

Conferencias y Ponencias del 8º Congreso Forestal Español

La selvicultura ecohidrológica como herramienta de gestión multifuncional y adaptativa: aplicación práctica en la Sierra Norte de Madrid

**Ecohydrological silviculture as a multifunctional
and adaptive management tool: practical application
in Sierra Norte (Madrid province, Spain)**

Del Campo García, A.D.^{1*}; González Sanchis, M.C.¹; Pérez Romero, J.¹;
Molina Herrera, A.J.¹; Blanco Cano, L.¹; Sánchez Moreno, I.²;
De La Fuente Martín, B.²

¹ *Universitat Politècnica de Valencia. ETS Ingenieria Agronómica y del Medio Natural.
Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Re-ForeST.*

² *Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Agricultura. Comunidad de Madrid.*

* Autor de correspondencia: ancamga@upv.es

Resumen

Dado el interés que ha suscitado la gestión forestal de base ecohidrológica, este trabajo establece las bases conceptuales y metodológicas que justifican y enmarcan esta técnica, basándose en una aplicación práctica en la Sierra Norte de Madrid. Se establecen los servicios ecosistémicos (SE) relacionados con el agua y que tienen relevancia en gestión forestal en el contexto actual y se justifica la necesidad de gestionar los bosques mediante un enfoque de procesos ecohidrológicos que son los que sustentan la provisión de tales SE. A continuación, se detalla qué indicadores pueden usarse para el análisis ecohidrológico de los componentes biofísicos (suelo, vegetación, hidrología y atmósfera) y socioeconómico en la zona de estudio. De este análisis manan los objetivos relevantes de cara a una gestión ecohidrológica del bosque. En el caso práctico analizado, el régimen climático y de humedad del suelo, su textura, las clases naturales de edad de las masas existentes, la cobertura y la fisiografía fueron los factores determinantes para establecer la vocación y viabilidad de una selvicultura ecohidrológica en distintas subunidades de la comarca. En general la viabilidad es muy buena, habiéndose obtenido más de 17000 ha de *Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* con potencialidad muy alta para producción de agua. Esto garantizaría 1 hm³ de agua anual por cada 1000 ha tratadas, indicador conservador que asume un aumento neto de 100 mm anuales con la selvicultura ecohidrológica. Asumiendo una vida útil de los tratamientos de unos 10 años, estos datos podrían ser incluso suficientes como para costear los tratamientos selvícolas sólo con la producción de agua, a un precio de 0,15 €/m³. Este trabajo pretende marcar una línea de trabajo en selvicultura ecohidrológica que sirva de base para una gestión multifuncional de nuestras masas y que valore objetivamente los servicios de provisión y otras funciones del bosque, aspectos socialmente muy demandados en la actualidad.

Palabras clave: Ecohidrología, relaciones bosque-agua, adaptación cambio climático, *Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica*.

Summary

Given the interest that ecohydrological-based forest management has aroused, this paper establishes the conceptual and methodological bases that justify and frame this technique, based on a practical application in Sierra Norte (Madrid province, Spain). The ecosystem services (ES) related to water and relevant in forest management in the current context are established, and the need to manage forests through an ecohydrological process approach is justified, which are the ones that support the provision of such ES. We describe which indicators can be used for the ecohydrological analysis of the biophysical (soil, vegetation, hydrology and atmosphere) and socioeconomic components in the study area. From this analysis the relevant objectives for an ecohydrological management of the forest flow. In the practical case analyzed, the climatic regime and soil moisture, its texture, the natural age classes of the existing masses, the cover and the physiography were the determining factors to establish the vocation and viability of an ecohydrological silviculture in different subunits of the region. In general, viability is very good, having obtained more than 17,000 ha of *Pinus sylvestris* and *Quercus pyrenaica* with very high potential for water production. This would guarantee 1 hm³ of water per year for every 1,000 ha treated, a conservative indicator that assumes a net increase of 100 mm per year with ecohydrological forestry. Assuming a useful life of the treatments of about 10 years, these data could even be enough to pay for silvicultural treatments with water production alone, at a price of 0.15€/m³. This work aims to mark a line of work in ecohydrological forestry that serves as the basis for a multifunctional management of our forests and that objectively values the provision services and other functions of the forest, socially highly demanded aspects today.

Keywords: Ecohydrology, forest-water relationships, climate change adaption, *Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica*.

1. Introducción

1.1. Procesos ecohidrológicos, servicios ecosistémicos y selvicultura

La selvicultura ecohidrológica focaliza el agua como elemento clave que fundamenta y modula los procesos ecosistémicos de primer orden que sustentan a los ecosistemas forestales, tales como el crecimiento, la productividad o el balance hidrológico entre necesidades y excedentes del ecosistema (agua verde/agua azul), que a su vez determina aspectos como la sensibilidad a sequías y decaimiento de las masas o el riesgo de incendio (Del Campo *et al.*, 2017). El enfoque hidrológico es doble: por un lado, el agua está de forma más o menos explícita en los objetivos de gestión y por otro es parte esencial y constituyente del diseño de los tratamientos selvícolas. Una gestión orientada al agua debe partir de la cuantificación de los flujos y tanques de almacenamiento, prestando especial atención a la infiltración y almacenamiento en suelo y subsuelo (Del Campo *et al.*, 2019b), dado el papel clave de estos procesos en el mantenimiento de la eco-resiliencia de la cuenca y los ecosistemas forestales.

Las relaciones bosque-agua están por tanto en la base de la gestión forestal de base ecohidrológica, y es el entendimiento y manipulación de los procesos ecohidrológicos lo que permite objetivar la provisión de servicios ecosistémicos (SE) relacionados con el agua que puedan ser de interés para el gestor (*Figura 1*). Una reducción del área foliar, por ejemplo, mediante una clara, disminuye la superficie transpirante (reducción flujo agua planta-atmósfera), lo que supone una mayor entrada de precipitación neta (disminución interceptación), una mayor duración del agua del suelo (aumento reserva y mayor excedente en periodo húmedo) y un aumento del uso de agua de los árboles remanentes (aumento vigor, hidratación y crecimiento); si bien también puede aumentar la evaporación desde el suelo y el estrato arbustivo, por una mayor llegada de radiación y el aumento de la turbulencia aerodinámica (Del Campo *et al.*, 2019a). Estas afecciones dependen de la intensidad del tratamiento, o las clases de edad afectadas, pero también de la ecofisiología hídrica de la especie en cuestión, dada la diversidad de rasgos funcionales de respuesta al estrés hídrico que presentan las especies forestales mediterráneas (Del Campo *et al.*, 2020). Por tanto, la modificación de la vegetación, tanto estructural como taxonómicamente, afecta a los procesos ecohidrológicos y con ellos a la distribución y flujos del agua, al balance energético del bosque (cociente de Bowen) y a la acumulación y flujos del carbono. Según la secuencia anterior, la selvicultura parte inicialmente de la afección a la disponibilidad de recursos básicos (agua, luz, nutrientes), lo que a su vez induce cambios en los procesos ecohidrológicos y con ello cambios funcionales en los ciclos de carbono y agua que finalmente determinan la provisión de SE (*Figura 1*). Estas respuestas funcionales pueden ser la base para guiar los tratamientos forestales, más allá de buscar estructuras tipificadas y composición de especies determinadas (SEIDL *et al.*, 2016). Solamente desde este enfoque que parte de la función para llegar a la estructura (y no al contrario) se puede objetivar y diseñar una gestión forestal multifuncional y adaptativa que permita identificar situaciones con mayor o menor propensión a alteraciones por sequía,

desequilibrios hídricos, problemas de estancamiento del crecimiento, etc. y que más podrían beneficiarse de las prácticas de gestión, optimizando así la toma de decisiones prácticas.

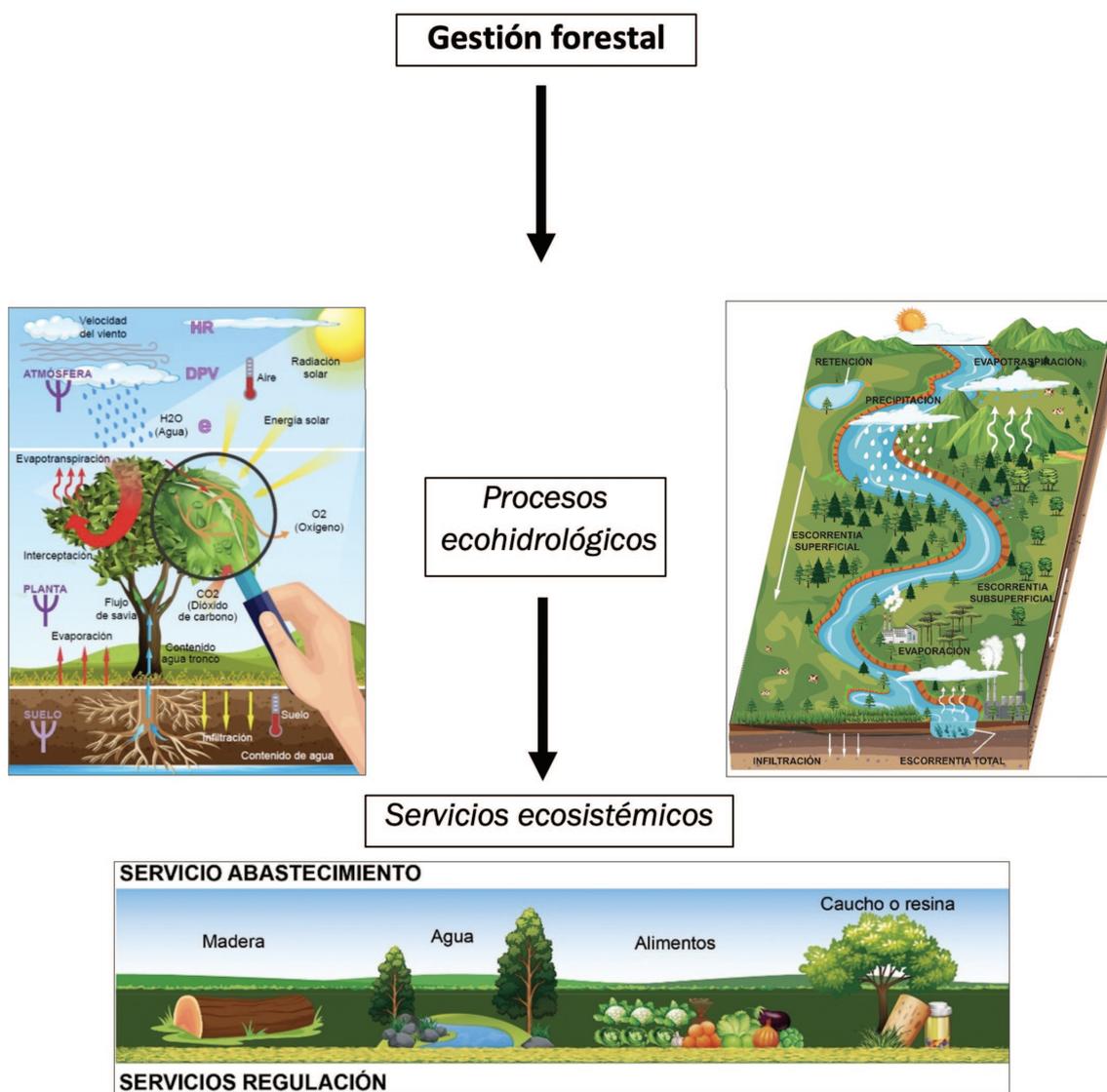


Figura 1. Representación de la secuencia lógica de la selvicultura ecohidrológica (de los procesos a los servicios ecosistémicos)

(Fuente: Vargas Bohorquez, 2021)

La selvicultura ecohidrológica así planteada puede abarcar un abanico amplio de tratamientos forestales al vuelo y/o al suelo, incluyendo cortas de mejora (ej. reducción de la densidad), de regeneración, repoblación forestal, mejora de pastizales/sistemas agrosilvopastorales, fuego técnico, etc. según los SE objetivados, y una vez identificados y representados espacial y temporalmente los procesos a modificar, lo cual requiere a menudo el uso de modelos basados en procesos. Para una mejor iden-

tificación de estos procesos y objetivos ecohidrológicos, el bosque se puede conceptualizar como un volumen de suelo-planta-atmósfera (ecohidro-vóxel, EHV) (*Figura 2*) con distintos compartimentos que van desde la roca madre y el saprolito hasta la capa límite de la parte superior del dosel (pasando por suelo profundo, mantillo, troncos, estrato arbustivo, copas, etc.). Cada compartimento tiene unos rangos de volumen (ej. su estado hídrico en mm) y de flujos (ej. tasas de evaporación mm/día), tanto internos como hacia el exterior del EHV que puede resultar de mayor o menor interés. Por ejemplo, servicios de provisión y regulación hídrica como la recarga de acuíferos, el mantenimiento de caudales mínimos de estiaje, el control de la escorrentía superficial, la retención de agua por la vegetación (que contribuye a un menor riesgo de incendio y a una menor afección por sequía meteorológica), o el efecto refrigerante del bosque, etc. nos llevarán a focalizar la gestión hacia unos compartimentos u otros del EHV (*Figura 2*).

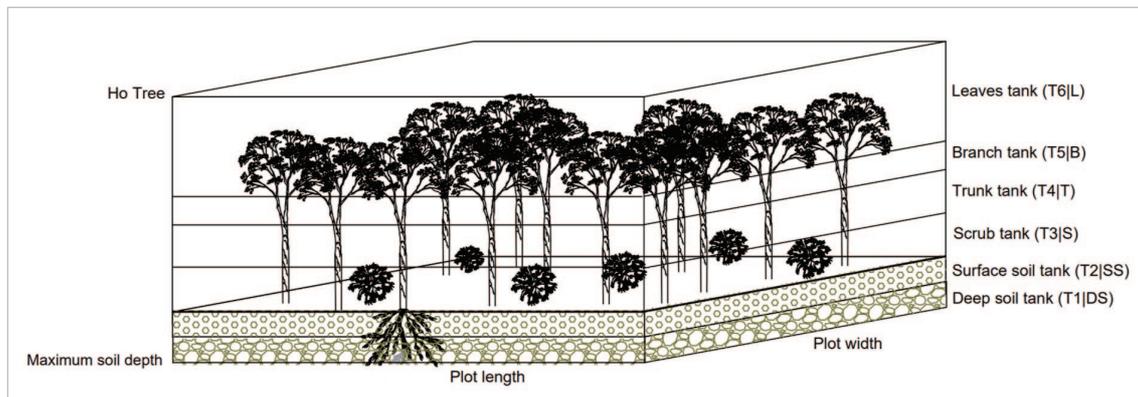


Figura 2. Representación teórica del EHV con seis tanques (suelo profundo, suelo superficial, matorral, tronco, ramas gruesas y copas). La parcela es de 50x50 metros y la altura del cubo va desde la profundidad máxima del suelo hasta la altura dominante de los árboles.

Fte.: Elaboración propia.

1.2. Carbono, Agua, Fuego y Eco-resiliencia (CAFE) en la silvicultura ecohidrológica

La utilidad de la silvicultura ecohidrológica como herramienta de gestión multifuncional y adaptativa radica en que la reproducción y entendimiento de los procesos ecohidrológicos conecta con los ciclos del carbono, el agua y las perturbaciones (fuego y sequías), y ello permite objetivar SE derivados de estos procesos y con ello abordar una gestión forestal de base ecohidrológica. Esto permite atender SE del Carbono, del Agua, el Fuego y la Eco-resiliencia (concepto CAFE de la silvicultura de base ecohidrológica).

En lo relativo al Carbono, la producción primaria está en la base de los procesos ecohidrológicos y es contemplada en los modelos más comunes tales como Biome-BGCMuSo (Hidy *et al.*, 2016) o Rhessys (Tague y Band, 2004). Se trata de considerar los bienes y servicios directamente derivados de esta producción primaria: madera, biomasa, secuestro de C (silvicultura del carbono), etc. Los objetivos, planificación y tratamientos silvícolas a plantear son los usualmente tratados en

selvicultura en su sentido productivista (plena ocupación del espacio, reducción edad natural a un turno óptimo, etc.). Priorizar SE relacionados con el carbono obliga a considerar la aptitud del territorio en lo referente a su productividad o calidad de estación, que deberán ser en todo caso medio-altas.

Respecto al Agua, el papel del bosque en el ciclo hidrológico es fundamental y ello ha dado lugar a diferentes técnicas de gestión forestal con un objetivo hidrológico preferente sobre el maderable. Existen enfoques centrados en la protección del suelo (como la restauración hidrológico forestal, RHF), y enfoques que persiguen el aumento del agua escurrida o infiltrada en la cuenca para mejorar los caudales líquidos (producción de agua). En España ha dominado mayoritariamente el uso de la cubierta forestal para el control de la torrencialidad y la protección del suelo frente a la erosión hídrica, si bien existen experiencias desarrolladas en Levante (Molina y Del Campo, 2012; Del Campo *et al.*, 2014; González-Sanchis *et al.*, 2015) orientadas a la producción y provisión de agua, más desarrolladas en otros países (Troendle *et al.*, 2001). Simplificando esta dicotomía en términos de estructura forestal, podría decirse que los objetivos de protección del suelo y calidad del agua pasan por el logro de espesuras completas de la masa, mientras que los objetivos de producción de agua plantean aperturas de la masa en un porcentaje mínimo del área de la cuenca para lograr un aumento significativo del agua azul (caudal o infiltración) (Stednick, 1996).

En lo relativo al Fuego, la modificación de la vegetación afecta al comportamiento del fuego, los efectos del incendio y los costes de extinción, dados sus efectos en la carga de combustibles y la humedad de los mismos (hidratación del complejo suelo-planta, Garcia-Prats *et al.*, 2015). Por tanto, los principios de la selvicultura preventiva y la creación de bosques resistentes al fuego (Agee y Skinner, 2005) también se pueden incluir entre los objetivos de una selvicultura ecohidrológica (González-Sanchis *et al.*, 2019). La humedad de los combustibles finos (compartimentos copa, arbustivo y mantillo del EHV) ejemplifica variables de interés en este caso.

La Eco-resiliencia surge como un enfoque de la selvicultura adaptativa ante el cambio climático, tratando de aumentar la disponibilidad de agua para el arbolado mediante espesuras intermedias que mejoren el balance hídrico de la masa. Es lo que se conoce como “riego al bosque” (Grant *et al.*, 2013) y permite proteger el C acumulado en el bosque frente a perturbaciones mayores. El aumento de la biodiversidad estructural también se relaciona con esta eco-resiliencia al cambio climático. Estos aspectos son de mayor interés en áreas semiáridas donde la provisión de bienes y servicios por los bosques está amenazada por el cambio global y más específicamente por las sequías más intensas (Allen *et al.*, 2010; Lindner *et al.*, 2014). El crecimiento, la conductancia del dosel (Gs), el régimen de humedad del suelo o los distintos componentes de la evapotranspiración (transpiración y evaporación del suelo) son rasgos y procesos de interés en este caso.

Estas distintas aproximaciones son en realidad complementarias y forman parte de un mismo sistema interrelacionado a través de los procesos ecohidrológicos, de modo que combinando modelación con información de campo y/o satelital (González-Sanchis *et al.*, 2019) se puede desarrollar la práctica de una selvicultura de base

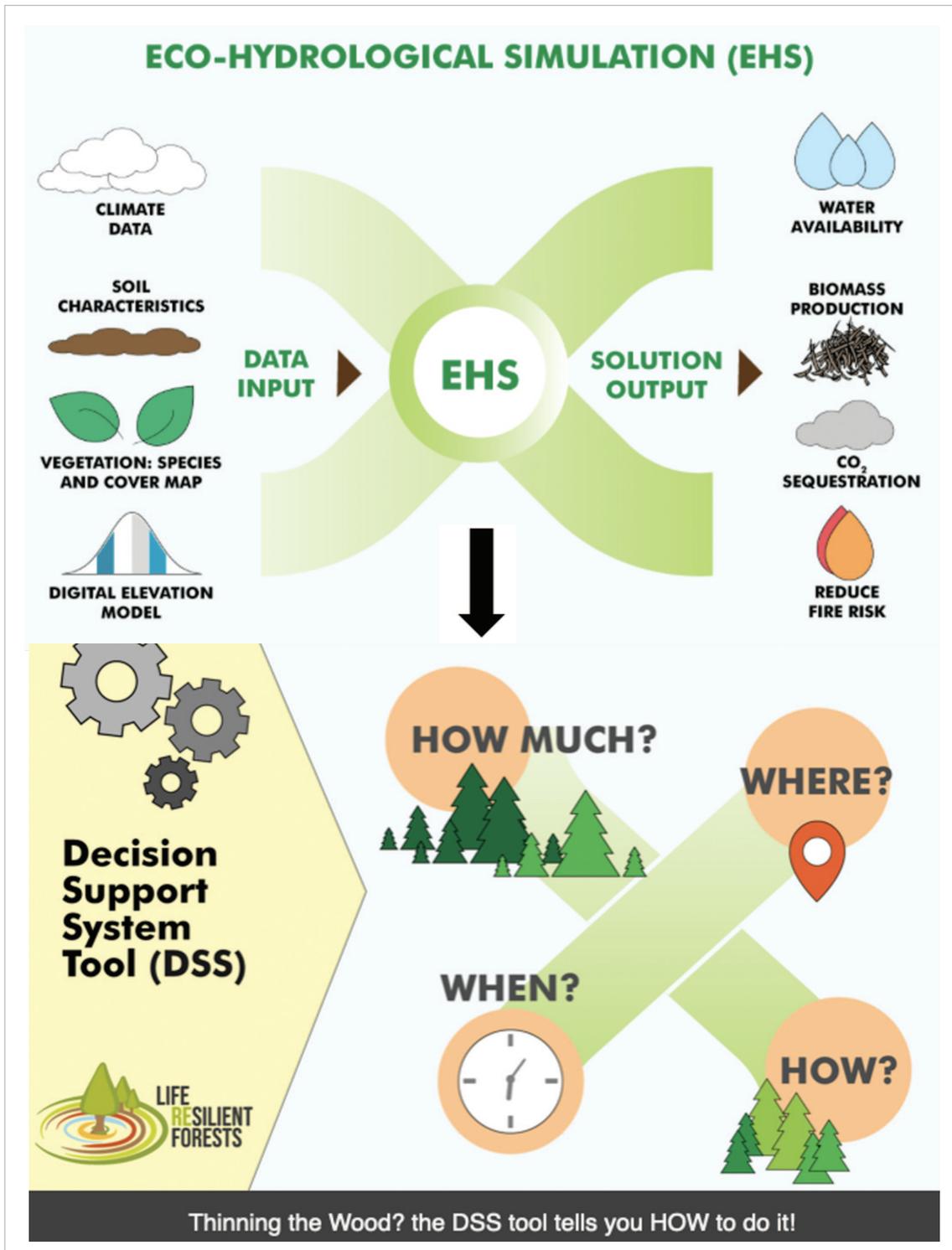


Figura 3. Representación gráfica del enfoque de Gestión Forestal desarrollado en el proyecto Life Resilient Forests donde un Sistema de Apoyo a la Decisión (herramienta CAFE) basado en simulación ecohidrológica y algoritmos de optimización permite al gestor forestal seleccionar los servicios ecosistémicos y los tratamientos óptimos para alcanzarlos

(Fte: www.resilientforest.eu)

ecohidrológica (*Figura 3*). Esta selvicultura puede contemplar todo el espectro CAFE o centrarse solo en una cuantificación parcial de los SE en los que tenga una mayor vocación el territorio afectado.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo elaborar un plan de viabilidad para la ordenación ecohidrológica de montes y cuencas de cabecera de la Sierra Norte de Madrid, a solicitud de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Agricultura de la Comunidad de Madrid a la Universidad Politécnica de Valencia. Como objetivo subordinado al anterior, se pretende usar este caso de estudio para desarrollar una metodología práctica que enmarque el diagnóstico de un territorio forestal (su aptitud y potencialidad) de cara a su ordenación ecohidrológica según los SE relacionados con el carbono, agua, fuego y eco-resiliencia.

3. Metodología

Para estudiar la viabilidad de una ordenación y/o selvicultura ecohidrológica en un territorio concreto hemos establecido una jerarquía de escalas y métodos de diagnóstico/análisis complementarios. Un primer nivel de mesoescala abarca al territorio continuo (cuenca o subcuenca), incluyendo los distintos usos del suelo (forestal o no) y pretende identificar su vocación para una selvicultura ecohidrológica en sus dimensiones de CAFE. De aquí debe manar, por ejemplo, la mayor o menor vocación de la cuenca para producir agua del bosque frente a una selvicultura más productiva (carbono) o frente a tratamientos más orientados a la conservación del suelo (agua-protección). Este paso concluye con una clara identificación de esta aptitud CAFE del territorio y de los servicios ecosistémicos específicos que se deberían objetivar en la gestión forestal ecohidrológica. El segundo nivel de diagnóstico baja a escala de masas forestales y analiza su potencialidad para ese/esos objetivos concretos identificados en el análisis previo. El resultado final es una clasificación de potencialidad de las distintas masas y rodales forestales para la producción de los servicios ecosistémicos seleccionados y por tanto la posibilidad de orientar la selvicultura hacia aquellas con mayor potencialidad. El tercer nivel aborda el diseño selvícola en sí (tipo, ubicación e intensidad de los tratamientos, *Figura 3*) e incumbe la reproducción mecanicista de los procesos ecohidrológicos identificados y la subsiguiente cuantificación de los SE derivados en el tiempo y el espacio. Este nivel incumbe un mayor esfuerzo de parametrización en los modelos a emplear y la necesidad de apoyo instrumental para validar los procesos y resultados arrojados por la modelación, pero es la vía necesaria para cuantificar los SE (Komatsu y Kume, 2020). En cualquiera de las tres opciones, la caracterización biofísica y socioeconómica del territorio es el paso previo de la ordenación territorial.

Este documento contempla los dos niveles previos referidos en el párrafo previo y comienza con una identificación de los aspectos biofísicos del medio que ser-

virán para delimitar los objetivos y alcance potencial de una selvicultura de base ecohidrológica en la cuenca vertiente al embalse de El Atazar (Madrid). Se hace una caracterización de los 5 subsistemas fundamentales que confluyen e interaccionan en un territorio determinado: atmósfera, suelo-fisiografía, planta-ecosistema, hidrología y socioeconómico. Sobre este encuadre se evalúa la vocación a nivel comarcal-regional para los objetivos ecohidrológicos de Carbono, Agua, Fuego y Eco-resiliencia (CAFE), si bien este trabajo se ha centrado fundamentalmente en la parte hidrológica y en concreto en la producción de agua. Seguidamente, a una escala de bosque, se aplica el método AHP (proceso de jerarquía analítica o Analytical Hierarchy Process) para ponderar las variables que intervienen en el objetivo seleccionado en el paso previo.

3.1. Caracterización subsistemas atmósfera, suelo, bosque, hidrológico y socioeconómico

Para focalizar los SE de interés se caracteriza la Atmósfera, el Suelo (gea en sentido amplio), el Sistema Hidrológico, la Planta (ecosistema forestal), y el Sistema socioEconómico (ASHPE en adelante). De esta caracterización se extraen una serie de indicadores genéricos para cada subsistema ASHPE a fin de evaluar la vocación CAFE del territorio. Estos indicadores se emplean en esta evaluación a mesoescala y deben apuntar a procesos y variables directamente implicadas en CAFE, promediándose para dar un valor por subsistema y global. Al tratarse de un primer diagnóstico de vocación general, no se ponderan a fin de que la capacidad intrínseca del territorio se exprese a través de cargas o puntuaciones en varios de estos indicadores (son recomendables al menos 4-5 indicadores por subsistema ASHPE). En el caso que nos ocupa, se caracterizó el medio (omitida por simplicidad) y se seleccionaron los indicadores ASHPE representativos de cada uno de los cinco subsistemas fundamentales (*Tabla 1*). Sólo figuran los indicadores de Agua-producción. A cada indicador se le asigna una función genérica del tipo a, b o c (*Figura 4*) con respecto al objetivo de producción de agua y, seguidamente, se establecen valores umbra-

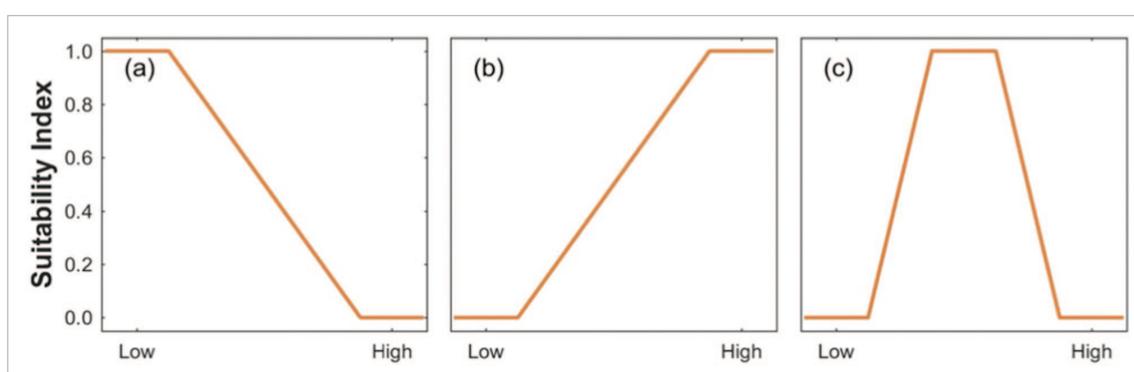


Figura 4. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema (ASPHE) para objetivar SE relacionados con el componente Agua (producción) en selvicultura ecohidrológica. Decisión que se quiere tomar: realizar una selvicultura para producir agua en cantidad. A: Atmósfera, S: Suelo, Sistema Hidrológico (H), ecosistema forestal (P) y sistema socioeconómico (E)

les en base a la bibliografía y el criterio experto (*Tabla 1*). Ello resulta en un valor por indicador que es promediado con todos los de su subsistema y finalmente se promedian los cinco subsistemas para dar una primera aproximación de la vocación intrínseca de la cuenca para la selvicultura ecohidrológica (en este caso para la producción de agua).

Tabla 1. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema (ASPHE) para objetivar SE relacionados con el componente Agua (producción) en selvicultura ecohidrológica. Decisión que se quiere tomar: realizar una selvicultura para producir agua en cantidad. A: Atmósfera, S: Suelo, Sistema Hidrológico (H), ecosistema forestal (P) y sistema socioeconómico (E)

Subsistema	Indicadores relevantes para la producción de agua en cantidad	Detalle del indicador	Función esperada	Valor 0	Valor 1
A	Precipitación anual, mm	Entrada de agua al sistema hidrológico (Hibbert <i>et al.</i> , 1982)	B	380	900
A	Densidad erosividad R-factor/P	Agresividad de la lluvia (Panagos <i>et al.</i> , 2015a)	A	2,5	1,2
A	Índice de aridez (P/ET _o)	Indicador descompensación hídrica de un clima entre entradas y demanda atmosférica	B	0,4	1
A	Estacionalidad periodo húmedo (Po+Pi/P)	Solape periodo húmedo con periodo de menor evaporación (otoño e invierno).	B	0,5	0,7
A	Periodo vegetativo (grados día)	Indicador climático del uso consuntivo del agua por la vegetación (Marchi <i>et al.</i> , 2020)	A	4	2
S	% días SM>40% AD	Indicador edáfico del uso consuntivo del agua por la vegetación (http://bec.icm.csic.es)	B	0	67
S	Infiltrabilidad y conductividad hidráulica suelo (Kc sat)	Capacidad del suelo de infiltrar P incidente y favorecer el flujo hipodérmico frente al hortoniano (Del Campo <i>et al.</i> , 2019b)	B	10	60
S	Pendiente media	Afecta a la vulnerabilidad a la erosión y a la capacidad de drenaje de la ladera.	A	30	10
S	Erosionabilidad suelo (Factor K RUSLE)	Erosionabilidad del suelo (Panagos <i>et al.</i> , 2014)	A	0,041	0,03
S-	Factor topográfico (LS- RUSLE)	Factor LS RUSLE (Panagos <i>et al.</i> , 2015b)	A	7,5	0,1
H-	Rango caudales (Q25/Q75)	Indicador estacionalidad cursos agua (Cedex)	B	1	5
H-	Rango piezometría (Q25/Q75)	Indicador estacionalidad masas subterráneas (Cedex)	B	1	1,5
H	Rango agua embalsada media (Q25/Q75)	Indicador estacionalidad embalses (Cedex)	B	1	1,5

(Cont. pág. siguiente)

(Viene de pág. anterior)

Subsistema	Indicadores relevantes para la producción de agua en cantidad	Detalle del indicador	Función esperada	Valor 0	Valor 1
H	Impacto 1 hm ³ /año (equiv 1000 ha) sobre reserva anual (%)	Indicador de un impacto potencial de 1 hm ³ adicional en el sistema hidrológico (agua embalsada)	B	0	5
H-	Vulnerabilidad calidad química agua superfic. subterránea	Vulnerabilidad calidad aguas	A	1	0
P	Uso agua spp arbóreas principales (mm/día)	Uso consuntivo de agua de las especies forestales (revisión bibliográfica)	B	0,1	2,5
P	Interceptación spp principales (%Pg)	Tasas de interceptación estimada para las masas de la especie (revisión bibliográfica)	B	10	25
P	FCC, %	Cobertura o fracción de cabida cubierta del arbolado (CVEN Tragsa ¹)	B	50	85
P	Clases naturales edad	Disem/Rep: 0; Mte. bravo: 0,4; Latizal Bajo: 0,7; Lat. Alto: 1; Fustal Bajo-Medio: 0,75; Ftl. alto: 0,5 (CVEN Tragsa ¹)	C	0,0	1
P	Vulnerabilidad biodiversidad	Presencia de endemismos u otras especies sensibles a la selvicultura	A	1	0
E	Complejidad técnica ejecución	Adecuación dasonómica masas existentes para la selvicultura. Forma Ppal. Masa (de irregular a coetánea)	B	0	1
E	Mejora o estímulo de economía local	% población dedicada al sector forestal. Escasez agua para suministros públicos, riegos o concesiones.	B	0,0	1
E	Encaje en políticas	Superficie con protección alta / superficie total (IDEM, Madrid ²)	B	0,0	1
E	Calidad/fragilidad paisaje, %	Superficie con calidad alta + superficie con vulnerabilidad alta / superficie total (IDEM, Madrid ²)	A	1	0

¹ Central de Valoración de Ecosistemas Naturales, TRAGSA.² Infraestructura de datos espaciales de la Comunidad de Madrid.

Una vez completada esta evaluación, se pasa a la escala de monte, donde se realiza una evaluación de los ecosistemas forestales para ese/esos objetivos concretos emanados de este paso.

3.2. *El proceso de jerarquía analítica (AHP)*

El segundo nivel de evaluación del territorio atiende específicamente a los sistemas forestales representativos de la cuenca y a los objetivos emanados del análisis anterior. A partir de estos objetivos (SE a focalizar) se identifican los procesos ecohidrológicos directamente implicados en ellos y se valoran cuantitativamente mediante variables que llevan asignado un peso proporcional a su importancia. La integración de esta información geoespacial se realiza mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP) (Saaty, 2008) que permite el análisis y evaluación multicriterio en el análisis de idoneidad. El proceso de jerarquía analítica (AHP) es el método más ampliamente usado y es considerado como el más robusto de análisis multicriterio (Kaim *et al.*, 2018). Este análisis ayuda a capturar tanto aspectos subjetivos como objetivos de una decisión al reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones por pares y luego sintetizar los resultados.

En el caso de estudio, se han establecido unos criterios y subcriterios (variables que gobiernan los procesos identificados en el punto previo). Por ejemplo, si se trata de producir agua mediante recarga de acuíferos, se puede identificar la conductividad hidráulica (Ks) del suelo como una de las variables que intervienen en el proceso hidrológico de drenaje profundo. La Ks se puede subdividir en clases que son evaluadas entre sí con la escala introducida por (Saaty, 2008) y además la Ks se enfrenta a otras variables responsables del proceso de recarga de acuíferos por el mismo método. Las comparaciones por pares en el AHP se determinan con valores de 9 a 1/9. A través de la matriz de comparación por pares, el AHP calcula la ponderación para cada criterio. La limitación del AHP es su subjetividad; en este caso, los pesos se asignaron por varios expertos en ecología de la UPV. Con estos pesos se ponderaron las capas ráster de cada una de las variables con un tamaño de píxel de 30 m de lado y se obtuvo el mapa de idoneidad. La integración de información geoespacial utilizando el enfoque AHP permite el análisis y evaluación multicriterio en el análisis de idoneidad de la tierra.

3.3. *Aplicación a la cuenca vertiente al embalse de El Atazar (Madrid)*

La Sierra Norte madrileña es una comarca que se encuentra situada en el extremo norte de la Comunidad Autónoma de Madrid y tiene una superficie administrativa de 1.260 km² (15,7% de Madrid). Su vértice superior es el puerto de Somosierra (41°09' N; 03°32' W) y el más meridional está al suroeste (40°47' N; 03°58' W). A este y oeste está limitada por las provincias limítrofes de Guadalajara y Segovia. Los principales municipios que comprenden la comarca (42) se presentan en la *Figura 5*. El área de estudio ocupa 924,87 km², un 73,4% de la comarca y es la cuenca vertiente al embalse de El Atazar (*Figura 5*). Se trata de una zona de cabecera de cuenca donde hay fundamentalmente una gran unidad ambiental diferenciada, la Sierra silíceo, donde se da un uso fundamentalmente ganadero y forestal.

La amplitud del territorio (casi 1000 km²) obliga a subdividirlo en componentes naturales (elementos físicos, biológicos y ecológicos), si bien también es preciso considerar componentes humanos y culturales (actividades antrópicas) que mo-

delan el paisaje, los usos y las formas de habitar el territorio. Es preciso que las unidades territoriales de paisaje trabajen con escalas adecuadas a los fines de este estudio, por lo que se optó por una zonificación basada en unidades hidrológicas (o subcuencas), obtenidas a partir del MDT proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional, cuya resolución es de 25 m². Para ello se ha empleado la aplicación de GRASS que se encuentra dentro del programa QGIS 3.16. Como resultado se han obtenido 5 unidades hidrológicas distintas, con un tamaño medio de 184,7 km², que quedan sintetizadas en la *Tabla 2* y reproducidas en la *Figura 5*.

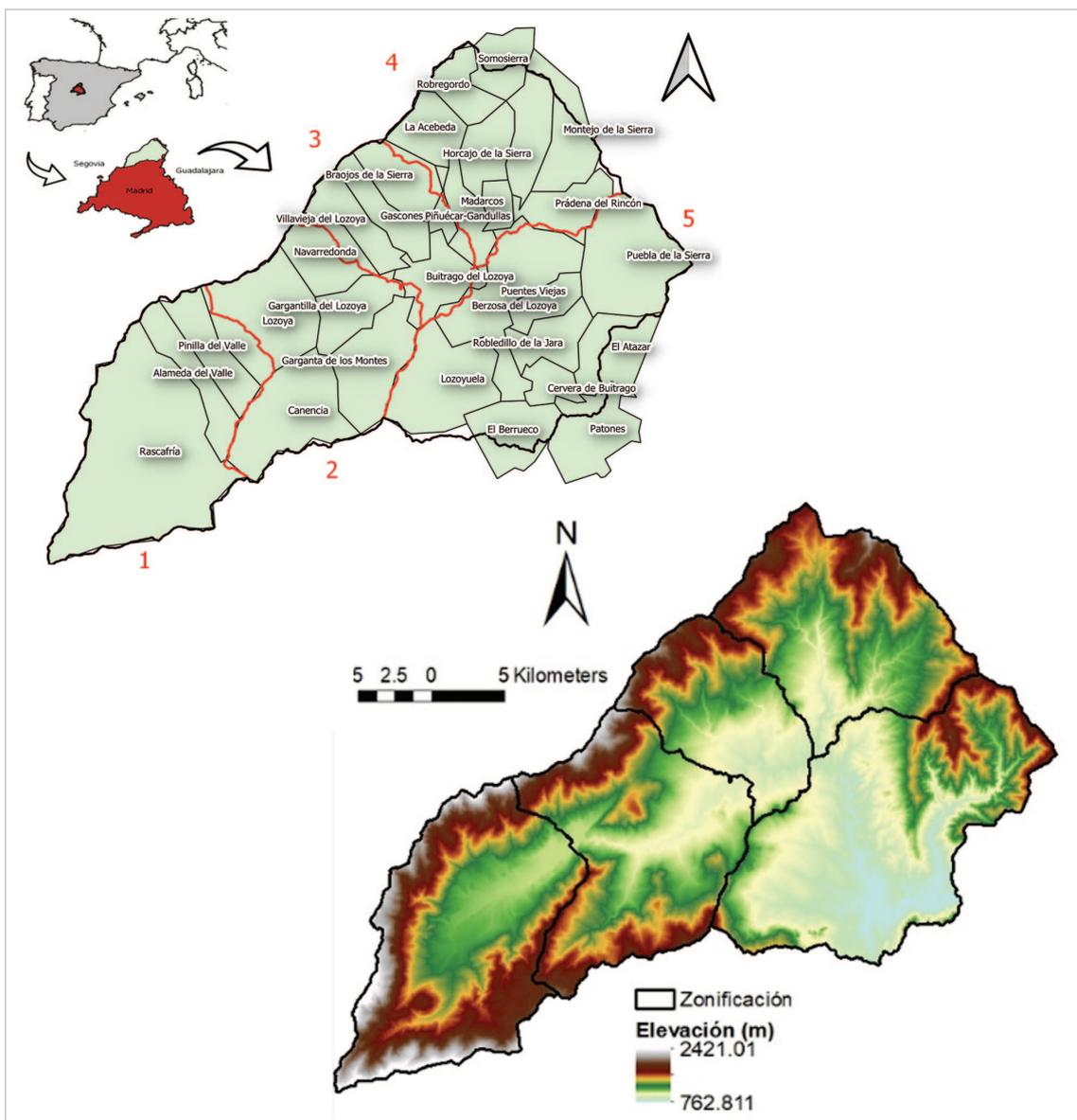


Figura 5. Nivel comarcal-regional de la sierra Norte de Madrid. Municipios de la comarca de la Sierra Norte de Madrid con superficie vertiente al embalse de El Atazar y zonificación del área de estudio en función de cinco subcuencas.

(Fte. Elaboración propia)

Tabla 2. Zonificación del área de estudio en base a unidades hidrológicas. Fuente elaboración propia a partir del Modelo Digital del Terreno (25 m²) proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional.

Código subcuenca	Denominación Zona o Subcuenca	Municipio principal	Superficie total (km ²)	Supf. <1500m (km ²)	Supf. >1500m (km ²)
1	Valle alto del Lozoya	Rascafría	212,93	102,14	110,79
2	Valle medio del Lozoya Los Valles	Lozoya y Canencia	186,82	141,29	45,53
3	SW de Somosierra-Buitrago del Lozoya	Buitrago del Lozoya	102,66	79,98	22,68
4	Somosierra y Sierra del Rincón	Robregordo y Montejo de la Sierra	167,53	125,72	125,72
5	Sierras madrileñas del macizo de Ayllón y depresión de Buitrago	Puentes Viejas y Puebla de la Sierra	254,93	239,22	15,71

4. Resultados

4.1. Aptitud a nivel comarcal-regional

Para cada zona y cada uno de los cinco subsistemas ASHPE, se ha obtenido el valor promedio de los indicadores de la *Tabla 1* (*Tabla 3* y *Figura 6*). Destaca, la ausencia casi total de acuíferos de relevancia en la comarca, con la excepción del existente en el entorno del embalse de Pinilla. Este aspecto sesga la producción de agua hacia su componente superficial y por tanto determina los procesos hidrológicos hacia los que debe apuntar la silvicultura. Además, destaca la naturaleza franco-arenosa dominante de los suelos y la climatología húmeda, todo ello apuntando a buen diagnóstico para la vocación agua-producción dentro de CAFE frente a otras como podría ser el fuego o la eco-resiliencia climática. La *Tabla 3* y la *Figura 6* muestran la puntuación de las cinco zonas en lo relativo a la producción de agua. El diagnóstico realizado muestra una aptitud similar en las subcuencas 2, 3 y 4, (media de

Tabla 3. Resumen de la evaluación y puntuación obtenida por subcuenca (Subc. 1 a Subc. 5) para el objetivo ecohidrológico de producción de agua en cantidad (AGUA-Producción).

Subsistema ASHPE	Subc. 1	Subc. 2	Subc. 3	Subc. 4	Subc. 5
Atmósfera (A)	0,76	0,66	0,59	0,68	0,46
Socio-Económico (E)	0,55	0,69	0,69	0,66	0,65
Hidrológico (H)	0,64	0,59	0,63	0,61	0,36
Planta-ecosistema (P)	0,49	0,61	0,70	0,64	0,59
Suelo-Gea (S)	0,67	0,76	0,78	0,77	0,73
TOTAL	0,63	0,66	0,68	0,67	0,56

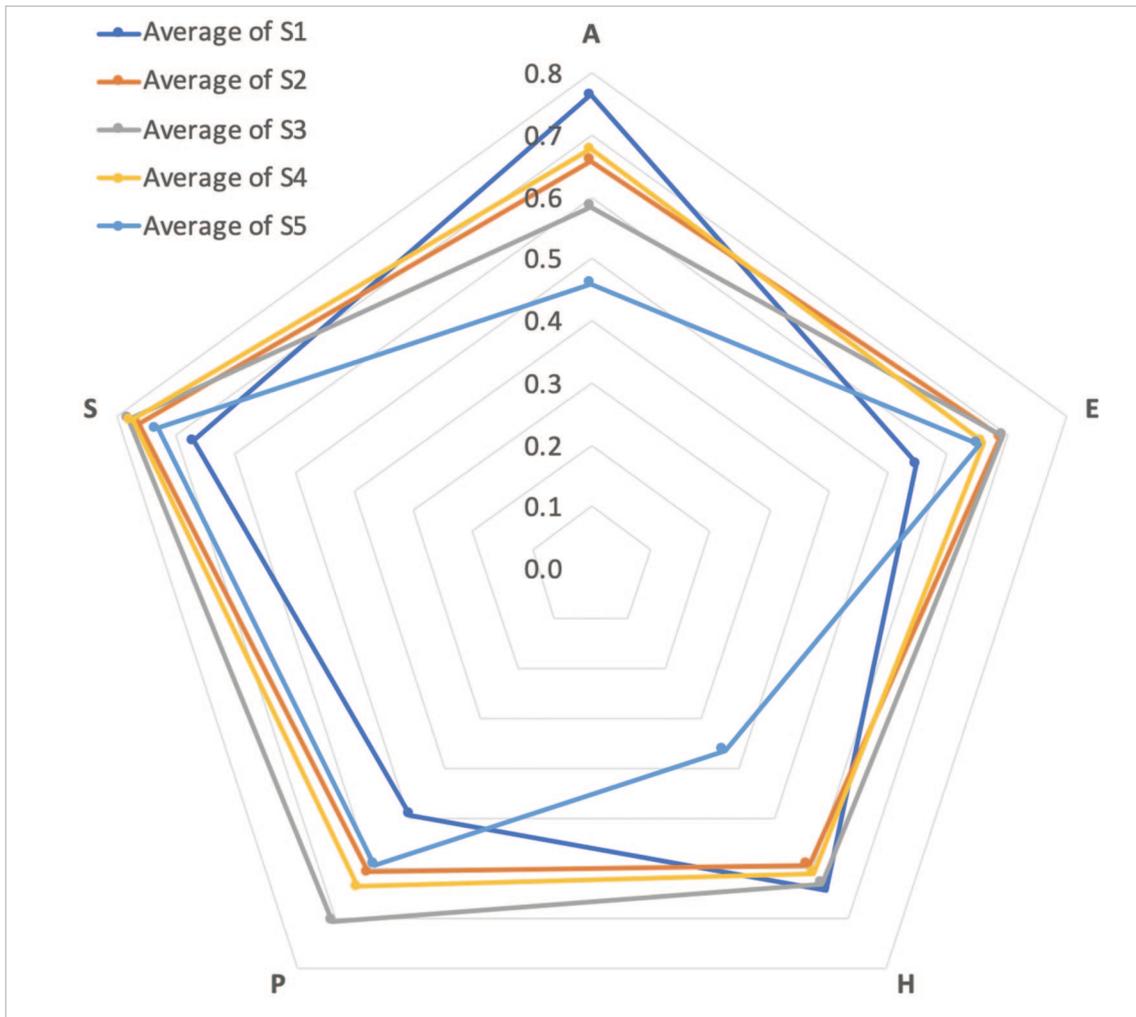


Figura 6. Resumen evaluación objetivos ecohidrológicos por subsistema ASHPE y subcuenca (S1 a S5): AGUA-Producción

0.66 a 0.68 sobre 1), mientras que las subcuencas 1 y 5 han puntuado con menor aptitud en lo referente a producción de agua, con 0,63 y 0,56 respectivamente.

Es decir, las zonas 1 y 5 presentan una menor vocación para la producción de agua mediante la silvicultura. En el caso del valle alto del Lozoya, las características climatológicas son las mejores de toda la Sierra Norte, pero la madurez de los ecosistemas presentes, con predominio de fustales altos y el alto nivel de protección, valor paisajístico y de biodiversidad le hacen puntuar más bajo en los subsistemas ecosistema y socioeconomía. En la zona 5, próxima al embalse de El Atazar, la menor altitud promueve una climatología más desfavorable (mayor evaporación) y las grandes reservas de agua del embalse hacen irrelevante el aporte que podría derivarse de las actuaciones selvícolas, dado que la ausencia de acuíferos hace que éste sea el destino final del agua producida. Por otro lado, destaca la buena aptitud de las masas forestales presentes en la zona 3, con latizales densos cubriendo las laderas de Braojos muy necesitados de tratamientos de mejora.

Este análisis detallado de los distintos subsistemas permite concretar los objetivos para la producción de agua. Primero, que el agua producida debe destinarse hacia el sistema superficial y en concreto a los embalses de la cuenca, dado que los sistemas subterráneos no tienen entidad suficiente. Segundo, que la silvicultura deberá generar un recurso hídrico adicional que debe circular desde las laderas hasta los fondos de valle y canalizarse en cursos fluviales para finalmente llegar a distintos embalses que se secuencian a lo largo del Río Lozoya hasta el de cierre de El Atazar. Ya estamos en condiciones de identificar los procesos ecohidrológicos a focalizar:

- Precipitación neta (Pn), que está compuesta de trascolación más escorrentía fustal (resulta de restar la interceptación a la lluvia incidente).
- Infiltración (y saturación del suelo).
- Flujos de ladera, que pueden ser en superficie, dentro del suelo o concentrado en regueros.
- Circulación de caudales en cauce.

Hilando, se puede establecer el objetivo de que la silvicultura ecohidrológica habrá de aumentar la llegada de agua al suelo (aumento de Pn), disminuir sus pérdidas a lo largo del gradiente ladera-regueros-cauces-embalses y asegurar la capacidad hidráulica del sistema en sus distintos componentes.

4.2. *Aptitud de los ecosistemas forestales (escala monte)*

Establecidos los objetivos ecohidrológicos concretos del punto anterior, en este nivel analizamos qué variables concretas modulan los procesos identificados y qué variabilidad en tales variables existe en el territorio forestal, lo que dará el margen de acción de la silvicultura.

En lo relativo a la precipitación neta, es preciso disminuir la interceptación, la cual está afectada por las características de la lluvia (hidrológicas, como precipitación incidente y meteorológicas) y la estructura del arbolado (cobertura del vuelo, caracterizada por variables como el LAI o FCC). En el caso de la evapotranspiración se trata de minimizar las pérdidas (transpiración y evaporación desde el suelo), lo que está afectado por la meteorología (temperatura y radiación), el área foliar (FCC), el tipo de cubierta forestal (*Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* en el caso estudiado) y la rugosidad del dosel (la turbulencia aumenta significativamente la evaporación desde el suelo y matorral).

Otro aspecto identificado son los procesos de ladera. Se trata de garantizar la capacidad hidráulica del sistema y la circulación del flujo hipodérmico, controlado tanto por variables estáticas (ej. morfología) como dinámicas (ej. conductividad hidráulica suelo, Ks) que determinan su predisposición a los procesos de escorrentía. Esta predisposición se modula a través de controles dinámicos (lluvia de entrada y

dinámica de la vegetación). Las laderas con baja pendiente y suelos profundos, por ejemplo, son menos propensas a los flujos subsuperficiales rápidos. Sin embargo, para configuraciones de ladera menos obvias, existen otros controles subyacentes de la respuesta no lineal lluvia-escorrentía que se explican mediante su conectividad (Bachmair y Weiler, 2011). La conectividad hidráulica de ladera depende de:

- **Suelo:** la infiltrabilidad está relacionada con la textura, el contenido en materia orgánica, la rugosidad (pedregosidad, restos vegetales, etc.), K_s , la presencia de canales preferentes y la pendiente. Un mayor espesor del suelo conduce a un mayor volumen total de almacenamiento, lo que amortigua los picos de precipitación entrantes. Un efecto similar emana una alta porosidad drenable, que en combinación con altos déficits de humedad causa un largo tiempo de retraso hasta que se desencadena el flujo subsuperficial y origina grandes cocientes lluvia/caudal. Cuanto más húmedo esté el suelo, más rápida e intensa será la respuesta hidrológica del sistema. La humedad antecedente influye en la iniciación del flujo subsuperficial sobre todo cuando éste se inicia a partir de zonas del suelo que van entrando en saturación, pero tiene baja influencia si se da por vías preferenciales. Las redes de canales preferentes gobiernan en gran medida la respuesta del flujo subsuperficial y se deben a interacciones complejas entre procesos mecánicos (animales excavadores, raíces, erosión del subsuelo), el suelo, la topografía, el clima y el área contribuyente. Así precipitaciones elevadas, suelos poco profundos (<1 m) y vegetación exuberante, pueden favorecer estas conexiones. Una vez que se forman las redes, es precisa una erosión del subsuelo para su mantenimiento. Las superficies con mayor área contribuyente y pendientes mayores tienen redes más evolucionadas, ya que tienen gradientes más altos de energía para erosión subterránea.
- **Topografía:** Las laderas tienen formas tridimensionales complejas, caracterizadas por la curvatura de su perfil (a lo largo de la línea de flujo: convexa, plana, cóncava) y la curvatura en planta (divergente, paralela, convergente). Estos atributos controlan significativamente el comportamiento del flujo y la saturación a lo largo de las laderas, influyendo en la configuración del hidrograma, de forma que éste presenta subidas más rápidas en laderas divergentes en comparación con laderas paralelas y convergentes. Así un flujo subsuperficial homogéneo en laderas convergentes drena mucho más lentamente que en las laderas divergentes.
- **Material geológico:** el flujo de agua a lo largo de la interfaz suelo-lecho rocoso está guiado principalmente por características topográficas y de fisuración (permeabilidad) de la roca.

De este análisis se han establecido dos grandes criterios para el AHP, el balance hídrico y los procesos de ladera. Dentro de cada uno se han escogido variables (criterios y subcriterios en terminología AHP) que representen lo máximo posible a

los procesos implicados arriba descritos. En el caso del balance hídrico, se han tomado la precipitación incidente, la cobertura arbórea, la evapotranspiración potencial y la especie. En el caso de los procesos de ladera, se han seleccionado como variables representativas la densidad aparente del suelo (como proxy de la porosidad drenable), la conductividad hidráulica del suelo, la humedad del suelo (como proxy de la humedad antecedente, obtenida de BEC, <http://bec.icm.csic.es>, con 1 km de resolución a partir del sensor SMOS-ESA, la temperatura de superficie de ECMWF, y el NDVI de Terra-MODIS; los datos se han procesado con R), la profundidad de enraizamiento (como proxy del espesor de suelo), la densidad del arbolado (como proxy del desarrollo de un entramado subsuperficial de raíces que conecta parches de suelo saturado), el área contribuyente de la microcuenca (acotada entre 62.5 y 625 ha se extensión), la pendiente y el coeficiente de compacidad de Gravelius de las cuencas elementales obtenidas (como proxy de la convergencia de la cuenca). Estas variables son enfrentadas por pares con respecto al objetivo de aumentar la precipitación neta, disminuir las pérdidas por evaporación a lo largo del gradiente ladera-cauce y asegurar la capacidad hidráulica del sistema (flujo subsuperficial). –

Los pesos obtenidos para cada variable figuran en la *Tabla 4* y el mapa final de idoneidad (potencialidad) en la *Figura 7*. La *Tabla 5* resume las superficies por clase de potencialidad destacando las más de 2200 ha con potencialidad muy alta (5) en pinar en la zona 3, lo que daría un impacto potencial de más 2 hm³ anuales, o un aumento del orden del 6% de la reserva hídrica de la subcuenca (entrada a la presa de Puentes Viejas). Estas cantidades aproximadas se duplicarían para esa zona 3 si se tratan masas de silvestre y melojo y en potencialidades 4 y 5. Este indicador grosero (1 hm³/1000 ha) es muy conservador, pues supone un aumento neto de 100 mm anuales con la silvicultura ecohidrológica (Hibbert *et al.*, 1982; Del Campo *et al.*, 2014; García-Prats *et al.*, 2016).

Tabla 4. Resumen de la evaluación y puntuación obtenida por subcuenca (Subc. 1 a Subc. 5) para el objetivo ecohidrológico de producción de agua en cantidad (AGUA-Producción).

Crterios y Subcriterios	Wi
Lluvia incidente	0,196
Cobertura dosel	0,181
ETP(Radiación//T ^a)	0,066
Especie	0,064
Porosidad drenable	0,050
Convdad. hidráulica	0,084
Humedad antecedente	0,085
Espesor suelo	0,068
Densidad veget.	0,058
Área contribuyente	0,052
Pendiente microcuenca	0,063
Geometría ladera	0,033

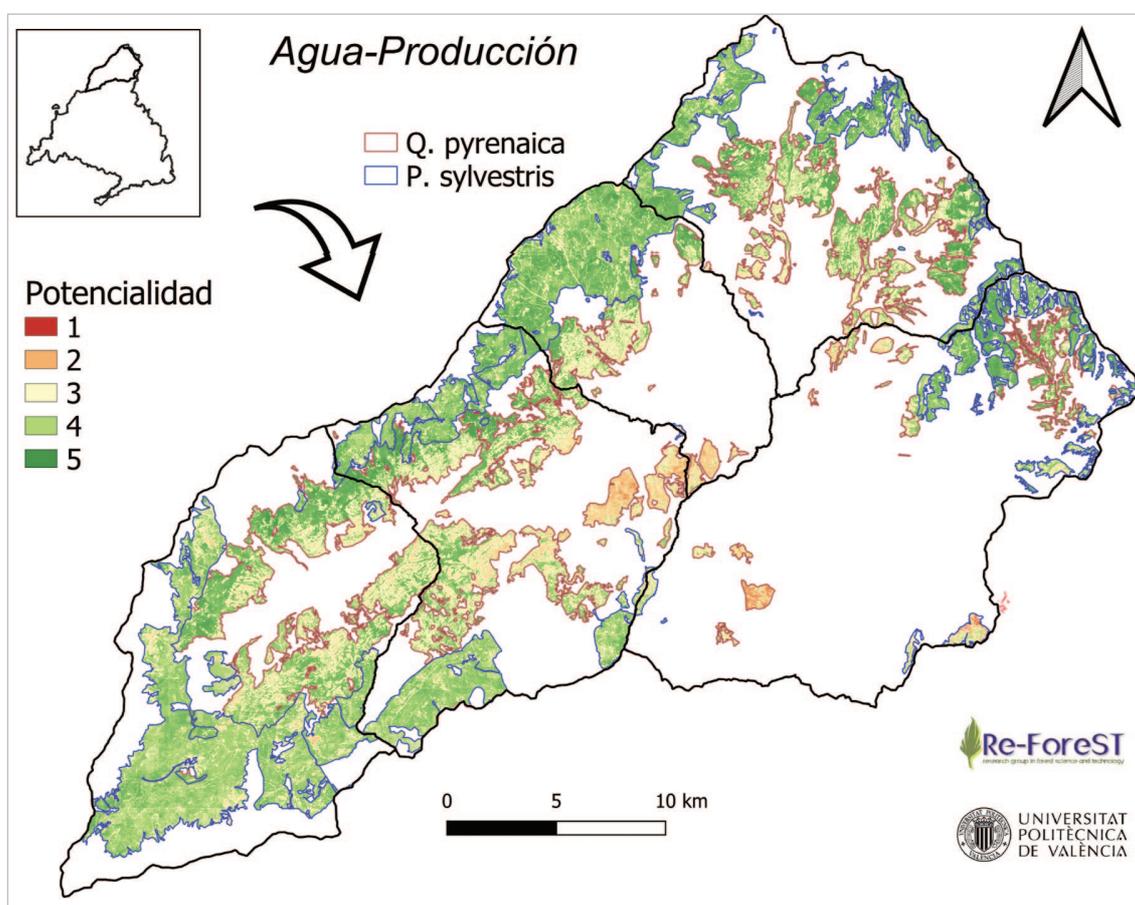


Figura 7. Mapa de potencialidad de selvicultura ecohidrológica (AGUA-Producción) para las masas forestales de pino silvestre y roble melojo de la cuenca vertiente al embalse de El Atazar en la Sierra Norte de Madrid (Fte: elaboración propia). La potencialidad se expresa en una escala de 1 a 5, siendo 5 la máxima potencialidad y 1 la potencialidad nula que se ha dado a la matriz donde no aparecen las dos especies seleccionadas (por lo que no aparece reflejada en el mapa).

Tabla 5. Porcentaje (%) del área de cada unidad según clase de potencialidad (creciente de 2 a 5) de selvicultura ecohidrológica (AGUA-Producción) para las masas forestales de pino silvestre y roble melojo de la Sierra Norte de Madrid. Entre paréntesis, el % correspondiente a pino silvestre; la diferencia es el roble melojo.

Código Zona/ Subcuenca	Supf. Potencialidad-2	Supf. Potencialidad-3	Supf. Potencialidad-4	Supf. Potencialidad-5
1	0,0	4,9	21(12)	27(17)
2	0,1	8,3	18(6)	21(12)
3	0,0	4,3	13(6)	26(22)
4	0,0	2,3	14(4)	22(11)
5	0,2	1,7	4(2)	6(5)

5. Discusión

Los cambios de las relaciones bosque-agua con la gestión forestal dependen en gran medida del tipo de bosque, suelo/fisiografía, régimen dominante de precipitación, meteorología durante la lluvia y por supuesto de la intensidad de la gestión. Esta multitud de factores implicados supone que tras una intervención selvícola, la partición de la lluvia resultante sea muy diferente (Llorens *et al.*, 1997; Mateos y Schnabel, 2001; Muzylo *et al.*, 2009; Del Campo *et al.*, 2019b) y que el aumento de la precipitación neta podría contrarrestarse con una mayor evaporación desde el suelo y/o menor precipitación bajo condiciones semiáridas (Sadeghi *et al.*, 2015). Estos hechos son comunes en bosques semiáridos (González-Sanchis *et al.*, 2019) y abogan por la necesidad de un diagnóstico ecohidrológico previo del territorio, de modo que pueda argumentarse sobre la efectividad del componente Agua-producción en la selvicultura ecohidrológica. El subsistema hidrológico es también determinante, pues la capacidad de almacenamiento y dinámicas de los tanques subsuelo, cauces y embalses determina la mayor o menor necesidad de un suministro de agua azul proveniente de la selvicultura. Igualmente, el subsistema socioeconómico es también clave ya que debe existir una demanda ambiental, agrícola, urbana o industrial de agua para dar sentido a esta orientación Agua-producción. En este sentido, el doble enfoque realizado en este trabajo ha permitido clasificar primero la vocación de cada una de las cinco subcuencas y subsiguientemente estudiar la potencialidad de las masas forestales sin que ninguna escala excluya a la otra.

El primer nivel ha permitido identificar qué procesos ecohidrológicos clave que deben valorarse en la zona de estudio que nos ocupa. En el caso estudiado, se da un clima sub-húmedo y frío, y una estación húmeda marcada donde se concatenan temporales durante varios días seguidos, lo que hace que el suelo mantenga un régimen údico y por tanto que la lluvia incidente (incluso siendo de poca magnitud, duración e intensidad) pueda generar flujos sub-superficiales. Así, del diagnóstico se desprende la necesidad y posibilidad de aumentar la entrada de agua al suelo, el cual, dada su naturaleza y propiedades hidráulicas, es capaz de asimilar las intensidades de lluvia propias de la zona y además redistribuir el agua infiltrada. La gestión forestal puede por tanto aumentar la humedad del suelo y el flujo de agua subsuperficial, pero esto depende de la heterogeneidad subsuperficial y dinámica de flujo espacio-temporal (conectividad y patrones de flujo preferencial en laderas), que a su vez depende de las características de la lluvia, el estado de humedad del suelo antecedente, la hidrofobicidad, el tipo de suelo, su espesor y la topografía (Lin y Zhou, 2007). Estos procesos hidrológicos subterráneos (subsistema suelo) interactúan con la estructura forestal, por su papel determinante en la dinámica de la ladera y la hidrología del suelo (Coenders-Gerrits *et al.*, 2012; Devitt and Smith, 2002). El estudio de estas interacciones solo es asumible desde la óptica de la modelación ecohidrológica (Komatsu y Kume, 2020).

6. Conclusiones

El doble análisis presentado permite identificar, por un lado, la vocación ecohidrológica general de la zona, permitiendo establecer objetivos concretos para la selvicultura ecohidrológica (CAFE). Por otro lado, se ha definido la potencialidad del bosque para esos objetivos concretos fijados en el primer nivel (producción de agua en este caso). Ambos análisis son independientes en su desarrollo y por tanto los resultados deben converger a modo de validación, tal y como se ha observado en este trabajo, donde se destaca la buena o muy buena valoración general del territorio para una selvicultura de producción de agua. El tercer nivel no presentado en este trabajo (modelación ecohidrológica) es el que finalmente logra las cuantificaciones y el diseño pormenorizado de los tratamientos. Este aspecto está en fase de desarrollo para varias masas tipo seleccionadas en visitas de campo realizadas en la zona. Igualmente, está prevista la instalación de parcelas experimentales que proporcionen datos reales para monitorización y validación de los modelos.

Este trabajo proporciona unas recomendaciones técnicas y valoraciones generales para desarrollar una selvicultura ecohidrológica en los montes y cuencas de cabecera vertientes al embalse de El Atazar. Además, sirve para ilustrar la posibilidad de una gestión multifuncional de los bosques que valore objetivamente sus servicios de provisión y otras funciones y que dé respuestas y cifras a los planteamientos globales que piden un mayor protagonismo del bosque y de su gestión sostenible frente a los desafíos ambientales del Planeta.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Agricultura (D.G. de Biodiversidad y Recursos Naturales, servicio de Planificación de Espacios Protegidos) de la Comunidad de Madrid y a Consultores en Biología de la Conservación S.L. (José Luíz González y Raquel Sánchez) a través del encargo del estudio “Elaboración de un plan de viabilidad para la ordenación ecohidrológica de montes y cuencas de cabecera de la Sierra Norte de Madrid” a la Universitat Politècnica de Valencia. Además, los proyectos de investigación: Cehyfo-Med (CGL2017-86839-C3-2-R) financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa, SilvAdapt.net (RED2018-102719-T) financiada por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y RESILIENT-FORRESTS (LIFE17 CCA/ES/000063) han contribuido al desarrollo de este trabajo.

7. Bibliografía

- Agee, J.K.; Skinner, C.N.; 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *For. Ecol. Manag.* 211, 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.034>
- Allen, C.D.; Macalady, A.K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D.D.; Hogg, E.H. (Ted); González, P.; Fensham, R.;

- Zhang, Z.; Castro, J.; Demidova, N.; Lim, J.-H.; Allard, G.; Running, S.W.; Semerci, A.; Cobb, N.; 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag.* 259, 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Bachmair, S.; Weiler, M.; 2011. New Dimensions of Hillslope Hydrology, in: Levia, D.F.; Carlyle-Moses, D.; Tanaka, T. (Eds.); *Forest Hydrology and Biogeochemistry, Ecological Studies*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 455–481. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1363-5_23
- Coenders-Gerrits, A.M.J.; Hopp, L.; Savenije, H.H.G.; Pfister, L.; 2012. The effect of spatial throughfall patterns on soil moisture patterns at the hillslope scale (preprint). *Hillslope hydrology/Modelling approaches*. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-8625-2012>
- Del Campo, A.D.; Fernandes, T.J.G.; Molina, A.J.; 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. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0805-7>
- Del Campo, A.D.; González-Sanchis, M.; García-Prats, A.; Ceacero, C.J.; Lull, C.; 2019a. The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice. *Agric. For. Meteorol.* 264, 266–282. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.016>
- Del Campo, A.D.; González-Sanchis, M.; Lidón, A.; García-Prats, A.; Lull, C.; Bautista, I.; Ruiz-Pérez, G.; Francés, F.; 2017. Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate, in: Krecek, J.; Haigh, M.; Hofer, T.; Kubin, E.; Promper, C.; (Eds.), *Ecosystem Services of Headwater Catchments*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45–57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57946-7_6
- Del Campo, A.D.; González-Sanchis, M.; Molina, A.J.; García-Prats, A.; Ceacero, C.J.; Bautista, I.; 2019b. 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.; Segura-Orenga, G.; Ceacero, C.J.; González-Sanchis, M.; Molina, A.J.; Reyna, S.; Hermoso, J.; 2020. Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection. *For. Ecol. Manag.* 467, 118156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118156>
- Devitt, D.A.; Smith, S.D.; 2002. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *J. Arid Environ.* 50, 99–108. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0853>
- García-Prats, A.; Antonio, D.C.; Tarcísio, F.J.G.; Antonio, M.J.; 2015. Development of a Keetch and Byram—Based drought index sensitive to forest management in Mediterranean conditions. *Agric. For. Meteorol.* 205, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.009>
- García-Prats, A.; Del Campo, A.D.; Pulido-Velázquez, M.; 2016. A hydroeconomic modeling framework for optimal integrated management of forest and water: *Forest & Water Management*. *Water Resour. Res.* 52, 8277–8294. <https://doi.org/10.1002/2015WR018273>
- González-Sanchis, M.A.; Del Campo, A.D.; Molina, A.J.; Fernandes, T.J.G.; 2015. Modeling adaptive forest management of a semi-arid Mediterranean Aleppo pine plantation. *Ecol. Model.* 308, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.002>
- González-Sanchis, M.; Ruiz-Pérez, G.; Del Campo, A.D.; García-Prats, A.; Francés, F.; Lull, C.; 2019. Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and

- fire risk to achieve economic feasibility. *J. Environ. Manage.* 231, 653–665. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.078>
- Grant, G.E.; Tague, C.L.; Allen, C.D.; 2013. Watering the forest for the trees: an emerging priority for managing water in forest landscapes. *Front. Ecol. Environ.* 11, 314–321. <https://doi.org/10.1890/120209>
- Hibbert, A.R.; Davis, E.A.; Knipe, O.D.; 1982. Water Yield Changes Resulting From Treatment of Arizona Chaparral 8.
- Hidy, D.; Barcza, Z.; Marjanovic, H.; Ostrogovic Sever, M.Z.; Dobor, L.; Gelybó, G.; Fodor, N.; Pintér, K.; Churkina, G.; Running, S.; Thornton, P.; Bellocchi, G.; Haszpra, L.; Horváth, F.; Suyker, A.; Nagy, Z.; 2016. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geosci. Model Dev.* 9, 4405–4437. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>
- Kaim, A.; Cord, A.F.; Volk, M.; 2018. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environ. Model. Softw.* 105, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.031>
- Komatsu, H.; Kume, T.; 2020. Modeling of evapotranspiration changes with forest management practices: A genealogical review. *J. Hydrol.* 585, 124835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124835>
- Lin, H.; Zhou, X.; 2007. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 34–49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00988.x>
- Lindner, M.; Fitzgerald, J.B.; Zimmermann, N.E.; Reyer, C.; Delzon, S.; Van Der Maaten, E.; Schelhaas, M.-J.; Lasch, P.; Eggers, J.; Van Der Maaten-Theunissen, M.; Suckow, F.; Psoomas, A.; Poulter, B.; Hanewinkel, M.; 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J. Environ. Manage.* 146, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Llorens, P.; Poch, R.; Latron, J.; Gallart, F.; 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. *J. Hydrol.* 199, 331–345. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03334-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03334-3)
- Marchi, M.; Castellanos-Acuña, D.; Hamann, A.; Wang, T.; Ray, D.; Menzel, A.; 2020. ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. *Sci. Data* 7, 428. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>
- Mateos, B.; Schnabel, S.; 2001. Rainfall interception by Holm Oaks in Mediterranean open woodland. *Cuad. Investig. Geográfica* 27, 27. <https://doi.org/10.18172/cig.1111>
- 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>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.058>
- Panagos, P.; Ballabio, C.; Borrelli, P.; Meusburger, K.; Klik, A.; Rousseva, S.; Tadic, M.P.; Michalides, S.; Hrabalíková, M.; Olsen, P.; Aalto, J.; Lakatos, M.; Rymaszewick, A.; Dunitrescu, A.; Beguería, S.; Alewell, C.; 2015a. Rainfall erosivity in Europe. *Sci. Total Environ.* 511, 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Panagos, P.; Borrelli, P.; Meusburger, K.; 2015b. A New European Slope Length and Steepness

- Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences* 5, 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- PaNagos, P.; Meusburger, K.; Ballabio, C.; Borrelli, P.; Alewell, C.; 2014. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Sci. Total Environ.* 479–480, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>
- Saaty, T.L.; 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* 1, 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sadeghi, S.M.M.; Attarod, P.; Van Stan, J.T.; Pypker, T.G.; Dunkerley, D.; 2015. Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. *Agric. For. Meteorol.* 201, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.006>
- Seidl, R.; Spies, T.A.; Petersson, 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>
- Stednick, J.D.; 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J. Hydrol.* 176, 79–95. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02780-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02780-7)
- Tague, C.L.; Band, L.E.; 2004. RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *Earth Interact.* 8, 1–42. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2004\)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2004)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2)
- Troendle, C.A.; Wilcox, M.S.; Bevenger, G.S.; Porth, L.S.; 2001. The Coon Creek Water Yield Augmentation Project: implementation of timber harvesting technology to increase stream-flow. *For. Ecol. Manag.* 143, 179–187. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00516-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00516-8)
- Vargas Bohorquez, E.; 2021. Inclusión De Servicios Ecohidrológicos En La Gestión Forestal De La Cuenca Piloto Del Proyecto Sincere En Berriatua (Vizcaya). TFG ETSIAMN Universidad Politecnica de Valencia. 49pp.