



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1670

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Gestión forestal y provisión de agua: potencialidad de las medidas y áreas prioritarias para Cataluña

MARTÍN GÓMEZ P. (1), GONZÁLEZ SANCHIS M. (1), MARQUEZ TORRES A. (1), AMEZTEGUI A. (1, 2), PIQUÉ M (1).

(1) Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

(2) Universitat de Lleida (UdL)

Resumen

En los últimos tres años Cataluña se ha visto afectada por una importante reducción de la precipitación, con graves consecuencias en los ecosistemas y en la provisión de agua para la población. Sin embargo, la reducción histórica de caudales en las cuencas de cabecera de Cataluña, que se estima en el 5-10% por década desde los años 50, no puede explicarse únicamente por el clima, sino que está influida por la densificación y expansión de bosques y matorrales tras el éxodo rural. En este sentido, la gestión forestal tiene la potencialidad de incrementar el agua azul en las cuencas y mejorar los caudales, al disminuir la evapotranspiración tras la reducción de la densidad y área foliar. Bajo esta premisa, en este estudio hemos calculado, a partir de modelos ecohidrológicos, la potencial mejora en la provisión de agua en las cuencas de Cataluña bajo diversos escenarios de gestión forestal. Nuestros resultados muestran la elevada aptitud para la provisión de agua a partir de gestión forestal de las masas de coníferas de media montaña actualmente sobredensificadas y la importancia de incluir el criterio ecohidrológico en la planificación forestal y territorial para promover ecosistemas y sociedades más eficientes y resilientes al cambio climático.

Palabras clave

Sequía, silvicultura, hidrología, modelos ecohidrológicos, cuenca Mediterránea. Palabra, palabra, palabra, palabra.

1. Introducción

En 2023 Cataluña hacía frente a una de las sequías más largas y extremas de los últimos siglos derivada, principalmente, de la escasez de precipitación efectiva en los años anteriores y que llevó a niveles mínimos históricos en los ríos, embalses y acuíferos del país. Este déficit hídrico se tradujo en restricciones para el uso del agua en varios sectores, además de daños importantes en bosques (33.000 hectáreas afectadas el 2022, BANQUÉ y VAYREDA, 2023), y cultivos, pérdida de cosechas y empeoramiento de la situación de los ecosistemas acuáticos, que ya venían de sufrir una pérdida de biodiversidad superior al 50% en los últimos veinte años (BROTONS et al., 2020).

Este episodio, aunque de gran gravedad, no ha sido un fenómeno aislado, si no que responde a una tendencia en alza de la recurrencia e intensidad de periodos de sequía en las últimas décadas, y que, sin soluciones efectivas de mitigación, cabría esperar que fuera a más, derivada del incremento de la temperatura ambiental (que incrementa la evapotranspiración de la vegetación) y la reducción



de precipitación invernal y primaveral (que son las que producen las mayores recargas de agua subsuperficial) que predicen la mayoría de escenarios de predicción climática.

En este contexto, resulta de crucial importancia comprender la conexión entre los bosques y paisajes de las zonas de cabecera y la provisión de agua en las zonas de abastecimiento (embalses y acuíferos). En Cataluña, la disminución de los caudales de los ríos en las últimas décadas no puede ser explicada sin tener en cuenta los cambios de paisaje asociados al abandono rural iniciados en 50. Concretamente, en las principales cuencas de cabecera de Cataluña, las aportaciones fluviales en régimen natural (sin tener en cuenta las dinámicas de consumo), han disminuido aproximadamente un 5-10% por década, a lo largo de las últimas 4-6 décadas (AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2023). Relacionado con estas cifras, se estima que hasta un 70% de la superficie forestal arbolada actual no ha sido objeto de actuaciones selvícolas al menos en los últimos 50 años (estadísticas DACC, Observatorio Forestal Catalán - <https://www.observatoriforestal.cat/>) y fruto de esto se calcula que en los últimos 25 años ha aumentado la superficie total de bosques alrededor de un 10% y también la densidad de pies por hectárea alrededor de un 24%; sin embargo, la fijación de CO₂ atmosférico por parte de los ecosistemas forestales ha disminuido un 17% (BANQUÉ et al., 2020).

Estos datos, muestran que en Cataluña, al igual que en muchas otras zonas montañosas de la Cuenca Mediterránea, tenemos en la actualidad mucha más superficie de bosque a las partes altas y medias de las cuencas y bosques mucho más densos que hace unas décadas, en los cuales el crecimiento y fijación de CO₂ se ve estancado y los cuales están detrás de la disminución de las aportaciones fluviales a las cuencas de cabecera.

Estas cifras, convierten a la configuración y estado actual de los bosques situados en zonas de cabecera de cuenca en parte del problema de la provisión de agua y, a la vez, en una parte imprescindible de la solución. En este sentido, se calcula que los bosques de Cataluña, en valor medio, evapotranspiran y, por lo tanto, consumen aproximadamente el 70% del agua que reciben de la precipitación (BANQUÉ et al., 2020). De este modo, no hay duda que la estructura y composición de especies de las zonas de cabecera determinará el porcentaje de la precipitación que finalmente llegará al río, acuífero y/o embalse.

Conceptualmente, se conoce como agua verde a todos los flujos que devuelven a la atmósfera desde la vegetación (transpiración) y el suelo (evaporación) y agua azul a la parte de la precipitación que no es devuelta a la atmósfera como agua verde, esto es la suma de la escorrentía superficial y la percolación profunda. Los bosques muy densos, por una parte consumirán grandes cantidades de agua (agua verde) por su elevada superficie foliar y por otro lado, su follaje retendrá más agua (agua verde) por el efecto de la interceptación de la precipitación, reduciendo así la cantidad de agua que llega al suelo y que queda en el mismo (agua azul) tras el consumo de la vegetación. Por el contrario, bosques con densidades muy bajas podrían presentar una elevada evaporación (agua verde), y por tanto pérdida, de agua desde el suelo, además de representar un riesgo para la erosión y la aportación de sedimentos a los embalses. La gestión forestal aquí tiene un papel relevante en el reequilibrio de las funciones hidrológicas de las cuencas hidrográficas.

EFFECTE DE LA **GESTIÓ FORESTAL** EN LA DISPONIBILITAT DE L'**AIGUA**

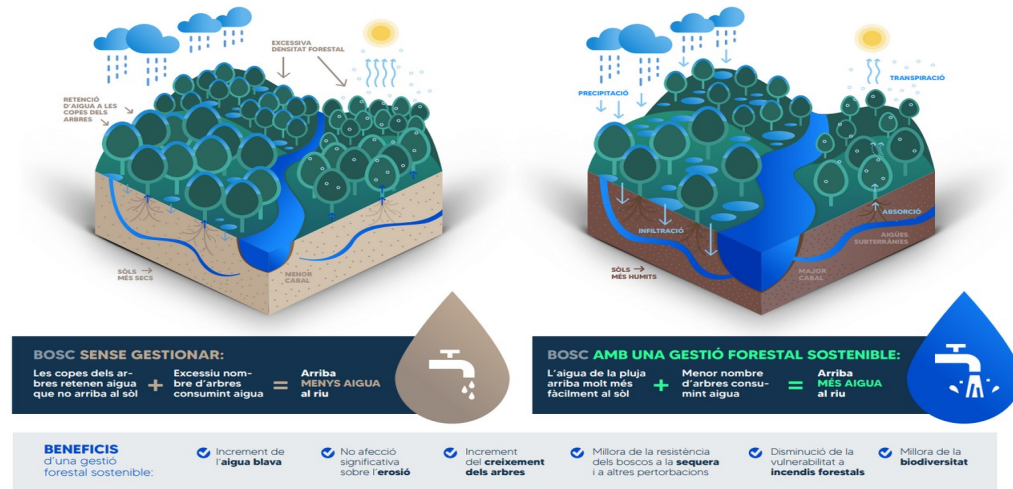


Figura 1. Infografía que explica los efectos de la gestión forestal en el balance hídrico y otros servicios ecosistémicos en bosques y cuencas (CTFC)

2. **Objetivos**

El objetivo principal de este estudio consiste en evaluar la potencialidad a futuro de recuperación de agua azul que tendría la aplicación de gestión forestal en el territorio de Cataluña y los efectos sobre otros servicios ecosistémicos (fijación de carbono, acumulación de biomasa, estrés hídrico en la vegetación y riesgo de incendios) teniendo en cuenta dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) hasta 2100. Concretamente se busca comprender los patrones espacio-temporales de las diferencias entre escenarios climáticos y de gestión, para identificar las áreas y tipologías forestales que potencialmente podrían beneficiarse más de estos efectos considerando también el cambio climático a futuro.

3. **Metodología**

Se ha calculado la disponibilidad hídrica y la provisión de agua azul, así como otros servicios ecosistémicos asociados, en todo el territorio catalán con el modelo ecohidrológico *medfate* (DE CÁCERES, 2015, 2021, 2024) que estima el balance hídrico de una parcela de bosque determinada en función del clima, las características del suelo, y la composición y estructura de la vegetación.

A partir de los datos del 3er Inventario Forestal Nacional (IFN3) en Cataluña, que incluye la composición y estructura del bosque para 9.981 parcelas permanentes, se ha simulado de manera acoplada la dinámica de la vegetación y el balance hídrico y el grado de estrés por sequía hasta el 2100 bajo dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5). Los datos climáticos históricos hasta 2023 han sido extraídos del servicio meteorológico estatal (AEMET) y Cataluña (SMC) y los futuros hasta 2100 del proyecto *EURO-CORDEX* (<https://www.euro-cordex.net/>). En ambos casos los datos han corregidos e interpolados para las parcelas del IFN mediante la herramienta *meteoland* (DE CÁCERES, 2021). La información necesaria



del suelo para el modelo ha sido extraída de la base de datos de *Soilgrids* (<https://soilgrids.org/>) y los datos de rocosidad del IFN.

Para generar el escenario de gestión forestal, se ha parametrizado para cada especie dominante un itinerario silvícola basada en las directrices oficiales de gestión forestal en Cataluña ORGEST (PIQUÉ et al., 2014). El modelo identifica cuándo el bosque supera un umbral de Área Basimétrica o índice de HartBecking establecido para cada especie dominante y ejecuta la gestión que le corresponde en función del itinerario identificado. Esto implica, que en el escenario de gestión propuesto, se gestionarán siempre las masas por necesidad de la masa y no por otros criterios como la demanda o el turno. El escenario de no gestión únicamente considera las dinámicas naturales de mortalidad y reclutamiento de la vegetación, sin ninguna intervención humana.

La provisión de agua azul (BW) se ha calculado como la suma de la escorrentía y la percolación profunda en cada parcela de inventario, y se expresa en mm. La fijación de carbono en el arbolado se representa como la producción primaria neta (NPP en gC/m²) y el estado de la masa a partir del área basimétrica (AB) en m²/ha. Asimismo, se ha calculado el número de días por año con estrés hídrico en el estrato arbóreo (NDD, días) y un índice de potencialidad de incendio de copas (CFP, [0-9]). Una vez obtenidos los resultados a escala anual de las simulaciones, para los dos escenarios climáticos y los de gestión (no gestión - gestión con modelo ORGEST), la información a escala de parcela se ha extendido en el espacio a partir de la construcción de polígonos de influencia o polígonos de Thiessen sobre la última edición del Mapa Forestal de España (1:25.000) y agregado por unidades hidrogeográficas, que son las subcuencas utilizadas por la administración hídrica correspondiente a las cuencas internas de Cataluña (Agència Catalana de l'Aigua, ACA).

4. Resultados

En este artículo presentamos un primer análisis de los resultados de las de las simulaciones de para todo el territorio catalán desde el 2000 al 2100, considerando clima histórico hasta el 2023 y proyecciones hasta el 2100 según los escenarios RCP 4.5, RCP 8.5.

4.1. Evolución anual a escala de Cataluña de los resultados para las variables de estudio.

En la siguiente figura (Figura 2) se presenta para cada una de las variables de estudio la evolución anual desde el 2000 al 2100 con gestión forestal y sin gestión forestal y los dos escenarios climáticos empleados. Se incluye también la significancia de las tendencias con gestión y sin gestión y el ajuste de la recta. Como resultado de este análisis para toda la superficie de Cataluña se observa que la gestión forestal mejora la provisión de agua azul de manera general. Particularmente, para el escenario climático RCP4.5 la gestión forestal ofrece un cambio en la tendencia que pasa a ser significativa, esto significa que en este escenario climático pasaríamos de no ver cambios significativos en el agua azul con el tiempo a tener un incremento significativo en el futuro si se aplican de manera general itinerarios de gestión forestal. Para el escenario RCP8.5, en el cual se observa que el escenario de no gestión mostraría una tendencia significativa a la disminución de la provisión de agua azul con el tiempo, la gestión forestal elimina la tendencia negativa y mantiene un ritmo de provisión de agua azul más



constante.

Por otro lado, en cuanto al estrés hídrico, la gestión forestal ofrece siempre valores menores del número de días de déficit hídrico en la vegetación comparativamente al escenario de no gestión. Para el escenario RCP4.5 la gestión forestal pasaría a reducir significativamente el número de días de estrés hídrico, mientras que para el escenario RCP8.5 pasaría de aumentar el número de días de estrés hídrico a mantenerlo más o menos constante a lo largo de los 100 años.

Si observamos las variables NPP y AB que tienen relación con la fijación de carbono y el crecimiento del arbolado, vemos en ambos casos como la gestión forestal disminuiría sus valores dado al hecho que la extracción de madera de los bosques reduciría la cantidad de biomasa vegetal. En ambos casos, la tendencia del 2000 al 2100 es positiva y significativa para el crecimiento de las masas.

En cuanto al índice de potencialidad de incendio de copas (NDD), la gestión forestal en todos los casos reduciría este índice. Particularmente, para el escenario RCP4.5, la gestión forestal pasaría de mantener valores más o menos constantes a lo largo de todo el periodo a disminuir paulatinamente el valor del índice con el tiempo.

Para el RCP8.5, la gestión forestal disminuye un 19% la tasa de aumento del índice, es decir, aunque continuaría aumentado, lo haría de una manera más suave y con valores más bajos que sin gestión.



Figura 2. Evolución anual del 2000 al 2100 por las variables de interés y escenarios de gestión/no gestión y RCP4.5 y RCP8.5. Se presentan los valores de la pendiente del ajuste de la tendencia y su significancia.

4.2. Distribución espacial de los efectos

En la Figura 3 se presentan los mapas de las diferencias medias para el periodo 2021-2100 entre el escenario de gestión y no gestión para las variables estudiadas y los dos escenarios climáticos propuestos. En los mapas se han representado únicamente las unidades hidrogeográficas (subcuencas) donde las diferencias entre gestión y no gestión son significativas (p -valor <0.05). Como puede observarse, el mayor incremento en agua azul se da para las subcuencas del noreste y centro de Cataluña, coincidiendo en su mayoría con las cuencas internas y las zonas climáticas Mediterráneas litoral, prelitoral y continental. Además, las diferencias su mayores para el escenario RCP4.5 que para el 8.5, constatando el aumento de la demanda evaporativa al escenario 8.5 respecto del 4.5. Las mayores disminuciones en Área Basal y asociado en la fijación de carbono (NPP) se observan para el centro (comarcas del Berguedà, Solsonès, Bages, Segarra y Anoia), y el suroeste de Cataluña (comarcas Priorat, Ribera del Ebro y Terra Alta) que son las zonas dónde en la actualidad se encuentran las grandes masas de coníferas de media montaña sobre-densificadas con mayor necesidad de gestión. Finalmente, la mejora del comportamiento del fuego en caso de incendio de copas y la sequía del arbolado parecen seguir un patrón más generalizado sin tanta discrepancia territorial, aunque parecería que mejoraría en mayor grado en las regiones centrales y del suroeste de Cataluña.

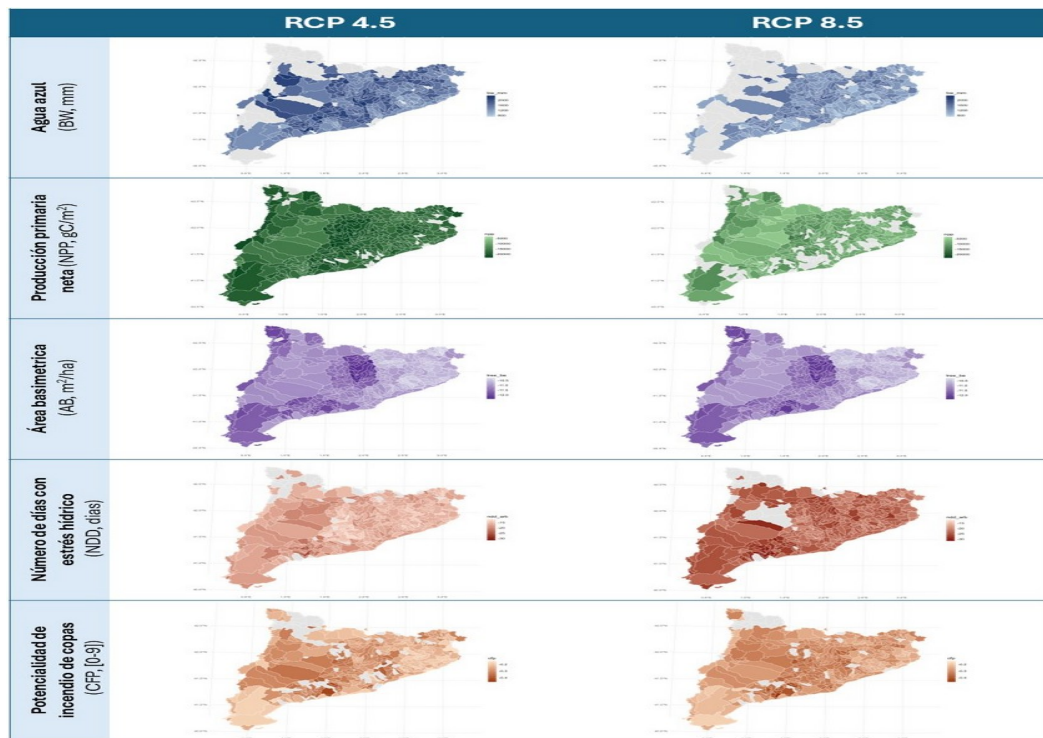


Figura 3. Distribución espacial de las diferencias entre el escenario de gestión y el de no gestión para todo el periodo de estudio. Solo se representan las subcuencas en las cuales las diferencias entre escenarios son significativas (p -valor ≤ 0.05).

4.3. Diferencias entre especies y tipología de vegetación

Finalmente, en la figura 4, una vez determinado que existían diferencias



significativas en la provisión de agua azul entre especies ($p < 0.05$), se ha analizado la relación agua azul/precipitación en porcentaje (BP, %), para cada grupo de especies la diferencia entre el escenario de gestión y el de no gestión a 2050. La relación entre agua azul y precipitación indica el porcentaje de la precipitación que una masa forestal no evapotranspira y por tanto puede "convertir" en agua azul, con lo que podría indicarnos diferencias específicas traducibles a tipologías de vegetación más eficientes en la provisión de agua azul a partir de la gestión forestal. En este caso, aunque se observan diferencias entre especies y podría identificarse algunas especies responden de manera más efectiva que otras a la gestión forestal, existe gran dispersión en los datos y sería necesario realizar un análisis multifactorial más en profundidad incorporando otros factores, ya que seguramente otras variables como el suelo, la topografía o el área de distribución explicarían gran parte de la variabilidad y dispersión de los resultados.

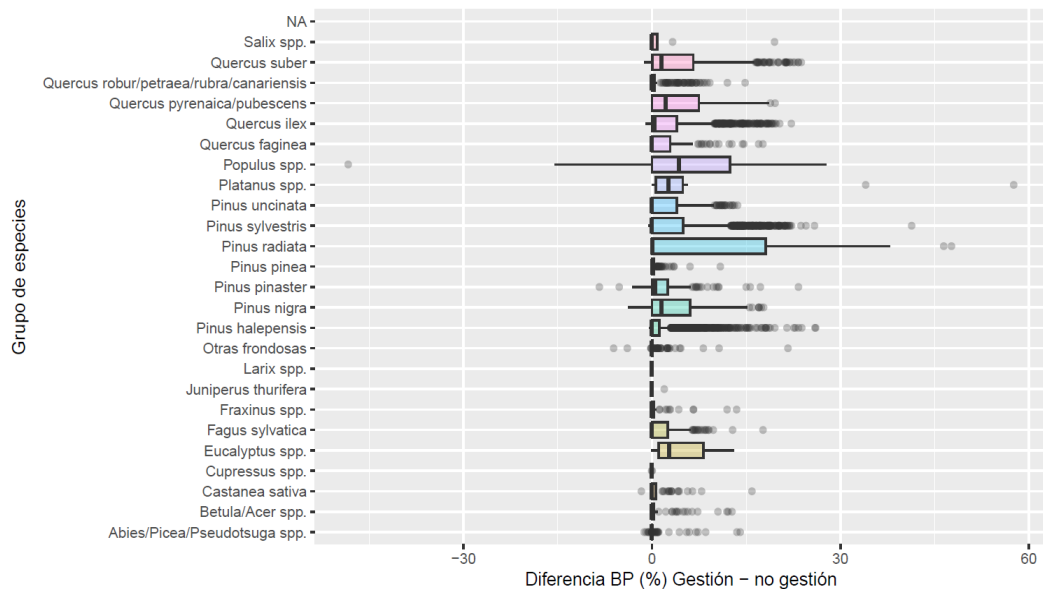


Figura 4. Diferencias en el ratio agua azul - precipitación para los principales grupos de especies en Cataluña

5. Discusión

Estos resultados muestran, tal y como se presenta en varios trabajos realizados en múltiples biomas, realizados a partir de diferentes metodologías (modelización o medidas en cuencas experimentales), el efecto generalmente positivo de la gestión forestal en la disponibilidad de agua en el suelo y generación de agua azul (p.ej. GONZÁLEZ-SANCHIS et al., 2019, MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2020, DEL CAMPO et al., 2014, 2019, 2022, SIMON & AMÉZTEGUI 2023). Esta cuestión resulta clave bajo escenarios de cambio climático, ya que, tal y como se muestra en este trabajo, impulsar políticas forestales de incentivación de la gestión forestal de escenarios a gestión forestal podría revertir los efectos negativos que tendría el cambio climático sobre la provisión y disponibilidad de los recursos hídricos en regiones mediterráneas. Los resultados de este trabajo muestran también como la gestión forestal, incluso bajo el escenario climático más intenso, disminuiría el riesgo de incendios y el déficit hídrico del arbolado. Estos resultados están en la línea de otros trabajos como FERNANDES (2013) para el riesgo de incendio o LUCAS-BORJA



et al.(2021) para el déficit hídrico. Por otro lado, se observa como la fijación de carbono parece disminuir con la gestión forestal, al contrario de lo que se establece en múltiples fuentes en la literatura científica (p.ej. RUÍZ-PEINADO et al. 2017). Cabe mencionar, que en este estudio se ha considerado la Producción Primaria Neta (NPP) como proxy de la fijación de C, y que este indicador no contempla el balance de carbono en el suelo ni tampoco el carbono fijado en la madera extraída, con lo que para hacer un verdadero cómputo global de la fijación de carbono de los efectos de la gestión forestal de los bosques sería necesario incorporar estos depósitos y conocer el destino de la madera extraída (biomasa, madera de sierra o estructural).

Por otro lado, el análisis de los patrones espaciales indica que, aunque la disminución en la potencialidad de riesgo de incendio y en el déficit hídrico se da de manera generalizada para toda la región de Cataluña, no ocurre lo mismo para la provisión de agua, que se ve limitada a las regiones de Cataluña central y la zona litoral y prelitoral. Estas regiones coinciden con zonas en las que la precipitación media se encuentra aproximadamente entre 400 y 800 mm. Estas cifras están en línea con otras publicaciones para el ámbito mediterráneo (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2015) y muestran como la gestión forestal en zonas muy áridas (< 400 mm) no genera excedente de agua que pueda sumarse al agua azul, ya que es la propia vegetación la que la consume, y en zonas muy lluviosas (> 800 mm) el excedente no es significativo ya que por lo general la provisión de agua azul ya es muy elevada. De esta manera, diríamos que, en Cataluña, las zonas que presentan una mayor potencialidad para la provisión de agua coinciden con las zonas de media montaña de la región central y prelitoral, que son las que actualmente están cubiertas por masas de coníferas o quercíneas sobredensificadas que presentan mayor evapotranspiración por situarse en zonas más templadas.

Finalmente, de los análisis de los patrones espaciales y de la respuesta de las diferentes especies para la región de Cataluña, podríamos concluir que, aunque existe una relación general de incremento de la provisión de agua con la reducción de la biomasa vegetal, la respuesta es muy local y responde a múltiples factores locales como las características y estado de la vegetación, el suelo y las condiciones climáticas, microclimáticas y topográficas, lo cual requiere un estudio multifactorial más detallado y poder hacer uso de herramientas de simulación, que nos permitan analizar diferentes situaciones bajo diferentes escenarios de cambio.

6. Conclusiones

La situación actual y las previsiones climáticas para las próximas décadas, nos empujan a invertir esfuerzos de manera urgente para crear soluciones y diseñar mecanismos de resiliencia a los fenómenos de escasez hídrica. No podemos olvidar el papel de los bosques en la regulación del ciclo hidrológico y comprenderlos como parte de la solución al problema de la sequía. En ese sentido, la gestión forestal, además de mejorar la resiliencia a la sequía y al cambio climático en los propios ecosistemas forestales puede ayudarnos a mejorar el estado de las reservas hídricas del suelo, subsuelo y cursos y masas de agua, especialmente en las zonas montañosas de regiones en los que la precipitación media anual están entre 400 y



800 mm. Sin embargo, los efectos no son generalizados, ni la gestión forestal es efectiva de igual manera en todos los bosques, con lo que, si se quiere realizar una priorización o establecer itinerarios de gestión forestal que promuevan la componente ecohidrológica, se necesitará realizar un análisis detallado de cada situación y contexto particular. En este sentido, dada la dificultad de obtener medidas directas en el terreno, el uso de herramientas de modelización en la línea de la que se presenta en este artículo, puede ayudar a explorar diferentes localidades y calcular los efectos bajo diferentes escenarios climáticos y de gestión forestal y ayudar a la toma de decisiones.

7. Agradecimientos

Agradecemos la disposición y ayuda de: Miquel de Cáceres (EMF-CREAF) en los trabajos de modelización, Albert Sanahuja (CTFC) en la optimización de las rutinas de cálculo y Andreu Manzano (ACA) en el diseño metodológico y revisión de los resultados.

8. Bibliografía

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2023, Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya (2022-2027), Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, <https://info.aca.gencat.cat/ca/aca/informacio/geco/plans-programes/PDG/CA/01-00-Pla-de-gestio-2022-27.pdf>

AMEZTEGUI, A., CABON, A., DE CÁCERES, M., COLL, L., 2017. Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: a modelling approach. *Ecol. Model.* 356, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.04.006>.

BANQUÉ, M., DE CÁCERES, M., GARCÍA-VALDÉS, R., MARTÍNEZ-VILALTA, J., ROCES-DÍAZ, J.V., VAYREDA, J., 2020. ForesTIME: Canvis dels Boscos al llarg dels darrers 25 anys (període 1990-2014). https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/02_OFICINA/publicacions/publicacions_de_canvi_climatic/Estudis_i_docs_adaptacio/FORESTIME.PDF

BANQUÉ, M. & VAYREDA, J., 2023. DEBOSCAT, Resultats 2023: Seguiment de l'estat dels boscos de Catalunya. Generalitat de Catalunya. https://www.creaf.cat/sites/default/files/2024-11/Deboscats%20Informe%202023_0.pdf

BROTONS, L.; POU, N.; HERRANDO, S.; BOTA, G.; VILLERO, D.; GARRABOU, J.; ORDÓÑEZ, J. L.; ANTON, M.; GUAL, G.; RECODER, L.; ALCARAZ, J.; PLA, M.; SAINZ DE LA MAZA, P.; PONT, S. i PINO, J. (2020) Estat de la Natura a Catalunya 2020. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya. Barcelona

DE CÁCERES, M., MARTÍNEZ-VILALTA, J., COLL, L., LLORENS, P., CASALS, P., POYATOS, R., PAUSAR, J.G., BROTONS, L., 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. *Agric. For. Meteorol.* 213, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.06.012>

DE CÁCERES, M., MARTIN-STPAUL, N., TURCO, M., CABON, A., GRANDA, V., 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes, *Environmental Modelling & Software*, 108, 186–196, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.003>



DE CÁCERES, M., MENCUCINI, M., MARTIN-STPAUL, N., LIMOUSIN, JM., COLL, L., POYATOS, R., CABON, A., GRANDAM V., FORNER, A., VALLADARES, F., MARTÍNEZ-VILALTA, J., 2021. Unravelling the effect of species mixing on water use and drought stress in holm oak forests: a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 296 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108233>

DE CÁCERES, M., MOLOWNY-HORAS, R., CABON, A., MARTÍNEZ-VILATA, J., MENCUCINI, M., GARCÍA-VALDÉS, R., NADAL-SALA, D., SABATÉ, S., MARTIN-STPAUL, N., MORIN, N., BATLLORI, E., AMÉZTEGUI, A., 2023. MEDFATE 2.9.3: A trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development* 16, 3165–3201 (<https://doi.org/10.5194/gmd-16-3165-2023>)

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? *European. J. For. Res.* 133 (5), 879–894 <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0805-7>

DEL CAMPO, A.D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., MOLINA, A.J., GARCÍA-PRATS, A., CEACERO, C.J., BAUTISTA, I., 2019a. 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 CAPO, A.D., OTSUKI, K., SERENGIL, Y., BLANCO, J.A., YOUSEFPOUR, R., WEI, X., 2022. A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *For. Ecol. Manage.* 519, 120324 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120324>

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY - EEA, 2015. *Water-retention potential of Europe's forests: A European overview to support natural water-retention measures* (EEA Technical Report No. 13/2015). Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-retention-potential-of-forests>

FERNANDES, P. M., 2013. Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning*, 110, 175–182.

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>

LUCAS-BORJA, M.E., ANDIVIA, E., CANDEL-PÉREZ, D. *et al.*, 2021. Long term forest management drives drought resilience in Mediterranean black pine forest. *Trees* 35, 1651–1662. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02143-6>

MORÁN-ORDÓÑEZ, A., AMÉZTEGUI, A., DE CÁCERES, M., DE-MIGUEL, S., LEFÈVRE, F., BROTONS, L., COLL, L., 2020. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosyst. Serv.* 45, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174>

PIQUÉ, M., VERICAT, P., CERVERA, T., BAIGES, T., FARRIOL, R., 2014. Tipologies forestals arbrades. Sèrie: Orientacions de gestió sostenible i multifuncional per als boscos de Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.



SIMON, DC., AMÉZTEGUI, A., 2023. Modelling the influence of thinning intensity and frequency on the future provision of ecosystem services in Mediterranean mountain pine forests. *Eur J Forest Res* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01539-y>