura) (MÜLLER, 2005; CARVALHO-SANTOS et al., 2014), estén incluidos en la batería de indicadores a proponer.

4. Resultados y discusión

a. Identificación de los procesos y variables ecohidrológicas de interés

Una primera valoración de las funciones ecohidrológicas consideradas, ha permitido identificar los procesos ecohidrológicos mayormente asociados a las mismas (Tabla 3). Se observa que la infiltración es un proceso común a todas las funciones y que además debe ser maximizado cualquiera que sea la función o funciones hidrológicas de interés para un bosque. Por esta razón, en una primera fase del proyecto, los indicadores estarán fundamentados en el agua o contenido de humedad del suelo (θ), ya que se trata de una variable clave que articula los procesos ecohidrológicos más importantes de regulación de energía, agua y nutrientes y afecta directamente a la productividad de los ecosistemas, trasladándose en cascada a los agroecosistemas y sociedades humanas (PORPORATO et al., 2003; RODRIGUEZ-ITURBE et al., 2001). Se puede calcular físicamente y simular con modelos, se puede estimar a partir de información satelital (AWADA et al., 2024; KOSTER et al., 2017) y se puede obtener directamente in situ, con la existencia de una red internacional que pone a disposición pública mediciones de θ (DORIGO et al., 2021), y que es la principal base de datos de referencia en todo el mundo.

Tabla 3. Procesos ecohidrológicos con mayor implicación en las funciones ecohidrológicas de interés en los bosques de la cuenca del Lozoya (Regulación (RG), Retención (RT), Provisión (PR) y Uso Eficiente (UE)). Doble fecha indica mayor énfasis en el proceso. PP: productividad primaria; Pn: precipitación neta; I: infiltración; It: interceptación; Es: escorrentía superficial; Ess: escorrentía hipodérmica o subsuperficial; D: Drenaje profundo; ET: evapotranspiración; T: transpiración; Se: Evaporación suelo;





Función	PP	Pn	It	I	Es	Ess	D	ET	T	Se
↑↑	↓↓	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↑	↑↑	↑		↑
↑	↑↑	↓↓	↑↑	↓	↓	↓	↓	↓↑		↓↓
↓↑	↑↑	↓↓	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓		↓↓
↑↑	↑↑	↓	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑↑		↓

Para un valor dado de θ , la tasa a la que ésta se agota depende de la escorrentía, el drenaje profundo y la evapotranspiración. Esta función de pérdida de θ se suele agrupar típicamente en tres regímenes (McCOLL et al., 2017): a) en un primer momento, en suelos húmedos con θ por encima del punto de capacidad de campo ($\theta > \theta_{cc}$), dominan el drenaje y las escorrentías, y gobierna una función exponencial que aumenta con θ ; b) cuando θ es intermedio entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo ($\theta_{mp} < \theta < \theta_{cc}$, siendo θ_{mp} un valor de transición), la función de pérdida está dominada por la ET en su fase I, un proceso controlado fundamentalmente por la demanda atmosférica e invariable con respecto a θ ; c) sin embargo, a medida que el suelo se seca y se aproxima al punto de marchitez ($\theta_{pm} < \theta \leq \theta_{mp}$), la ET entra en su fase II, caracterizada por estar limitada por la oferta o disponibilidad de θ y la función de pérdida tiende a cero (Figura 2).

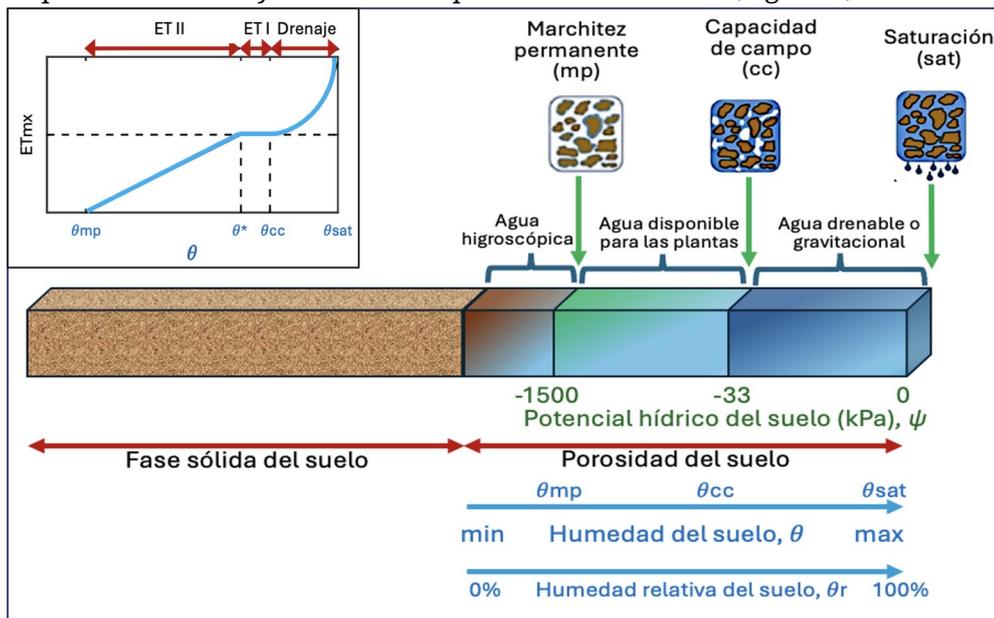


Figura 2: Componentes de la humedad del suelo y su dinámica. El detalle interior corresponde a un ejemplo de la función de pérdida de humedad del suelo (θ) según el modelo de LAIO et al. (2001) con los tres regímenes diferentes: dominio del drenaje ($\theta > \theta_{cc}$), etapa ET I (ET-I, $\theta_{mp} < \theta \leq \theta_{cc}$), y etapa ET II (ET-II, $\theta_{mp} < \theta \leq \theta_{mp}$). E_{max} es la ET máxima posible, dadas las limitaciones del clima y la fisiología de las plantas. (Fte. Elaboración propia a partir de O'GEEN, 2013 y McCOLL ET AL., 2017)

En base a lo anterior, la estructura básica de un modelo de θ a escala de tiempo diaria es la de una ecuación diferencial estocástica que describe la tasa de cambio en θ como la suma de las entradas y pérdidas asociadas en la capa activa del suelo (RIGBY y PORPORATO 2006).

$$nZr \frac{d\theta}{dt} = \phi(P) - ET - D, \text{ (ec 1)}$$

donde n es la porosidad del suelo, Z_r es la profundidad de enraizamiento en el suelo (capa activa), θ es el contenido relativo de agua ($0 \leq \theta \leq 1$) promediada verticalmente, ϕ es una función de infiltración, P representa un proceso de precipitación estocástico, ET y D ya se han definido. A partir de la expresión básica (ec 1) podemos obtener la infiltrabilidad: un evento de lluvia P genera un salto instantáneo en θ de tal manera que la profundidad de infiltración, I_p , se supone igual al valor mínimo entre el déficit de saturación del suelo y la profundidad del



evento de lluvia, es decir, $IP = \min [nZr(1 - \theta r_0), P]$, donde θr_0 es la humedad relativa del suelo al inicio del evento y P representa la profundidad total del evento de precipitación (RIGBY y PORPORATO, 2006; RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1999). Cualquier exceso de precipitación sobre $1 - \theta r_0$ se asigna a las pérdidas acumuladas (efecto combinado de la escorrentía y la percolación).

Con este planteamiento sencillo se pretende comprender y monitorear los procesos hidrológicos clave como la infiltración (I), la escorrentía (Es y Ess) y la recarga de agua subterránea (D) en la escala de parcela/ladera, a partir de los registros de los sensores que miden θ en la zona vadosa del suelo. Este planteamiento ha sido utilizado con éxito para estimar estos procesos sin las complejidades que surgen de la dependencia de un modelo hidrológico (LEITE et al., 2021; LIU et al., 2024; WICKI et al., 2020a; WYATT et al., 2017). Por otro lado, estas medidas también permiten estimar el drenaje D regional y la ET real mediante modelos de transferencia suelo-vegetación-atmósfera (ANDREASEN et al., 2013; WANG et al., 2016). Los datos de θ permiten optimizar o calibrar los parámetros de las funciones de las propiedades hidráulicas del suelo en estos modelos y se pueden utilizar con datos de forzamiento meteorológico (ANDREASEN et al., 2013).

4.

a. **Indicadores de evaluación y seguimiento de las funciones ecohidrológicas**

Regulación (RG): Los indicadores para la función de regulación hidrológica deben ser representativos, por un lado, de la capacidad de almacenamiento de agua en vuelo y en suelo, y por otro lado, de la laminación o transferencia diferida en el tiempo de esos volúmenes almacenados de forma que los reservorios de agua queden disponibles para los posibles subsiguientes eventos de lluvia. Para el almacenamiento se han seleccionado indicadores de interceptación y de volumen de θ disponible al inicio de la precipitación (LIU et al., 2024). Para la laminación o transferencia, el tiempo necesario para que un suelo saturado alcance el punto de humedad correspondiente a capacidad de campo. Se detallan en la tabla 4

Otros autores (BROADMEADOW et al., 2018) han cuantificado la función de regulación de los bosques frente a inundaciones utilizando el uso del agua del bosque (interceptación, y almacenamiento de θ) y el agua retenida por la rugosidad hidráulica del bosque de la llanura aluvial de inundación. Con ello se ha llegado a cuantificar el volumen adicional de agua de inundación potencialmente usado o retenido por el bosque existente, en comparación con una cubierta de hierba alternativa.

Tabla 4. Indicadores para la función ecohidrológicas de regulación de agua RG.

INDICAD	Tiempo	
OR RG1:	de	(horas)
	retraso, t	

:



donde t_r (horas) representa el tiempo después de la lluvia cuando el θ superficial comienza a responder a una lluvia ≥ 8 mm/10 minutos, y t_0 (horas) representa el tiempo de inicio de la lluvia.

INDICADOR RG2: Tiempo de tránsito o drenaje, t (horas)

donde t_{cc} (hr) representa el tiempo en el que se alcanza θ_{cc} contado desde el momento en que cesa la lluvia en un suelo a saturación θ_{sat} . Solo para lluvias ≥ 8 mm/10 min

INDICADOR RG3: Regulación disponible en suelo en lluvias intensas, RG_{disp} (mm)

$RG_{disp} =$ donde

$$RG_{disp} = nZr \frac{\sum_{i=1}^m (\theta_{rsat} - \theta_{r0})_i}{m}$$

luvia



Representa el volumen de suelo disponible para almacenar agua ante un evento de lluvia intensa. Promedio puntos de muestreo suelo.

Se puede calcular la interceptación, por ejemplo con el LAI, para tener también el almacenamiento del vuelo (MOLINA y DEL CAMPO, 2012) y disponer del almacenamiento disponible total (vuelo y suelo). El LAI se puede obtener y extrapolar espacialmente con el producto MODIS MOD15A2H con una resolución temporal de 8 días y espacial de 500 m.

INDICADOR RG4: Regulación relativa del suelo en lluvias intensas, RGrel (%)

RGrel =

$$RGrel = \frac{\sum_{i=1}^m (\theta_{sat} - \theta_0)_i}{m}$$

INDICADOR RG5: Tasa de regulación, RG (%)

Se calcula promediando para todos los

$$RG = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{RGdisp_i}{p_i}}{m}$$

entre almacenamiento RGdisp y la lluvia intensa P

Retención (RT): La retención de agua de los ecosistemas se plantea como una cualidad que es preciso potenciar mediante la gestión a fin de ayudar a regular los extremos tanto de inundaciones como de sequías. Esta función supone el mantener unas reservas de agua edáfica lo más duraderas posible a lo largo del periodo vegetativo y por tanto es sin duda una función objetivable en la silvicultura adaptativa al cambio climático. Puede considerarse una función equilibrada y de compromiso entre la demás que proporciona indicadores coherentes para identificar situaciones de alerta temprana de decaimiento por sequía. Los indicadores establecidos aquí (Tabla 5) son los relacionados solo con el almacenamiento de agua tanto en vuelo (básicamente fitomasa viva) como en suelo a los que se ha añadido un indicador utilizado en bosques templados (FORD y



LABOSIER 2017; HENRIQUE LIMA ALENCAR et al. 2024) para tener en cuenta la resistencia del bosque a desecaciones súbitas causadas por una descompensación fuerte de la demanda hídrica.

Esta propiedad se refleja en la Directiva Marco del Agua y desde la Comisión Europea se ha desarrollado un Índice de Retención de Agua (WRI, por sus siglas en inglés) (VANDECASTEELE et al., 2018) que da la capacidad relativa del paisaje para regular o retener el agua a escala paneuropea. Tiene en cuenta los procesos físicos de intercepción de la vegetación, el almacenamiento en cuerpos de agua superficiales, la infiltración y retención en el suelo y la percolación a los reservorios de agua subterránea. Sin embargo, el WRI no separa explícitamente las funciones de retención y regulación, algo que no es necesariamente equivalente en el contexto de bosques de cabecera. En concreto, la función de retención, si se mantiene en el tiempo tras la recarga por lluvia en periodos húmedos, puede ser beneficiosa frente a sequías más o menos prolongadas y puede mantener caudales de estiaje en las corrientes de montaña, pero puede ser contraproducente frente a tormentas súbitas al disponerse de menor volumen de reserva (de agua del suelo) para regular una lluvia torrencial.

Tabla 5. Indicadores para la función ecohidrológica de retención de agua (RT).

Indicador RT1:	Retención promedio del vuelo, RTv (mm)
Indicador RT2:	Retención promedio del suelo, RTs (mm)
Indicador RT3:	Retención promedio relativa del suelo, RTsr (%)
	Zr (máximo valor posible del Agua disponible)
Indicador RT4:	Propensión a sequías súbitas, días/año

<p>Identificación de una sequía súbita (tiene un inicio rápido y una intensificación rápida):</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si el percentil de θ promedio del suelo entre 0-40 cm de una pentada en un sitio dado disminuye desde un valor \geq al percentil 40% a otro \leq del percentil 20% en 4 pentadas o menos. 2. Se mantiene al menos 3 pentadas por debajo del percentil del 30% 3. El evento termina al superarse de nuevo el percentil del 40% 	<p>Percentil 20 de θ: representa el inicio de una sequía moderada.</p>	<p>Percentil 40 de θ: representa suelos más secos de lo normal, pero no sequía.</p>
---	--	--	---

Provisión (PR): Es una de las funciones más importantes, especialmente en climas semiáridos y sub-húmedos, y normalmente se obtiene directamente a partir de observaciones de aforo y/o nivel piezométrico, o mediante modelos. En nuestro caso, aunque se prevé cierta instrumentación foronómica, se deducirá a partir de \square . Si bien las distintas fases de \square de la Figura 2 se pueden diferenciar en lo conceptual, la realidad muestra que en la ecuación (1) ET y D no se pueden desacoplar fácilmente por su mutua interacción, condicionada por la naturaleza del suelo, el tipo de cubierta vegetal, la climatología, y las condiciones de humedad del suelo (LAIO et al., 2001). Por ello, para desacoplar el D de la ET se toman intervalos de tiempo en los que las tasas de ET sean insignificantes, es decir, $\square > \square_{cc}$ en la Figura 2. Se calcula el drenaje y escurrientías a tres profundidades diferentes (Tabla 6): flujos superficiales rápidos (0-15 cm superiores), flujos subsuperficiales (15-30 cm) y flujos profundos (30-60cm). Se pueden establecer umbrales en \square para considerar un drenaje espacialmente generalizado (DEL CAMPO et al., 2019).

La estimación del excedente de agua a partir de datos de humedad del suelo es



frecuente en la literatura (PERKINS y NIMMO, 2006; JALILVAND et al., 2018; WICKI et al., 2020; DEL CAMPO et al., 2019). Para la estimación del drenaje profundo existen varios métodos que se han ido proponiendo a lo largo del tiempo y que varían de acuerdo a los procesos hidrológicos considerados y las técnicas usadas para estimarlos (lisimetría, isotopía, otros trazadores, estaciones de aforo, etc.). Una buena recopilación aparece en la URL del USGS: URL: <http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/references/index.html>

Tabla 6. Indicadores para la función ecohidrológica de provisión de agua PR. El intervalo de tiempo considerado (Δt) a considerar es variable.

Indicador PR1:	Escorrentía o Drenaje superficial rápido, Es (mm)
Si en el horizonte superficial ϵ y $d\epsilon/dt$ en este horizonte es mayor que en el intermedio subyacente, se calcula como:	$Es = I_{sup} - I_{subsup} = (nZr \frac{d\epsilon}{dt})_{sup} - (nZr \frac{d\epsilon}{dt})_{subsup}$.
Indicador PR2:	Escorrentía o Drenaje subsuperficial o hipodérmica, Ess (mm)
Si en el horizonte subsuperficial ϵ y $d\epsilon/dt$ en este horizonte es mayor que en el subyacente, se calcula como:	$Ess = (nZr \frac{d\epsilon}{dt})_{subsup} - (nZr \frac{d\epsilon}{dt})_{profunda} = (nZr \frac{d\epsilon}{dt})_{subsp} - D$
Indicador PR3:	Drenaje profundo, D (mm)
Si en el horizonte profundo ϵ y $d\epsilon/dt < 0$	$D = nZr \frac{d\epsilon}{dt}$
Indicador PR4:	Tasa de agua azul, PR (%)

$$PR = \frac{\sum_{i=1}^n (Es + Ess + D)_i}{n}$$

Uso eficiente de agua (UE): Para esta función ecohidrológica del bosque se han definido tres indicadores complementarios. Dos ellos relativos: la eficiencia en el uso de agua (magnitud relativa) y la tasa de agua verde; y un tercero que da una magnitud absoluta: productividad neta del bosque (Tabla 7).



El primero es un parámetro clave que acopla los ciclos del agua y el carbono y representa el equilibrio entre la adquisición o ganancia de carbono y el uso de agua (transpiración) que ello conlleva. Este indicador es muy variable (se usan distintas fórmulas para su cálculo) dependiendo de escala espacial, desde la hoja hasta el bioma. Por ejemplo, a nivel de hoja se considera WUE como la tasa de intercambio de vapor de agua y CO₂ entre la atmósfera y las hojas. A nivel de planta, se puede calcular como la relación entre la biomasa acumulada y el agua de transpiración durante un período determinado. A nivel de monte, se puede calcular como la relación entre la producción del monte en madera y la cantidad de agua evapotranspirada. Es importante destacar que la WUE estimada a una escala no puede transferirse directamente a otra (TOOLEY et al., 2024; WANG et al., 2020). Es decir, una alta eficiencia a nivel de hoja no implica necesariamente una alta eficiencia a nivel de árbol o monte. Su extrapolación espacial puede hacerse con teledetección (productos de NPP y ET), si bien es necesaria aún una mayor integración con modelos ecohidrológicos y con algoritmos eficientes de asimilación de datos en tiempo real a escala regional (TOOLEY et al., 2024). Por su parte, el total de agua transpirada sobre la precipitación recibida complementa al indicador PR4 pero con el agua verde en este caso.

La productividad primaria neta (NPP, por sus siglas en inglés) es un parámetro fundamental utilizado para cuantificar la tasa neta de absorción de carbono por parte de las plantas vivas que da información cuantitativa, y muy integrada, para la gestión sostenible de los recursos forestales (GAO et al., 2023). La NPP es a su vez, un componente importante del ciclo del carbono, lo que remarca su importancia en objetivos de mitigación del cambio climático global y secuestro de C. El Flujo Neto de Carbono hacia/desde los Ecosistemas Terrestres (NEP) = NPP - Respiración del suelo (gramos de carbono/metro cuadrado/año).

Tabla 7. Indicadores para la función ecohidrológicas de uso de agua UE.

Indicador UE1:		Eficiencia uso de agua (WUE), g/mm		
Cociente entre la adquisición o ganancia de carbono y el uso de agua (transpiración) de la planta o árbol, extrapolado a la masa	Unidades: Kg biomasa seca/mm transpirados por la masa o g /litros transpirados por árbol			
$WUE = \Delta \text{Biomasa en el tiempo} / \text{Agua usada durante el periodo de tiempo considerado (referido a una unidad de superficie)}$				
Indicador de los efectos ambientales (agua del suelo, ET, etc.) o técnicos (prácticas de gestión forestal) sobre el uso de agua del bosque y su productividad asociada (FERNANDES et al., 2016)	Extrapolación espacial: NPP (Copernicus) y ET (MOD16A2 - MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid). Posible mejora teledetección + modelación mecanicista	Escalabilidad ladera /masa: WUE	= Extrapolar WUE	con inventario
Indicador UE2:		Tasa de agua verde, UE (%)		

 $UE = T/P$

El periodo considerado es anual, normalmente

Indicador UE3:

Productividad primaria neta, NPP (gC/árbol/año)

5. Conclusiones

El trabajo presentado es solo un primer paso en el desarrollo de un conjunto de indicadores de las funciones ecohidrológicas de los bosques que debe irse perfeccionando y validando en sucesivas etapas tanto en su vertiente científica como práctica (MÜLLER et al., 2013). En concreto, lo correcto de su aptitud científica demanda que se verifique i) una representación clara del indicador, ii) pruebas claras de relaciones de causa-efecto relevantes, iii) una sensibilidad óptima de la representación, iv) adecuación a escalas espacio-temporales, v) alta transparencia de la derivación del indicador, vi) alto grado de validez y representatividad de las fuentes de datos disponibles, vii) alto grado de comparabilidad entre indicadores, viii) presentar óptimo grado de agregación y ix) buen cumplimiento de los requisitos estadísticos de verificación, reproducción, representatividad y validez. Por su lado, en su parte aplicada, los indicadores deben proporcionar i) información y estimaciones de las imposiciones normativas, ii) alta relevancia para procesos de toma de decisiones, iii) alta comprensibilidad y transparencia pública, iv) relación directa con las acciones de gestión, v) orientados con los objetivos medioambientales, vi) alta utilidad para sistemas de alerta temprana, vii) mensurabilidad satisfactoria, viii) alto grado de disponibilidad de datos e iv) información sobre las tendencias a largo plazo. Todos estos puntos están por tanto pendientes de verificar.

Los sensores instalados han demostrado ser robustos para monitorear el contenido y dinámica del agua del ecosistema forestal. Sin embargo, la necesidad de nuevos indicadores y umbrales de comportamiento de los mismos es una necesidad patente a fin de tener una comprensión más fundamentada y evitar falsas alarmas si el estado de humedad del bosque diera rangos inusitados. Otro desafío pendiente es la extrapolación espacial a partir de simulación, productos de humedad del suelo basados en satélites y sistemas de asimilación de datos.

6. Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior de la Comunidad de Madrid a través del contrato N° 672.128 firmado entre la Universitat Politècnica de Valencia y Tragsa de título: “Control en parcelas de investigación para la obra proyecto de protección hidrológico-forestal de embalses mediante hidrotecnias-Hidroforest MRR”, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia financiado por la Unión Europea – NextgenerationEU”. Los autores quieren expresar su especial agradecimiento a Ignacio Sánchez Moreno y Begoña de la Fuente Martín del servicio de Planificación de Espacios Protegidos de la D.G. de Biodiversidad y Recursos Naturales, de la



consejería Consejería de Medio Ambiente, Agricultura e Interior de la Comunidad de Madrid por su rol catalizador en este proyecto.

7. Bibliografía

ANDREASEN, M.; ANDREASEN, L.A.; JENSEN, K.H.; SONNENBORG, T.O.; BIRCHER, S.; 2013. Estimation of Regional Groundwater Recharge Using Data from a Distributed Soil Moisture Network. *Vadose Zone J.* 12, 1–18. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0035>

AWADA, H.; SIRCA, C.; MARRAS, S.; CASTELLINI, M.; SPANO, D.; PIRASTRU, M.; 2024. Modelling soil moisture and daily actual evapotranspiration: Integrating remote sensing surface energy balance and 1D Richards equation. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 128, 103744. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103744>

BLANCO, E.; CASADO GONZÁLEZ, M.A.; COSTA TENORIO, M.; ESCRIBANO BOMBÍ, R.; GARCÍA ANTÓN, M.; GÉNOVA FUSTER, M.; GÓMEZ MANZANEQUE, F.; MORENO SAIZ, J.C.; MORLA JUARISTI, C.; REGATO PAJARES, P.; SAINZ OLLERO, H.; 1997. Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica. Editorial Planeta, Barcelona.

BOSSEL, H. 2001. Indicators for sustainable development: Theory, method, applications. A report to the Balaton Group. International Institute for Sustainable Development: Winnipeg, Canada.

BROADMEADOW, S.; THOMAS, H.; NISBET, T.; VALATIN, G. 2018. Valuing flood regulation services of existing forest cover to inform natural capital accounts. *Forest Research*. The research agency of the Forestry Commission. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2019/02/final_report_valuing_flood_regulation_services_051218.pdf

CAÑELLAS, I.; DEL RÍO, M.; ROIG, S.; MONTERO, G.; 2004. Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. *Ann. For. Sci.* 61, 243–250. <https://doi.org/10.1051/forest:2004017>

CAÑELLAS, I.; GARCÍA, F.M.; MONTERO, G.; 2000. Silviculture and dynamics of *Pinus sylvestris* stands in Spain. *Investig. Agrar. Sist. y Recur. For.* Fuera de serie, 233–253

CARVALHO-SANTOS, C.; HONRADO, J.P.; HEIN, L.; 2014. Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecol. Complex.* 20, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>

DEL CAMPO GARCÍA, A.D.; GONZÁLEZ SANCHIS, M.C.; PÉREZ ROMERO, J.; MOLINA HERRERA, A.J.; BLANCO CANO, L.; SÁNCHEZ MORENO, I.; DE LA FUENTE MARTÍN, B.; 2022a. La selvicultura ecohidrológica como herramienta de gestión multifuncional y adaptativa: aplicación práctica en la Sierra Norte de Madrid. En: *Sociedad Española de Ciencias forestales (Ed.) 8 Congreso Forestal Español (CFE)*, Lleida 27Jun-1Jul, 2022.

DEL CAMPO, A.D.; GONZÁLEZ-SANCHIS, M.; MOLINA, A.J.; GARCÍA-PRATS, A.; CEACERO, C.J.; BAUTISTA, I.; 2019. Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. *For. Ecol. Manag.* 438, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.020>

DEL CAMPO, A.D.; OTSUKI, K.; SERENGIL, Y.; BLANCO, J.A.; YOUSEFPOUR, R.; WEI,



X.; 2022b. A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *For. Ecol. Manag.* 519, 120324. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120324>

DEL CAMPO GARCÍA A.; GONZÁLEZ-SANCHIS, M.; PÉREZ ROMERO, J.; BLANCO CANO, L.; MOLINA HERRERA A.; 2022c. Elaboración de un plan de viabilidad para la ordenación ecohidrológica de montes y cuencas de cabecera de la Sierra Norte de Madrid. Informe elaborado por la E.T.S. Ingeniería Agronómica y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Valencia a solicitud de la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad. D.G. de Biodiversidad y Recursos Naturales, Comunidad de Madrid. 142 pp. Inédito

DORIGO, W.; HIMMELBAUER, I.; ABERER, D.; SCHREMMER, L.; PETRAKOVIC, I.; ZAPPA, L.; PREIMESBERGER, W.; XAVER, A.; ANNOR, F.; ARDÖ, J.; BALDOCCHI, D.; BITELLI, M.; BLÖSCHL, G.; BOGENA, H.; BROCCA, L.; CALVET, J.-C.; CAMARERO, J.J.; CAPELLO, G.; CHOI, M.; COSH, M.C.; VAN DE GIESEN, N.; HAJDU, I.; IKONEN, J.; JENSEN, K.H.; KANNIAH, K.D.; DE KAT, I.; KIRCHENGAST, G.; KUMAR RAI, P.; KYROUAC, J.; LARSON, K.; LIU, S.; LOEW, A.; MOGHADDAM, M.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J.; MATTAR BADER, C.; MORBIDELLI, R.; MUSIAL, J.P.; OSENGA, E.; PALECKI, M.A.; PELLARIN, T.; PETROPOULOS, G.P.; PFEIL, I.; POWERS, J.; ROBOCK, A.; RÜDIGER, C.; RUMMEL, U.; STROBEL, M.; SU, Z.; SULLIVAN, R.; TAGESSON, T.; VARLAGIN, A.; VREUGDENHIL, M.; WALKER, J.; WEN, J.; WENGER, F.; WIGNERON, J.P.; WOODS, M.; YANG, K.; ZENG, Y.; ZHANG, X.; ZREDA, M.; DIETRICH, S.; GRUBER, A.; VAN OEVELEN, P.; WAGNER, W.; SCIPAL, K.; DRUSCH, M.; SABIA, R.; 2021. The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 5749–5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>

FERNANDES, T.J.G.; DEL CAMPO, A.D.; HERRERA, R.; MOLINA, A.J.; 2016. Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. *For. Ecol. Manag.* 361, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.029>

FORD, T.W.; LABOSIER, C.F.; 2017. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States. *Agric. For. Meteorol.* 247, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.031>

GAO, J.; JI, Y.; ZHANG, X.; 2023. Net primary productivity exhibits a stronger climatic response in planted versus natural forests. *For. Ecol. Manag.* 529, 120722. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120722>

HENRIQUE LIMA ALENCAR, P.; SODOGE, J.; NORA PATON, E.; MADRUGA DE BRITO, M.; 2024. Flash droughts and their impacts—using newspaper articles to assess the perceived consequences of rapidly emerging droughts. *Environ. Res. Lett.* 19, 074048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad58fa>

JALILVAND, E.; TAJRISHY, M.; BROCCA, L.; MASSARI, C.; GHAZI ZADEH HASHEMI, S.; CIABATTA, L.; 2018. Estimating the drainage rate from surface soil moisture drydowns: Application of DfD model to in situ soil moisture data. *J. Hydrol.* 565, 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.035>

KOSTER, R.D.; REICHLE, R.H.; MAHANAMA, S.P.P.; 2017. A Data-Driven Approach for Daily Real-Time Estimates and Forecasts of Near-Surface Soil Moisture. *J. Hydrometeorol.* 18, 837–843. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0285.1>



- LAIO, F.; PORPORATO, A.; FERNANDEZ-ILLESCAS, C.P.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. *Adv. Water Resour.* 24, 745–762. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00007-0)
- LEITE, P.A.M.; WILCOX, B.P.; MCINNES, K.J.; WALKER, J.W.; 2021. Applicability of soil moisture sensors for monitoring water dynamics in rock: A field test in weathered limestone. *Vadose Zone J.* 20, e20164. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20164>
- LINSER, S.; WOLFSLEHNER, B.; BRIDGE, S.R.J.; GRITTEN, D.; JOHNSON, S.; PAYN, T.; PRINS, K.; RAŠI, R.; ROBERTSON, G.; 2018. 25 Years of Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management: How Intergovernmental C&I Processes Have Made a Difference. *Forests* 9, 578. <https://doi.org/10.3390/f9090578>
- LIU, X.; JIAO, L.; CHENG, D.; LIU, J.; LI, ZONGSHAN, LI, ZHAOLIN, WANG, C.; HE, X.; CAO, Y.; GAO, G.; 2024. Light thinning effectively improves forest soil water replenishment in water-limited areas: Observational evidence from Robinia pseudoacacia plantations on the Loess Plateau, China. *J. Hydrol.* 637, 131408. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131408>
- MCCOLL, K.A.; WANG, W.; PENG, B.; AKBAR, R.; SHORT GIANOTTI, D.J.; LU, H.; PAN, M.; ENTEKHABI, D.; 2017. Global characterization of surface soil moisture drydowns. *Geophys. Res. Lett.* 44, 3682–3690. <https://doi.org/10.1002/2017GL072819>
- MCPFE; 2003. Vienna Living Forest Summit Declaration. Improved Pan European Indicators for Sustainable Forest Management as adopted by the MCPFE Expert Level Meeting 7–8 October, 2002, Vienna, Austria. In: Fourth Ministerial Conference on the Protection of the Forests in Europe.
- MILLAR, C.I.; STEPHENSON, N.L.; STEPHENS, S.L.; 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol. Appl.* 17, 2145–2151. <https://doi.org/10.1890/06-1715.1>
- MOLINA, A.J.; 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. Manag.* 269, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.037>
- MONTREAL PROCESS; 2009. Technical Notes of the Montréal Process Criteria and Indicators Criteria 1-7, third ed.; Montréal Process Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests.
- MÜLLER, F.; 2005. Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecol. Indic.* 5, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.017>
- MÜLLER, F.; BURKHARD, B.; KANDZIORA, M.; SCHIMMING, C.; WINDHORST, W.; 2013. Ecological Indicators: Ecosystem Health. In *Encyclopedia of Environmental Management*. Taylor and Francis: New York, Published online: 29 May 2013; 599–613.
- NAGEL, L.M.; PALIK, B.J.; BATTAGLIA, M.A.; D'AMATO, A.W.; GULDIN, J.M.; SWANSTON, C.W.; JANOWIAK, M.K.; POWERS, M.P.; JOYCE, L.A.; MILLAR, C.I.; PETERSON, D.L.; GANIO, L.M.; KIRSCHBAUM, C.; ROSKE, M.R.; 2017. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework. *J. For.* 115, 167–178. <https://doi.org/10.5849/jof.16-039>
- O'GEEN, A. T.; 2013. Soil Water Dynamics. *Nature Education Knowledge* 4(5):9



PERKINS Y NIMMO, 2006. Applicability of the Darcian method for recharge estimation. USGS, Ground Water resources program. <https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/DarcianRecharge/>

PORPORATO, A.; D'ODORICO, P.; LAIO, F.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; 2003. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme. *Adv. Water Resour.* 26, 45–58. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00094-5)

RASCÓN, J.; CORROTO, F.; 2019. Evolución temporal del área de los pinares del Valle de Lozoya Temporal evolution in the pine forests of Valle de Lozoya. *Rev. de investig. agroproducción sustentable* 3(2): 86-97, ISSN: 2520-9760

RIGBY, J.R.; PORPORATO, A.; 2006. Simplified stochastic soil-moisture models: a look at infiltration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 861–871. <https://doi.org/10.5194/hess-10-861-2006>

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; PORPORATO, A.; LAIO, F.; RIDOLFI, L.; 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. *Adv. Water Resour.* 24, 695–705. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00004-5)

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; PORPORATO, A.; RIDOLFI, L.; ISHAM, V.; COXI, D.R.; 1999. Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.* 455, 3789–3805. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0477>

SALOMÓN, R.; RODRÍGUEZ-CALCERRADA, J.; GONZÁLEZ-DONCEL, I.; GIL, L.; VALBUENA-CARABAÑA, M.; 2017. On the general failure of coppice conversion into high forest in *Quercus pyrenaica* stands: a genetic and physiological approach. *Folia Geobot.* 52, 101–112. <https://doi.org/10.1007/s12224-016-9257-9>

SEIDL, R.; SPIES, T.A.; PETERSON, D.L.; STEPHENS, S.L.; HICKE, J.A.; 2016. REVIEW: Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *J. Appl. Ecol.* 53, 120–129. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12511>

TOOLEY, E.G.; NIPPERT, J.B.; RATAJCZAK, Z.; 2024. Evaluating methods for measuring the leaf area index of encroaching shrubs in grasslands: From leaves to optical methods, 3-D scanning, and airborne observation. *Agric. For. Meteorol.* 349, 109964. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109964>

VANDECASTEELE, I.; MARÍ I RIVERO, I.; BARANZELLI, C.; BECKER, W.; DREONI, I.; LAVALLE, C.; BATELAAN, O.; 2018. The Water Retention Index: Using land use planning to manage water resources in Europe. *Sustain. Dev.* 26, 122–131. <https://doi.org/10.1002/sd.1723>

VOROBEVSKII, I.; LUONG, T.T.; KRONENBERG, R.; PETZOLD, R.; 2024. High-resolution operational soil moisture monitoring for forests in central Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 28, 3567–3595. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3567-2024>

WANG, Y.; DEL CAMPO, A.D.; WEI, X.; WINKLER, R.; LIU, W.; LI, Q.; 2020. Responses of forest carbon and water coupling to thinning treatments from leaf to stand scales in a young montane pine forest. *Carbon Balance Manag.* 15, 24. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00159-y>

WEI, X. (ADAM), HARPER, R.; LIU, S.; 2023. Global reviews on forest management and provision of hydrological functions. *For. Ecol. Manag.* 536, 120903. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120903>



WICKI, A.; LEHMANN, P.; HAUCK, C.; SENEVIRATNE, S.I.; WALDNER, P.; STÄHLI, M.; 2020. Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides* 17, 1881–1896. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01400-y>

WINKEL, G.; LOVRIĆ, M.; MUYS, B.; KATILA, P.; LUNDHEDE, T.; PECURUL, M.; PETTENELLA, D.; PIPART, N.; PLIENINGER, T.; PROKOFIEVA, I.; PARRA, C.; PÜLZL, H.; ROITSCH, D.; ROUX, J.-L.; THORSEN, B.J.; TYRVÄINEN, L.; TORRALBA, M.; VACIK, H.; WEISS, G.; WUNDER, S.; 2022. Governing Europe’s forests for multiple ecosystem services: Opportunities, challenges, and policy options. *For. Policy Econ.* 145, 102849. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102849>

WOLFS, D.; SWINNEN, E.; VAN HOOLST, R.; TOTÉ, C.; 2023. Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy" "CGLOPS-1," ESA-UE. ed. Service Contract N° 941115 – ISP – 2021.

WYATT, B.M.; OCHSNER, T.E.; FIEBRICH, C.A.; NEEL, C.R.; WALLACE, D.S.; 2017. Useful Drainage Estimates Obtained from a Large-Scale Soil Moisture Monitoring Network by Applying the Unit-Gradient Assumption. *Vadose Zone J.* 16, 1–15. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.01.0016>