



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica
i del Medi Natural

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural
Universitat Politècnica de València

“INCLUSIÓN DE SERVICIOS ECOHIDROLÓGICOS EN LA GESTIÓN FORESTAL DE LA CUENCA PILOTO DEL PROYECTO SINCERE EN BERRIATUA (VIZCAYA)”

TRABAJO FINAL DE GRADO UNIVERSITARIO EN INGENIERIA FORESTAL Y DEL
MEDIO NATURAL

ALUMNA: Elizabeth Vargas Bohórquez
TUTOR: Antonio Dámaso del Campo
COTUTOR: María González Sanchis

Curso Académico 2020-2021
Valencia, septiembre 2021

INCLUSIÓN DE SERVICIOS ECOHIDROLÓGICOS EN LA GESTIÓN FORESTAL DE LA CUENCA PILOTO DEL PROYECTO SINCERE EN BERRIATUA (VIZCAYA)

RESUMEN

El cambio de los usos del suelo, el éxodo rural y el envejecimiento de las masas forestales, está obligando al sector forestal a reenfoque la silvicultura dedicada a la obtención de bienes (principalmente madera), a una silvicultura multifuncional que genere servicios ecosistémicos (SE) y que sea recompensada por medio de Pagos por Servicios Ambientales (PSA).

El proyecto SINCERE (H2020, Spurring INnovations for forest eCosystem sERvices in Europe) tiene como objetivo el desarrollo de políticas novedosas y modelos nuevos de negocio en el ámbito forestal. Uno de sus casos de estudio se localiza en Berriatúa, País Vasco, España, donde a través de metodologías y protocolos de actuación en una cuenca piloto, se busca implementar la provisión, valorización y monitorización de los SE y así crear un nuevo marco legal para la silvicultura en la legislación foral de Vizcaya.

El presente trabajo se enmarca en dicho proyecto y surgió de la necesidad de cuantificar el papel de la gestión forestal en la ecohidrología, la provisión de agua y la resiliencia de los montes, a través del modelo basado en procesos BIOME-BGC_MuSo, para así proponer una alternativa a la gestión forestal actual en las plantaciones de *Pinus radiata* de Berriatúa que aumente los SE ofrecidos por el agua, y, por ende, los beneficios obtenidos por PSA.

ABSTRACT

Land-use change, rural depopulation, and the aging of the forest masses is forcing the forestry sector to refocus the silviculture dedicated to obtaining goods (mainly wood), towards a multifunctional forestry that generates ecosystem services (ES) and that is rewarded through Payments for Environmental Services (PES).

The SINCERE project (H2020, Spurring INnovations for forest eCosystem services in Europe) aims to develop novel policies and new business models in the forestry field. One of its case studies is located in Berriatua, Basque Country, Spain, where through methodologies and protocols of action in a pilot basin, it seeks to implement the provision, valuation, and monitoring of ES and thus create a new legal framework for forestry in the provincial legislation of Vizcaya.

This paper is part of the SINCERE project and arises from the need to quantify the role of forest management in ecohydrology, water provision, and forest resilience, through the process-based model BIOME-BGC_MuSo, and propose an alternative to the current forest management in the *Pinus radiata* plantations of Berriatua, that increases the ES offered by the water, and, therefore, the benefits obtained by PES.

Palabras clave: silvicultura, ecohidrología forestal, recursos hídricos, servicios ecosistémicos, gestión de agua, plantaciones forestales, modelos basados en procesos
Key words: silviculture, forest ecohydrology, water resources, water management, forest plantations, process-based models

ALUMNA: Elizabeth Vargas Bohórquez
TUTOR: Antonio Dámaso del Campo
COTUTOR: María González Sanchis
Curso Académico 2020-2021
Valencia, septiembre 2021

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de varias personas e instituciones a las que quiero mostrar mi agradecimiento.

En primer lugar, a mis tutores Antonio Dámaso del Campo y María Gonzales Sanchis, quienes desde un primer momento estuvieron dispuestos a colaborarme y a lo largo de estos meses me han demostrado no solo su gran conocimiento de la ecohidrología forestal, sino también su enorme empatía y colaboración a sus estudiantes. Además, me ayudaron a recoger información por parte de los propietarios de las plantaciones del País Vasco para la correcta elaboración de este trabajo.

Agradezco también a mi familia por ser un apoyo durante estos años de carrera y mostrar su interés en mis proyectos, en especial a mi padre, por involucrarse y colaborarme con el diseño del trabajo. Por supuesto, también a mi pareja por su paciencia y motivación, y por hacer más amenos estos cuatro años.

Finalmente, expresar mi más sentido agradecimiento a la Universidad Politécnica de Valencia, fundamentalmente a los profesores y estudiantes, por acogerme dentro de sus aulas, hacerme sentir como en casa y dejarme un sinfín de conocimientos tanto académicos como personales.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS Y ENCUADRE METODOLÓGICO | 3 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 4 |
| 3.1. LOCALIZACIÓN | 4 |
| 3.2. ESTADO SOCIOECONÓMICO | 5 |
| 3.2.1. Demografía | 5 |
| 3.2.2. Economía y situación actual del sector forestal | 5 |
| 3.3. ESTADO FÍSICO | 6 |
| 3.3.1. Relieve | 6 |
| 3.3.2. Geología | 6 |
| 3.3.3. Suelo | 6 |
| 3.3.4. Clima | 7 |
| 3.3.4.1. Precipitaciones | 7 |
| 3.3.4.2. Precipitaciones invernales | 7 |
| 3.3.4.3. Precipitaciones estivales | 7 |
| 3.3.4.4. Temperatura | 7 |
| 3.3.4.5. Evapotranspiración | 7 |
| 3.3.4.6. Días de lluvia y nevadas | 8 |
| 3.3.4.7. Vientos | 8 |
| 3.3.4.8. Luz diaria, insolación e índice UV | 8 |
| 3.3.4.9. Pisos bioclimáticos | 8 |
| 3.3.5. Erosión | 8 |
| 3.4. HIDROGRAFÍA | 9 |
| 3.4.1. Demarcación y red de drenaje | 9 |
| 3.4.2. Recursos hídricos y balances | 9 |
| 3.5. ESTADO FORESTAL | 9 |
| 3.5.1. Usos y distribución de especies por ha. | 9 |
| 3.5.1. Servicios ecosistémicos | 9 |
| 3.5.2. Itinerarios silvícolas habituales para las plantaciones de pino radiata en Vizcaya. | 10 |
| 4. VARIABLES ECOHIDROLÓGICAS Y ECOFISIOLÓGICAS DEL COMPLEJO SUELO/PLANTA/ATMÓSFERA. | 11 |
| 4.1. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO SUELO | 12 |
| 4.2. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO PLANTA | 13 |
| 4.3. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO ATMÓSFERA | 14 |
| 5. PRIMERA CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA PILOTO. | 15 |
| 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO SUELO | 15 |
| 5.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO PLANTA | 16 |
| _____ | 17 |
| 5.3. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO ATMÓSFERA | 17 |
| 6. CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DEL ITINERARIO HABITUAL TRAS LA UTILIZACIÓN DEL MODELO. | 19 |
| 6.1. CALIBRACIÓN | 19 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.2. | VALIDACIÓN | 19 |
| 6.3. | SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA. | 20 |
| 7. | <i>MODIFICACIONES POSIBLES AL ITINERARIO HABITUAL Y SUS IMPLICACIONES EN LA PROVISIÓN DE AGUA Y BIOMASA.</i> | 21 |
| 7.1. | ALTERNATIVAS PROPUESTAS | 21 |
| 7.2. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN FORESTAL. | 22 |
| 8. | VALORACIÓN ECONÓMICA Y PROPUESTA DE MEJORA | 23 |
| 9. | DISCUSIÓN DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES | 24 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA | 26 |
| 11. | ANEXOS | |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Representación de las categorías de los SE establecidas por la FAO.....</i> | <i>1</i> |
| <i>Figura 2. Mapa conceptual de la aplicación de la ecohidrología forestal.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Figura 3. Localización de la cuenca piloto con el visor de geoEuskadi.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Tabla 1. Tipos litológicos de la Comarca de Artibai.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Tabla 2. Aportación anual y específica actual y estimada para el año 2027 y datos de balances (demanda, déficit y garantía) en la Cuenca de Artibai.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Tabla 3. Usos del suelo del Municipio de Berriatúa.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Tabla 4. SE ofrecidos en el Municipio de Berriatúa.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Tabla 5. Resumen con las actuaciones relevantes del itinerario habitual aplicado en la zona de estudio.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 4. Representación de las variables básicas del ciclo hidrológico en una cuenca forestal</i> | <i>11</i> |
| <i>Tabla 6. Variables básicas del ciclo hidrológico.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabla 7. Recopilación de las variables del CSPA mencionadas en los apartados 4.1, 4.2 y 4.3 con sus correspondientes unidades de medición.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 5. Representación gráfica del CSPA recopilando las variables de la Tabla 7.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 4. Gráficas del contenido de agua en el suelo (%) a diferentes profundidades (5 cm, 20cm y 45cm) y el en kPa resgistrados en la parcela de experimentación.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 5. Gráficas donde se representa la cantidad de agua en el tronco (%), el consumo de agua por el árbol (l/día), la P y la transpiración (mm) registrados en la parcela de experimentación.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 8. Graficas donde se registra la P diaria mm), la temperatura diaria (°C), la radiación solar (W/m2), el DPV (kPa), la HR (%) y la velocidad media del viento registrados en la parcela de experimentación.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabla 8. Valores de correlación de Pearson obtenidos tras comparar los datos medidos en la parcela experimental con los datos de la simulación.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Tabla 9. Comparación de valores simulados y obtenidos para el LAI y el Dn que determinan que el modelo es válido.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabla 10. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con el itinerario habitual.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabla 11. Alternativa 1 propuesta con un turno menor al habitual (32 años) y una distribución de intensidad/frecuencia diferente.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 12. Alternativa 2 propuesta con mismo turno que el habitual pero otra distribución de intensidad/frecuencia.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 13. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con la Alternativa 1.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 14. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con la Alternativa 2.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 15. Beneficios para cada uno de los itinerarios.....</i> | <i>24</i> |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

SE: Servicios Ecosistémicos
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
PSA: pagos por servicios ambientales.
UE: unión europea
SINCERE: Spurring Innovations for forest ecosystem services in Europe
PIB: Producto Interior Bruto
PNRF: Plan Nacional de Repoblación Forestal
ET: evapotranspiración
ETR: evapotranspiración real
ETP: evapotranspiración potencial
LIC: lugar de interés comunitario
Ni: densidad inicial
Nf: densidad final
P: precipitación
Es: escorrentía superficial
I: infiltración
Pn: precipitación neta
It: interceptación
CSPA: continuo suelo, planta, atmósfera.
 Ψ : potencial hidráulico
 θ : contenido volumétrico de agua
Vw: volumen de agua en el suelo
Vt: volumen de agua total
FCC: fracción de cabida cubierta
LAI: índice de área foliar
HR: humedad relativa
DPV: déficit de presión de vapor
Dn: diámetro normal
m.s: materia seca
PNE: producción neta del ecosistema
C: carbono

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques han sido un enclave fundamental en el desarrollo de las sociedades humanas, ofreciendo alimento, combustible, material para la construcción y un medio para la caza, la micología y el pastoreo. Con el transcurso de los años su uso ha ido cambiando en función de las necesidades de cada época y lugar, de la percepción de la sociedad y el avance de la ciencia, sometiendo al monte a momentos de sobreexplotación, abandono e incertidumbre.

Todos esos servicios que ha ofrecido el monte a través de los años se incluyen dentro de los servicios ecosistémicos (SE), definidos como “la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad” (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura [FAO], s.f.). La FAO agrupa los SE en cuatro grandes categorías representadas en la Figura 1:

- Abastecimiento: beneficios materiales de los ecosistemas como madera, agua, alimentos, corcho, caucho, resina, etc.
- Regulación: beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos como la purificación de aguas, la descomposición de residuos, la polinización, el control de enfermedades y plagas, entre otros.
- Culturales: beneficios inmateriales como la fuente de inspiración para el enriquecimiento personal, espiritual y cognitivo generando conocimiento científico, relaciones sociales, patrimonio cultural, educación ambiental y ecoturismo.
- Apoyo: engloban los procesos ecológicos que hacen posibles los tres tipos de servicios mencionado anteriormente, como proporcionar hábitat para las especies, el ciclo del agua y de nutrientes, la formación del suelo y la fotosíntesis.

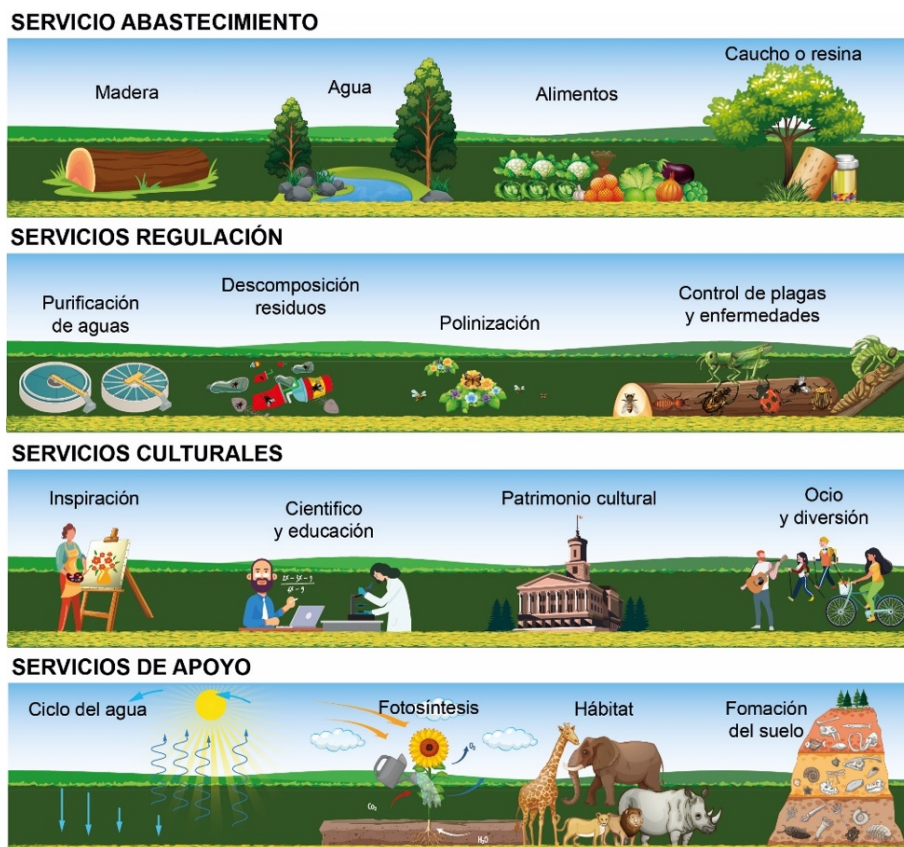


Figura 1. Representación de las categorías de los SE establecidas por la FAO.
Fuente: Elaboración propia

Uno de los elementos que se mencionan una y otra vez cuando se habla de SE es el agua, ya que no solo actúa como un elemento independiente, sino que relacionado con el ecosistema permite (Hamilton, 2009):

- Interceptar la lluvia, infiltrarla y retenerla generando una protección frente a inundaciones y avalanchas, mitigando fenómenos meteorológicos y reduciendo efectos del cambio climático.
- Suministrar agua dulce debido a que el suelo, la hojarasca y el sotobosque actúan como filtrantes.
- Regular el caudal de los ríos y afluentes por la retención antes mencionada.
- Controlar la tasa de escorrentía y por consiguiente evitar la erosión y desestabilización de pendientes gracias a la cubierta de las copas, el sotobosque, la hojarasca y otros desechos forestales.
- Conservar la biodiversidad y la protección de los recursos naturales que favorecerán a su vez el turismo y la recreación.

En este sentido, la ciencia que estudia la integración de la ecología y la hidrología se denomina ecohidrología, y al unirla con la ingeniería forestal aparece el concepto de ecohidrología forestal, es decir, la aplicación de una gestión forestal con base ecohidrológica, que mira más allá de los productos forestales y pone el agua como centro de gestión.

Sin embargo, para que los propietarios consideren realizar una gestión forestal que potencie los SE es necesario establecer una cuantificación del servicio ofertado y un reconocimiento económico. Esa compensación se ve contemplada a través de los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), los cuales buscan que aquellos que se benefician de los SE paguen de una manera directa a los propietarios de la tierra que están realizando prácticas que benefician la producción de estos servicios asegurando la mayor calidad posible. Por esto, varios países del mundo, entre ellos la unión europea (UE), buscan integrar estos pagos a la economía actual, por lo que actualmente existen diversos proyectos encaminados a buscar la mejor manera de establecer esta compensación (Hamilton, 2009).

El primer paso para establecer los PSA es determinar qué SE se ofrecen y en qué cantidad, por lo que, en el caso del agua, cuantificar variables ecohidrológicas y ecofisiológicas es obligatorio, dado que con ellas se podrá realizar una caracterización ecohidrológica que determine qué prácticas forestales beneficiarían la oferta de ese SE. Hoy en día, como se representa en la Figura 2, diversos modelos de simulación permiten a través de datos introducidos de los procesos hidrológicos (inputs) predecir cómo el cambio climático, los usos del suelo y la gestión forestal afectan a las funciones y servicios que ofrecen las masas forestales en las cuencas hidrográficas (Min *et al*, 2019). No obstante, uno de los mayores retos al que se enfrenta la ecohidrología forestal es la cuantificación a escala de cuenca, puesto que la cuenca es un gradiente de componentes del paisaje con efectos acumulativos de los diversos impactos a grandes escalas espaciales y temporales (Sivapalan, 2005).

La Comisión Forestal Europea establece que es necesario generar una mayor sinergia entre la gestión del agua y del bosque mediante mecanismos institucionales que estén dirigidos a implementar programas de acción regionales y locales. Además, es imprescindible aumentar los conocimientos sobre las interacciones entre los bosques y el agua, y fijar conclusiones de dichas investigaciones en las políticas (Comisión Forestal Europea, 2010).

Por ende, la ecohidrología forestal será una ciencia aliada a la hora de crear políticas de PSA que beneficien a los productores de SE y a su vez, aseguren la sostenibilidad de las masas forestales.

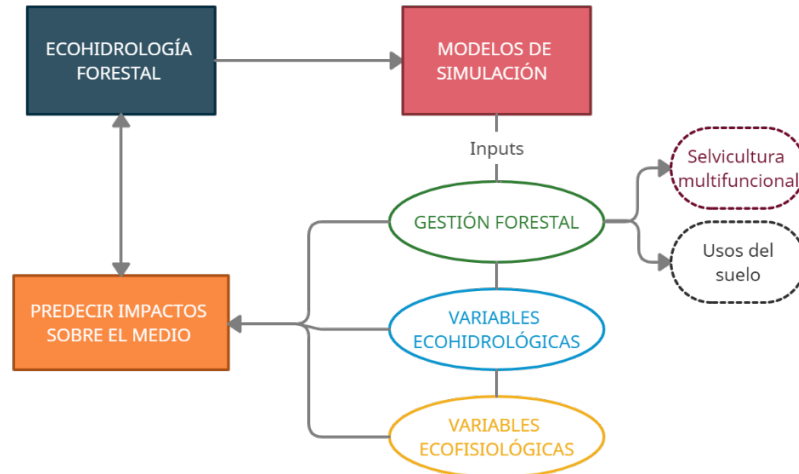


Figura 2. Mapa conceptual de la aplicación de la ecohidrología forestal. La ecohidrología forestal actúa como eje motor permitiendo utilizar modelos de simulación para predecir sus impactos sobre el medio. Estos modelos necesitan diversos inputs donde se incluyen la silvicultura aplicada, los usos del suelo y las variables ecohidrológicas y ecofisiológicas.
Fuente: Elaboración propia.

El envejecimiento de las masas forestales (Herrero, 2015), el constante cambio de los usos del suelo y el abandono de las zonas rurales supone hacer un reenfoque de los objetivos para que los propietarios forestales dirijan sus actuaciones de una manera más multifuncional (Rodríguez, 2006), es decir, pasar de ver a los bosques como productores de madera a verlos como productores de SE compensados con PSA.

Uno de los proyectos que recoge las pautas mencionadas y donde se enmarca este trabajo es el proyecto SINCERE (Spurring Innovations for forest ecosystem services in Europe). Su objetivo es el desarrollo de políticas novedosas y modelos nuevos de negocio en el ámbito forestal. Uno de sus casos de estudio se localiza en Berriatúa, País Vaco, España, donde a través de metodologías y protocolos de actuación en una cuenca piloto, con plantaciones de *Pinus radiata*, se busca implementar la provisión, valorización y monitorización de los SE para crear un nuevo marco legal para la silvicultura en la legislación foral de Vizcaya.

Este trabajo surge como una propuesta a la implementación de la ecohidrología forestal para la provisión de agua y resiliencia de los montes.

2. OBJETIVOS Y ENCUADRE METODOLÓGICO

El objetivo principal es incluir el agua como un SE e identificar qué prácticas de gestión forestal en plantaciones de *Pinus radiata* tienen un impacto positivo en la provisión de cantidad de agua. En concreto:

- a. Realizar una caracterización ecohidrológica del itinerario habitual de las plantaciones de *Pinus radiata* en la cuenca piloto, incidiendo en la cantidad de agua.
- b. Proponer mejoras en la gestión forestal para la provisión de agua mediante la modificación del itinerario habitual y las implicaciones que estas alternativas generarían en la producción de biomasa.

Los pasos o metodología para conseguir los objetivos marcados son los siguientes:

- a. Realizar una caracterización del estado actual de la cuenca piloto identificando las características intrínsecas y extrínsecas de la zona (aspectos biofísicos y de gestión forestal).
- b. Elegir las variables ecohidrológicas y ecofisiológicas que permiten entender la interacción entre el suelo, la planta y la atmósfera y estimarlas.
- c. Realizar una primera aproximación a la caracterización ecohidrológica con los datos obtenidos de las variables anteriores medidos por instrumentos instalados en la cuenca piloto del proyecto SINCERE.
- d. Aplicar el modelo basado en procesos BIOME-BGC_MuSo (BIOME-BGCMuso, 2021), el cual permitirá hacer una caracterización ecohidrológica del itinerario habitual de *Pinus radiata* para cuantificar los SE derivados de la gestión forestal. Para aplicar el modelo, es necesario realizar un proceso de calibración y validación del mismo, considerando cada una de las fases del itinerario habitual en las plantaciones de *Pinus radiata*, obteniendo así una caracterización ecohidrológica definitiva del itinerario y un modelo calibrado y validado.
- e. Establecer diferentes alternativas al itinerario habitual con diferentes combinaciones de frecuencia/ intensidad de las prácticas forestales. Éstas serán introducidas en el modelo de BIOME para analizar e identificar aquellas combinaciones que favorecen la provisión de agua.
- f. Proponer mejoras que consigan el objetivo marcado con su correspondiente valoración económica.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. LOCALIZACIÓN

La cuenca piloto se ubica en España, en la Comunidad Autónoma del País Vasco (Euskadi), en la Provincia de Vizcaya, en el Municipio de Berriatúa. Hace parte de la Demarcación Hidrológica del Cantábrico Oriental y de la Cuenca Hidrológica de Artibai. (Figura 3).

Sus coordenadas de localización son: UTM 30N ETRS89 (X: 545225.814; Y: 4793437.099) [WGS84: -2.44248850,43.29240057].

Para su búsqueda en el SIGPAC se deben introducir los siguientes datos: Provincia:4 8, Municipio: 18, Polígono: 12, Parcela:9, Recinto 1.

En esta zona, el proyecto SINCERE instaló el 19 de enero del 2021 una parcela experimental con un área de 1000m², una orientación de 246°, una pendiente del 66% y una latitud de 252 m.

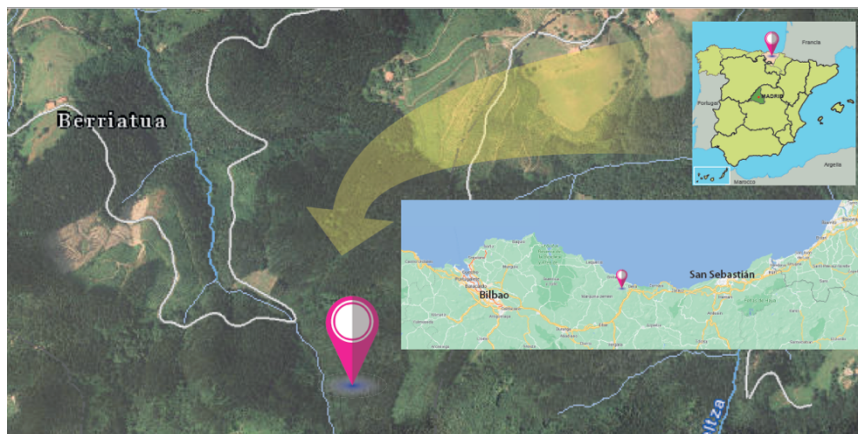


Figura 3. Localización de la cuenca piloto con el visor de geoEuskadi (geoEuskadi, s.f.).
Fuente: Elaboración propia.

3.2. ESTADO SOCIOECONÓMICO

3.2.1. Demografía

El Municipio de Berriatúa en los últimos datos registrados por el Ayuntamiento y publicados en el visor de (geoEuskadi, s.f.) cuenta con una población de 1245 habitantes, de los cuales 686 son hombres y 559 son mujeres. El 16,47% corresponde a niños de 0 a 14 años y el 32,05% a mayores de 65 años, siendo la mitad de la población de 14 a 65 años. Sin embargo, el 72,2% de la población mayor a 16 años trabaja fuera del Municipio y el 96,51% estudia fuera. Teniendo en cuenta la superficie del Municipio, la densidad de la población es de 61,5 hab./km².

3.2.2. Economía y situación actual del sector forestal

La población activa (con empleo) del Municipio es del 47%, donde el 62% corresponde a personas con 55 a 64 años. Las microempresas (0-9 empleados) generaron en el Municipio en el 2020 un 17% de empleo, mientras que los establecimientos industriales generaron un 39%, viéndose este último indicador en alza durante los últimos años (geoEuskadi, s.f.).

En el año 2018 se estimó que la población en el Municipio tenía un Producto Interior Bruto (PIB) de 81.405€/per cápita, siendo uno de los más altos de los alrededores. El sector con más valor añadido bruto es el sector industrial, con un valor de 76% en el 2018. Mientras que, el sector agropesquero (1,2%) y el sector de la construcción (1,2%) no generan un valor añadido representativo (geoEuskadi, s.f.).

No obstante, la base de la economía del Municipio siempre ha estado vinculada a la producción agrícola, al ganado (especialmente vacuno) y forestal. En cuanto al sector forestal, su importancia va muy ligada al Plan Nacional de Repoblación Forestal (PNRF) de 1939, que surgió como una respuesta a la necesidad de frenar el proceso de degradación de la cubierta forestal (Montero, 1997).

En la primera etapa del PNRF el objetivo era paliar el paro rural tras la Guerra Civil. A partir de 1955 aumentó la actividad debido al inicio de la mecanización con tracción animal de los trabajos de reforestación. En su segunda etapa (1960-1971), aparecieron industrias de madera y fábricas productoras de celulosa que necesitaban mayor cantidad de productos forestales, por lo que dichas empresas empezaron a implicarse en los programas de reforestación. En la tercera etapa (1972-1982), aparece el Programa de Plantaciones de Alto Rendimiento subvencionado por la Ley para el Fomento de la Producción Forestal aprobada en 1977 (Montero, 1997). Una de las especies elegidas por cumplir con la característica de crecimiento rápido, adaptarse a las condiciones climáticas de algunas zonas de España y tener una madera versátil fue el *Pinus radiata*, y uno de los sitios elegidos para llevar a cabo dichas plantaciones de monocultivo fue el País Vasco, ya que no solo contaba con buenas condiciones climatológicas, sino que además tenía buenas condiciones industriales (Groome, 1987). En 1982 desaparece el PNRF y las competencias pasan a manos de las Comunidades Autónomas (Montero, 1997), disminuyendo notablemente las repoblaciones y aumentando el abandono de las masas.

Hoy en día, el envejecimiento de estas masas arboladas unido al tan marcado abandono de las áreas rurales en España está generando masas forestales propicias a plagas, enfermedades y acumulación de combustible, llegando a tener que hacer talas masivas a las actuales plantaciones de *Pinus radiata* y sustituirlas por nuevas especies como el eucalipto (Herrero, 2015).

A esto se le suma el constante cambio de usos de los sistemas forestales. Concretamente en Vizcaya, el uso de sus recursos ha pasado de leñas y carbón en el siglo XV, a la ganadería, la minería y la agricultura de subsistencia en la primera mitad del siglo XX, la expansión de los productos forestales en la segunda mitad de este mismo siglo y hoy en día a la demanda de las actividades de ocio, deporte, senderismo, recogida de frutos y plantas silvestres (Rodríguez, 2006).

Pese a esto, el sector forestal aporta hoy en día el 1,5% del PIB del País Vasco con 18.000 trabajadores en el sector (Noticias de Gipuzkoa, 2021) lo que destaca su importancia y la necesidad su desarrollo.

3.3. ESTADO FÍSICO

3.3.1. Relieve

El punto más alto del Municipio de Berriatúa es la cima de Arrikurutz, una montaña de 413 m localizada en el macizo de Akarregi (Mendikat, 2020). En general el País Vasco es una comunidad montañosa, aunque un gran porcentaje de las zonas altas no rebasa los 1000m (Edeso, 2020). Concretamente la parcela de estudio se encuentra a 251,9 m (geoEuskadi, s.f.). En cuanto a la pendiente, la Comarca de Artibai tiene una pendiente media de 19,8% (Agencia Vasca del Agua, 2003).

3.3.2. Geología

El territorio se encuentra sobre un dominio geológico Septentrional perteneciente al cretácico. Los tipos litológicos principales de la Comarca de Artibai están mencionados en la Tabla 1. Además, Artibai cuenta con 645 hectáreas de Karst (Agencia Vasca del Agua, 2003).

Concretamente, la cuenca piloto, según la información dada por el visor de GeoEuskadi (geoEuskadi, s.f.) se encuentra sobre una alternancia de areniscas, a veces calcáreas y lutitas, muy localmente con niveles volcánicos o conglomerados.

Tabla 1. Tipos litológicos de la Comarca de Artibai (Agencia Vasca del Agua, 2003)

| Depósitos superficiales | Detríticos alternantes | Margas | Calizas | Rocas volcánicas | Alternancia de margocalizas y calizas | Rocas ígneas |
|-------------------------|------------------------|--------|---------|------------------|---------------------------------------|--------------|
| 1,1% | 25,8% | 16,1% | 29% | 7,5% | 19,4% | 1,1% |

3.3.3. Suelo

De acuerdo con la metodología de Soil Taxonomy, en la zona hay un suelo *údic*, es decir, un suelo colonizado por las raíces de las plantas, teniendo por lo menos 90 días de humedad acumulada y 45 días consecutivos de humedad durante los 4 meses siguientes al solsticio de verano. En esta zona prima un suelo del orden Inceptisol, característico de regiones húmedas y subhúmedas.

El suelo de la cuenca piloto tiene un porcentaje de arcilla del 27-35%, un 40-50% de limo y un 23-45% de arena, por lo que basados en el triángulo textural de la clasificación USDA es un suelo franco-arcilloso¹.

La capacidad de infiltración² de la Cuenca de Artibai es alta (90%) (Agencia Vasca del Agua, 2003).

¹ Los suelos franco-arcillosos por lo general contienen gran cantidad de nutrientes y son compatibles con la mayoría de las plantas y cultivos (Southern Mulch, s.f.).

² Cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones (Peralta, 2019).

3.3.4. Clima

La zona de estudio se encuentra en la vertiente atlántica norte, con un tipo de clima mesotérmico (moderadas temperaturas y muy lluvioso), denominado clima húmedo sin estación seca o clima atlántico gracias a la influencia notoria del Océano Atlántico (geoEuskadi, s.f.).

Uno de los factores geográficos que más condicionan el clima en el País Vasco es su latitud, debido a que determina la cantidad de energía solar incidente, sus variaciones estacionales y la dirección general de los vientos. La latitud de Euskadi varía entre los 42° y los 43, 5° al norte de Ecuador, generando una variación de la inclinación solar de 70° en el solsticio de verano y de 25° en el solsticio de invierno, con 16 horas de iluminación solar en el máximo veraniego y 9 horas en el mínimo invernal. Gracias a la Corriente del Golfo goza de un invierno más suave del que le correspondería por su latitud (Euskalmet, s.f.).

Concretamente en Berriatúa, los veranos tienen bajas temperaturas, pero los inviernos son largos, fríos, húmedos y ventosos, estando la mayor parte del año nublado (Weather Spark, s.f.). El Municipio cuenta con una estación de evapotranspiración con código GOBE ubicada en las coordenadas UTM ETRS89 (X:542610, Y:4794956, Z: 25) (Agencia Vasca del Agua, 2010).

3.3.4.1. Precipitaciones

Dentro de los distintos tipos de precipitaciones (lluvia, nieve o combinación de las dos), en Berriatúa el régimen de lluvias es el común denominador de la zona con una precipitación media anual de 1200 mm, registrándose 1196,6 mm en el año 2020. Los meses con máximos mensuales son noviembre y diciembre, mientras que septiembre y octubre son los menos lluviosos. En los meses de julio, agosto o septiembre se pueden llegar a dar tormentas de origen ciclónico. En marzo y abril destacan los fuertes aguaceros ocasionados por los frentes polares provenientes del continente europeo (Euskalmet, s.f.).

3.3.4.2. Precipitaciones invernales

Las precipitaciones invernales están comprendidas por los meses de diciembre hasta marzo. La media de la precipitación invernal es de 545,96 mm (Anexo 1).

3.3.4.3. Precipitaciones estivales

Están comprendidas entre los meses de junio a septiembre. La media de la precipitación invernal es de 217,10 mm (Anexo 2). Al comparar las precipitaciones invernales y estivales se demuestra que las precipitaciones invernales son las principales en el Municipio, pero que las lluvias son frecuentes incluso en el verano.

3.3.4.4. Temperatura

La temperatura media es de 14,4°C, la máxima media es de 18,96°C y la mínima media es de 9,87°C (haciendo la media de la temperatura media de todos los años registrados). En cuanto a las temperaturas máximas y mínimas absolutas, las temperaturas son de 37,65°C y -2,07°C respectivamente (Anexo 3).

3.3.4.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es “la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo” (Allen *et al*, 2006). La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que se podría evapotranspirar según la disponibilidad de agua, mientras que, la evapotranspiración potencial (ETP) es la que supone limitada la disponibilidad de agua (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio

Ambiente, s.f.). Los datos de la Cuenca de Artibai son de 804 mm y 747 mm respectivamente (Agencia Vasca del Agua, 2003).

3.3.4.6. Días de lluvia y nevadas

El 60% de los días de cada mes hubo lluvia en Berriatúa, mientras que solo nevó en enero, febrero y marzo (Anexo 4). Lo que afirma que el común denominador de las precipitaciones son las lluvias.

3.3.4.7. Vientos

En el País Vasco el viento más frecuente es el del norte (21%), seguido del noroeste (18%). Los vientos del noroeste son vientos que se mueven por el flujo general del aire con una fuerza de 20 km/h, mientras que los del norte solo llegan a velocidades medias de 11 km/h. Aunque los vientos del sur no son tan frecuentes, alcanzan mayores velocidades que los demás (22 km/h) provocando destrozos en tejados, invernaderos, plantas y árboles (geoEuskadi, s.f.).

En invierno, el “jet stream” o corriente en chorro, circula por latitudes bajas (30-40°) lo que ocasiona una mayor circulación de vientos del oeste, borrascas y frentes nubosos. En otoño y en primavera el flujo de aire pierde fuerza haciéndose más ondulado y generando un tiempo más cambiante, con semanas en las que dominan los vientos del sur con sus características corrientes cálidas, seguidas por vientos húmedos y frescos del norte. En verano, el viento chorro se aleja hacia el norte, generando un buen tiempo producido por el anticiclón de las Azores, que se extiende hacia el noroeste (Euskalmet, s.f.).

Un fenómeno muy común entre marzo y octubre en esta zona son las galernas; Entradas fuertes de aire marino con una velocidad entre 60 y 85 km/h que aparecen repentinamente y generan daños en los puertos. Uno de los signos característicos de la llegada de una galerna es la temperatura anormalmente alta en la mañana (23°C-30°C) con cielos despejados o poco nubosos. Las galernas se producen por el contacto entre una masa de aire superficial cálida formada en la depresión del Ebro contra una masa de aire fresco marino (Euskalmet, s.f.).

3.3.4.8. Luz diaria, insolación e índice UV

Según el Anexo 5, la media de luz diaria durante todos los meses del año se sitúa entre 9 y 15,4 horas, y el promedio de insolación se encuentra entre 4,8 y 9,3 h (en ambos casos el mes de julio alcanza mayor valor). En cuanto el índice de UV los meses de mayo a septiembre tienen un mayor índice (5).

3.3.4.9. Pisos bioclimáticos

Los pisos bioclimáticos en España se dividen en tres regiones (Eurosiberiana, Macaronésica y Mediterránea). Berriatúa se encuentra en la región Eurosiberiana, la cual se divide en alpino, subalpino, montano y colino. Según los cálculos del índice de termicidad³, Berriatúa se encuentra en un piso colino. Además, para una precipitación media anual entre 1000-1600 mm el ombroclima es húmedo (Rivas-Martínez, 1983).

3.3.5. Erosión

En Berriatúa la superficie erosionable y las pérdidas de suelo son muy bajas (0,84% y 1,21% respectivamente). Sin embargo, la potencialidad de movimientos de masa es alta (83,05%) por lo que el riesgo de deslizamientos es un factor para considerar en la zona de estudio (Del Palacio *et al*, 2018).

³ Índice de termicidad= 10 *(Temperatura media anual + media de las mínimas del mes más frío+ media de las máximas del mes más cálido) = 10* (14,4°C + 5°C + 24°C) = 434 (Rivas-Martínez, 1983).

3.4. HIDROGRAFÍA

3.4.1. Demarcación y red de drenaje

Berriatúa se encuentra ubicada sobre la demarcación hidrográfica del Cantábrico Occidental, concretamente en la cuenca de Artibai, con una superficie de 104,46 km² (Agencia Vasca del Agua, 2015).

Dentro de ella, el río principal es el río Artibai, con una longitud aproximada de 23,6 km (Agencia Vasca del Agua- URA, 2015) y con origen en la agrupación de dos arroyos procedentes de los montes Oiz y Urko, que confluyen en Markina donde el cauce ya está definido. Pasado el núcleo urbano de Aspiltza entra un afluente importante llamado Amalloa y desembocando en el pueblo pesquero Ondarroa (Anbiotek, 2009).

Este río está incluido en la Red Natura 2000, siendo un lugar de interés comunitario (LIC) (Agencia Vasca del Agua, 2015).

3.4.2. Recursos hídricos y balances

En la Tabla 2 se ve referenciada la aportación actual y la esperada en el año 2027 en la Cuenca de Artibai. Por otra parte, se muestran los balances (demanda, déficit y garantía). Se destaca que la garantía es casi del 100%, evidenciando que la zona cuenta con grandes aportes de agua.

Tabla 2. Aportación anual y específica actual y estimada para el año 2027 y datos de balances (demanda, déficit y garantía) en la Cuenca de Artibai (Agencia Vasca del Agua, 2010).

| Dato | Valor |
|--|-------|
| Aportación anual actual (hm ³ /año) | 88,1 |
| Aportación específica actual (mm) | 843 |
| Aportación anual en el 2027 (hm ³ /año) | 84,2 |
| Aportación específica en el 2027 (mm) | 806 |
| Demanda total (hm ³ /año) | 0,251 |
| Demanda servida (hm ³ /año) | 0,246 |
| Déficit (hm ³ /año) | 0,005 |
| Garantía mensual (%) | 92,78 |
| Garantía volumétrica (%) | 98,06 |
| Déficit máximo mensual (hm ³) | 0,007 |

3.5. ESTADO FORESTAL

3.5.1. Usos y distribución de especies por ha.

En el Término Municipal de Berriatúa el porcentaje de superficie pública es del 0%, siendo el uso principal los bosques de plantación representando un 64% de la superficie (Tabla 3). En relación con la distribución de especies, las coníferas destacan sobre las frondosas representando el 66% de las especies y siendo el *Pinus radiata* la que presenta una mayor cantidad de hectáreas. En cuanto a las frondosas, destaca el *Eucalyptus globulus* y el *Eucalyptus nitens* (Anexo 6).

3.5.1. Servicios ecosistémicos

La Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental, junto con la Universidad del País Vasco, el Gobierno Vasco y la Diputación Foral están realizando un proyecto de investigación denominado "Evaluación de los Servicios de los Ecosistemas de Euskadi" donde a través del visor geoEuskadi (geoEuskadi, s.f.) se puede identificar los diferentes servicios ecosistémicos disponibles en la zona (Tabla 4). Siendo el abastecimiento de madera, el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica aquellos SE con mayor valor.

Tabla 3. Usos del suelo del Municipio de Berriatúa (Gobierno Vasco, 2020).

| USO | SUP.(ha) | % PÚBLICO |
|--------------------------------|----------|-----------|
| Bosque | 119 | 0 |
| Bosque de plantación | 1226 | 0 |
| Bosque de galería | 33 | 0 |
| Matorral, herbazal y pastizal | 60 | 0 |
| Monte sin veg. Superior | 8 | 0 |
| Agrícola | 14 | 0 |
| Artificial | 57 | 0 |
| Agua | 7 | 0 |
| Autopistas y autovías | 4 | 0 |
| Minería-escombreras-vertederos | 1 | 0 |
| Prado | 386 | 0 |
| Total | 1912 | 0 |

Tabla 4. SE ofrecidos en el Municipio de Berriatúa (geoEuskadi, s.f).

| Servicio ecosistémico | Valor |
|---------------------------|------------------------------------|
| Abastecimiento de madera | Alto (15-20m ³ /año*ha) |
| Almacenamiento de carbono | Alto 161-214 tC/ha |
| Regulación hídrica | Alta capacidad de infiltración |

3.5.2. Itinerarios silvícolas habituales para las plantaciones de pino radiata en Vizcaya.

Actualmente, según la información aportada por los propietarios forestales, en Vizcaya se plantean tres itinerarios silvícolas para plantaciones de *Pinus radiata* según el destino de la madera y la densidad inicial (Ni) de repoblación.

Las tres opciones tienen en cuenta que la masa no se regenera naturalmente, que las claras deben ser tempranas e intensas y las podas son necesarias:

1. Turno convencional para *Pinus radiata* de 35 años con un marco de plantación de 3x3 m, repoblado en invierno con una Ni de 1100 pies/ha y con objetivo final de madera gruesa, con alta calidad para muebles y ebanistería y aprovechamientos intermedios de madera mediana para sierra menuda y de madera pequeña para trituración (Anexo 7).
2. Marco de plantación de 3x2, repoblado en invierno, con una Ni de 1650 pies/ha con un turno de 28 años, para madera final no muy gruesa con destino de pallets y embalajes, con un aprovechamiento intermedio de madera mediana para sierra menuda y madera pequeña para trituración (Anexo 8).
3. Turno final de 25 años repoblado en invierno, con una Ni de 2500 pies/ha con objetivo de madera final mediana, con destino de sierra menuda y trituración y con abundantes aprovechamientos intermedios de madera pequeña para trituración (Anexo 9).

La primera opción es el itinerario habitual aplicado en la zona de estudio, por lo que se utilizará como referencia para una primera aproximación a la caracterización ecohidrológica de la cuenca piloto.

Debido a que no todas las actuaciones del itinerario tienen una implicación en la variación de la cantidad de agua, se ha realizado una tabla resumen (Tabla 5) con las actuaciones más relevantes y su correspondiente densidad inicial (Ni), densidad final (Nf) y porcentaje extraído, todas ellas referidas a pies/ha.

Tabla 5. Resumen con las actuaciones relevantes del itinerario habitual aplicado en la zona de estudio. Ni: densidad inicial. Nf: densidad final. % extracción: porcentaje de pies/ha extraídos en la intervención.

| AÑO | Intervención | Ni (pies/ha) | Nf (pies/ha) | % aprox. Extracción |
|-----|---|--------------|--------------|---------------------|
| 0 | Repoblación | 1100 | 1100 | 0 |
| 4 | Desbroce | | | |
| 8 | Desbroce, clareo y poda baja sobre todos los pies | 1016 | 864 | 15 |
| 14 | Desbroce y clara | 864 | 562 | 35 |
| 18 | Segunda clara sin extracción | 562 | 562 | |
| 23 | Tercera clara con extracción | 562 | 298 | 47 |
| 35 | Corta final | 298 | 0 | 100 |

4. VARIABLES ECOHIDROLÓGICAS Y ECOFISIOLÓGICAS DEL COMPLEJO SUELO/PLANTA/ATMÓSFERA.

Teniendo en cuenta que la ecohidrología se enfoca en los procesos ecológicos ocurridos dentro del ciclo hidrológico y se esfuerza por utilizar estos procesos para mejorar la sostenibilidad ambiental (Zalewski, 2010), entender y definir las variables básicas del ciclo hidrológico es el primer paso para su aplicación.

Los componentes básicos del ciclo del agua son: la precipitación (P), la escorrentía superficial (Es), la evaporación (E), la evapotranspiración (ET), infiltración (I) y las retenciones en la cuenca (Figura 4).



Figura 4. Representación de las variables básicas del ciclo hidrológico en una cuenca forestal. Fuente: Elaboración propia

La P se define como “todas las aguas meteóricas que caen sobre la superficie de la tierra, tanto bajo la forma líquida como sólida (nieve, granizo)” (Segeerer C., 2006). La parte de la que llega al suelo se denomina precipitación neta (Pn) y es la principal fuente que abastece el ciclo hidrológico de un bosque (Segeerer, 2006). Sin embargo, otra parte es interceptada por las hojas, las ramas y los troncos de los árboles, y devuelta a la atmósfera por evapotranspiración (Xiang, 2017), por lo que aparece otra variable denominada interceptación (It). El agua que llega al suelo según la cobertura, el tipo de suelo y la pendiente del terreno se puede retener, infiltrar o generar escorrentía (Ramos *et al*, 2011).

Aun así, las variables básicas del ciclo hidrológico (Tabla 6) no son suficientes para realizar una caracterización ecohidrológica puesto que las interacciones entre el suelo, la atmósfera y la planta afectan a este ciclo e introducen más variables representativas.

Tabla 6. Variables básicas del ciclo hidrológico.

| Variable | Unidades |
|----------|--|
| P | l/m ² *unidad de tiempo o mm/unidad de tiempo |
| It | l/m ² o mm |
| Es | l/m ² o mm |
| ET | l/m ² o mm |
| I | l/m ² o mm |

Estas interacciones están explicadas por el concepto de continuo suelo/planta/atmósfera (CSPA), donde Huber (1928) y Van den Honert (1948) analizaron el flujo de agua en los vegetales terrestres desde el suelo hasta la atmósfera mediante el uso de circuitos electrónicos y conocimientos derivados de la física. Así dedujeron que el flujo del agua en la planta es el resultado de un gradiente de presión entre dos extremos, conocido como potencial hidráulico (Ψ). Los dos extremos son el suelo (comienzo) y la atmósfera (sumidero final) y entre ellos está la planta (medio): $\Psi_{\text{suelo}} > \Psi_{\text{planta}} > \Psi_{\text{atmósfera}}$ (Gil-Pelegrín, 2005).

4.1. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO SUELO

La capacidad de infiltración (definida previamente en la nota al pie 1) es uno de los factores más importantes a considerar para que el agua pueda pasar del suelo a la planta a través de las raíces, esta capacidad está determinada por la textura y la estructura de este (Savé, 2005). En el caso de la cuenca de estudio, como se menciona en el apartado 3.3.3, el suelo se caracteriza por tener un coeficiente de infiltración alto.

Otra variable importante es la humedad del suelo, ya que determinará la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la capacidad disponible de agua y la saturación⁴. Una forma de medir esa humedad es a través del contenido volumétrico de agua (θ), el cual mide el volumen de agua (V_w) por volumen total de suelo (V_t). El θ se mide fácilmente con sensores (Chandler *et al*, 2004).

Saber el contenido de materia orgánica permitirá determinar la capacidad de retención de la humedad de agua en el suelo porque tienen una relación directamente proporcional (a más materia orgánica, más retención). Además, al presentar un color oscuro, aumenta la absorción de energía de la radiación solar, lo que incrementa la temperatura del suelo. La temperatura del suelo condiciona la viscosidad del agua, por lo que, a mayor temperatura, menor viscosidad y mayor posibilidad de absorción de

⁴ La capacidad de campo se refiere a la cantidad constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El punto de marchitez permanente se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa de un cultivo y el agua que está en el suelo no está disponible para este. La capacidad disponible es la cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas. La saturación es el contenido de agua llenando todos los poros del suelo (FAO, s.f.).

agua por parte de las raíces de las plantas, favoreciendo a la fotosíntesis y la absorción de nutrientes (Onwuka, 2018).

Las variables que logran dar una aproximación a una caracterización ecohidrológica desde el punto de vista del suelo están mencionadas en la Tabla 7 con sus respectivas unidades y representadas en la Figura 5.

4.2. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO PLANTA

Una vez el agua ya está disponible para la planta, será tomada por las raíces por medio de los pelos absorbentes y empezará a ascender por la planta debido a la diferencia de Ψ entre la raíz y el suelo ($\Psi_{raíz} < \Psi_{suelo}$) (García, 2021).

El tejido especializado para el ascenso del agua es el xilema. En el caso de las coníferas como es el *Pinus radiata*, el xilema está constituido principalmente por traqueidas⁵. Cuando las moléculas de agua llegan al xilema se unen al torrente transpiratorio, siendo el flujo de savia una de las variables que permitirán estimar la cantidad de agua transpirada por los mimos y determinar la presencia de estrés hídrico (Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla , 2021).

Una vez el agua llega a las hojas se produce una salida en forma de vapor de agua a través de la apertura de los estomas, lo que conduce a una disminución del Ψ y por consecuente, a un aumento del gradiente entre la hoja y el suelo ($\Psi_{hoja} > \Psi_{suelo}$), provocando el flujo de agua desde las raíces. Cuando la disponibilidad de agua en el suelo disminuye, disminuye el flujo de agua por la planta, lo que se traduce en un déficit hídrico que induce el cierre de los estomas. Sin embargo, la apertura y el cierre de los estomas no solo depende de esto, también influye la luz, la concentración de CO_2 y la temperatura del ambiente (Portal Fruticola , 2016).

Por su parte, la madera, los troncos y las ramas constituyen un almacén de agua que juega un papel muy importante en la regulación de los desequilibrios entre la absorción y la respiración a lo largo del día (Holbrook, 1995), por lo que otra variable para tener en cuenta es el contenido de agua en el tronco, que al igual que el flujo de savia puede ser medido por sensores.

Como se había explicado previamente, no toda el agua que precipita llega al suelo debido a que, según la forma, el tamaño y el grosor del dosel una parte será interceptada, retenida y evaporada directamente (Figura 5). En ecosistemas con una fracción de cabida cubierta (FCC) muy alta, como es el caso de la cuenca de estudio que tiene una FCC del 85% (medido por parte del proyecto SINCERE con una escuadra óptica) y en bosques perennifolios como los de conífera, la I_t tiene un valor aproximado del 15% de la precipitación (Savé, 2005).

Otra variable que influye notablemente en la I_t , la cantidad de CO_2 interceptado y los flujos de vapor de agua es el índice de área foliar (LAI). El LAI representa la proyección sobre el plano del suelo del área foliar, es decir, el área de conjunto de hojas por unidad de suelo (Calvo *et al*, 2005). El LAI de la cuenca piloto es de $1,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$. (medido por parte del proyecto SINCERE con LiCOR 2000⁶).

Todas las variables mencionadas están recopiladas en la Tabla 7 con sus respectivas unidades.

⁵ Las traqueidas están definidas como “restos lignificados de células alargadas que se conectan en sus partes finales a través de espacios ricos en punteaduras, por las que necesariamente debe circular el agua a lo largo de su camino” (Gil-Pelegrín *et al*, 2005).

⁶ Instrumento de medición del LAI

4.3. VARIABLES DEL COMPARTIMENTO ATMÓSFERA

La mayor diferencia de Ψ corresponde al paso de la hoja a la atmósfera ($\Psi_{\text{hoja}} > \Psi_{\text{atmósfera}}$), pasando de -0,8 MPa a -95 MPa aproximadamente. El valor de $\Psi_{\text{atmósfera}}$ dependerá de la humedad relativa (HR)⁷, la velocidad del viento y la apertura de los estomas (García, 2021). Los estomas son muy sensibles a la HR, cuando esta incrementa los estomas se abren optimizando el balance de pérdida de agua y la entrada de CO₂ (Gil-Marín *et al*, 2006).

El déficit de presión de vapor (DPV)⁸ también influencia mucho la apertura y el cierre de los estomas. Cuando este es mayor a 2 kPa se produce una transpiración excesiva, lo que hace que la planta cierre sus estomas para evitar la deshidratación y cuando el DPV es bajo (<0,5 kPa) significa que la atmósfera está saturada y la planta no podrá transpirar generando que la planta también cierre sus estomas (Bioagro, 2020).

Por último, es importante recalcar que el DPV y la radiación solar están estrechamente relacionadas con la temperatura del aire y la HR. Cuando la radiación solar disminuye, la DPV también disminuye, pero la HR aumenta, lo que se traduce en un bajo consumo de agua por parte de los árboles. Por otro lado, cuando la radiación solar aumenta, la DPV aumenta y la HR disminuye, por lo que aumenta el consumo de agua del árbol y la evapotranspiración.

Todas las variables mencionadas en el complejo atmósfera están mencionadas con sus respectivas unidades en la Tabla 7 y representadas en la figura 5.

Tabla 7. Recopilación de las variables del CSPA mencionadas en los apartados 4.1, 4.2 y 4.3, con sus correspondientes unidades de medición.

| Complejo | Variable | Unidades |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------|
| SUELO | Capacidad de infiltración | Alta |
| | Ψ_{suelo} | kPa |
| | Contenido volumétrico (θ) | % |
| | Temperatura del suelo | °C |
| | Contenido de materia orgánica | Kg/m ² |
| PLANTA | Flujo de savia | L/árbol |
| | Índice de área foliar (LAI) | m ² /m ² |
| | Contenido de agua en el tronco | % |
| | Fracción de cabida cubierta (FCC) | % |
| ATMÓSFERA | Humedad relativa (HR) | % |
| | Velocidad del viento | m/s |
| | Temperatura del aire | °C |
| | Radiación solar | W/m ² |
| | Déficit de presión de vapor (DPV) | kPa |

⁷ HR: cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire con respecto a la cantidad máxima que podría contener para la misma temperatura (Agencia Estatal de Meteorología, 2018).

⁸ El DPV se define como "la diferencia entre la cantidad de vapor de agua que puede retener la atmósfera y la que contiene en ese momento" (Bioagro, 2020).

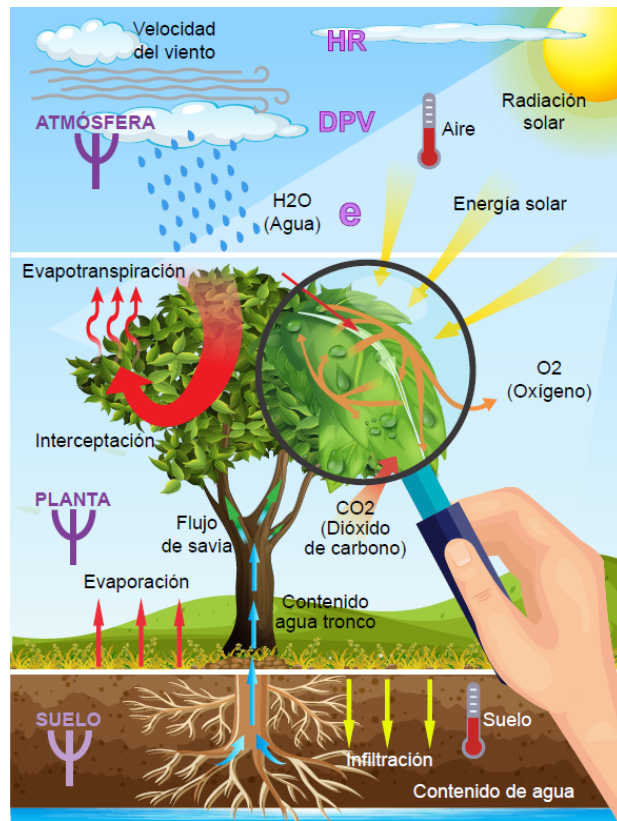


Figura 5. Representación gráfica del CSPA recopilando las variables de la Tabla 7.
Fuente: Elaboración propia.

5. PRIMERA CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA PILOTO.

En la parcela de experimentación del Proyecto SINCERE se instalaron diversos instrumentos de medición para determinar los valores de diversas variables ecohidrológicas y ecofisiológicas. Los datos son recogidos por un datalogger CR1000X, este dispositivo mide las señales de los sensores, controla las telecomunicaciones y analiza y almacena los datos (Campbell Scientific, 2017), por lo que los datos tomados a través de los instrumentos se pueden exportar y analizar.

Esta parcela de experimentación cuenta con una estación meteorológica (Atmos 41), seis sensores Teros 11 y T21 distribuidos por el área y enterrados en el suelo y cuatro sensores sap-flow (Implexx) instalados en distintos árboles de la zona. Las variables medidas por cada uno de los instrumentos instalados se muestran en el Anexo 10.

Con una serie de datos del 20 de enero del 2021 al 1 de mayo del 2021 (112 días) se han elaborado unas gráficas (Figuras 6, 7 y 8) que permitirán hacer una primera aproximación a la caracterización ecohidrológica de la cuenca piloto. Es importante recalcar que estos patrones cambiarán drásticamente con la llegada del verano, donde la humedad del suelo disminuirá y por ende la demanda atmosférica aumentará. Por ello será necesaria la utilización de series más grandes de datos que a su vez servirán como inputs para el modelo BIOME-BGC_MuSo (BIOME-BGCMuso, 2021) explicado posteriormente en el punto 7.

5.1. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO SUELO

En la Figura 6 se ven representadas dos variables fundamentales en este compartimento: el contenido de agua en el suelo (medido como el porcentaje de volumen de agua por volumen de suelo) y el Ψ_{suelo} . Como indica el Anexo 10, estas

variables son medidas por sensores Teros 11 y Teros 21 respectivamente. El contenido de agua en el suelo ha sido medido a tres profundidades diferentes (5 cm, 20 cm y 45 cm).

La media de agua en el suelo durante los 102 días de medición a 45 cm, 20 cm y 5 cm es de 37,42%, 37,13% y 31,01% respectivamente, al ser valores tan similares (principalmente a 20 cm y 45 cm) se demuestra la alta capacidad del suelo para infiltrar agua hasta horizontes más profundos. Además, el valor del Ψ_{suelo} fue siempre mayor a -33 kPa (umbral de la capacidad de campo) por lo que la infiltración se ha estado produciendo a lo largo de todo el período estudiado.

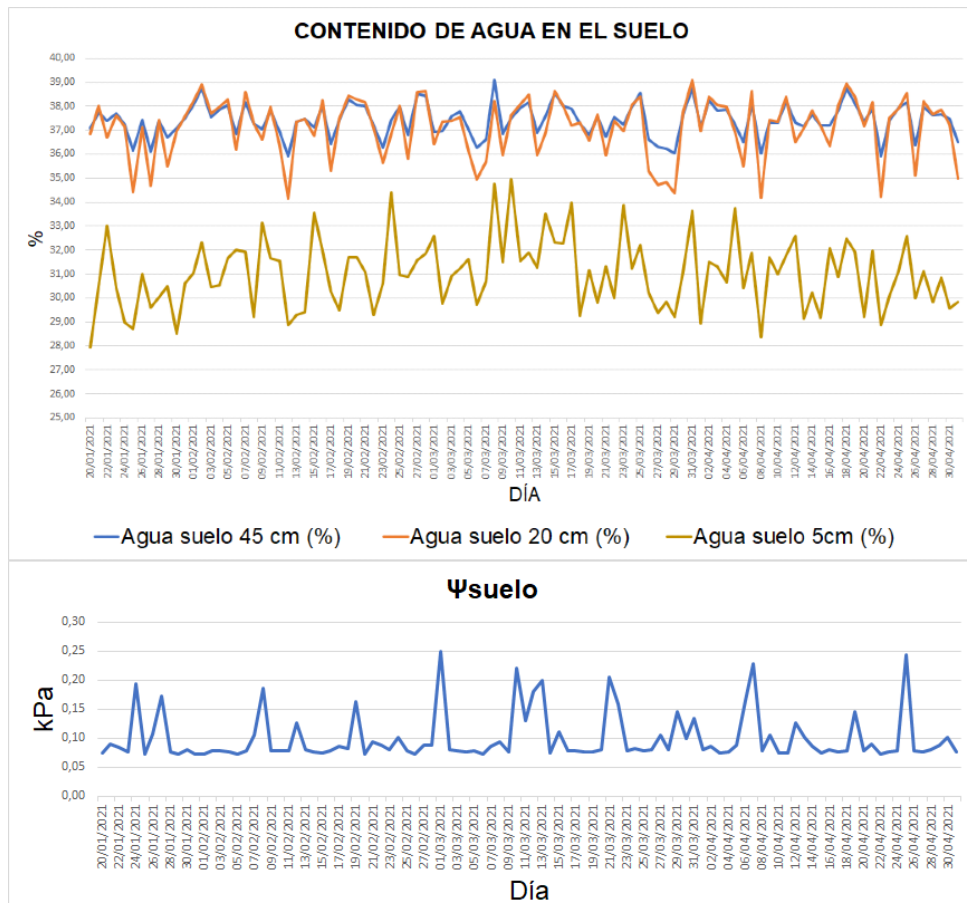


Figura 6. Gráficas del contenido de agua en el suelo (%) a diferentes profundidades (5 cm, 20cm y 45cm) y el en kPa registrados en la parcela de experimentación.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO PLANTA

En este caso, las variables medidas son: el contenido de agua en el tronco, el consumo de agua por árbol, la P y la transpiración (Figura 7). La media de consumo de agua por parte del árbol es de 22,13 l/día. El día en que el árbol promedio más consumió agua fue el 22 de febrero, con un valor de 45,09 litros, 15 días después de la máxima precipitación (44,86 mm).

Durante el periodo de 112 días, llovió un 56,86% de esos días (44 días) generando una precipitación acumulada de 276,63 mm. De esos 276,63 mm se transpiraron 56,43 mm, es decir, un 20,39%, con una media de 0,55 mm de agua transpirada al día por los árboles/ha presentes en la parcela de experimentación.

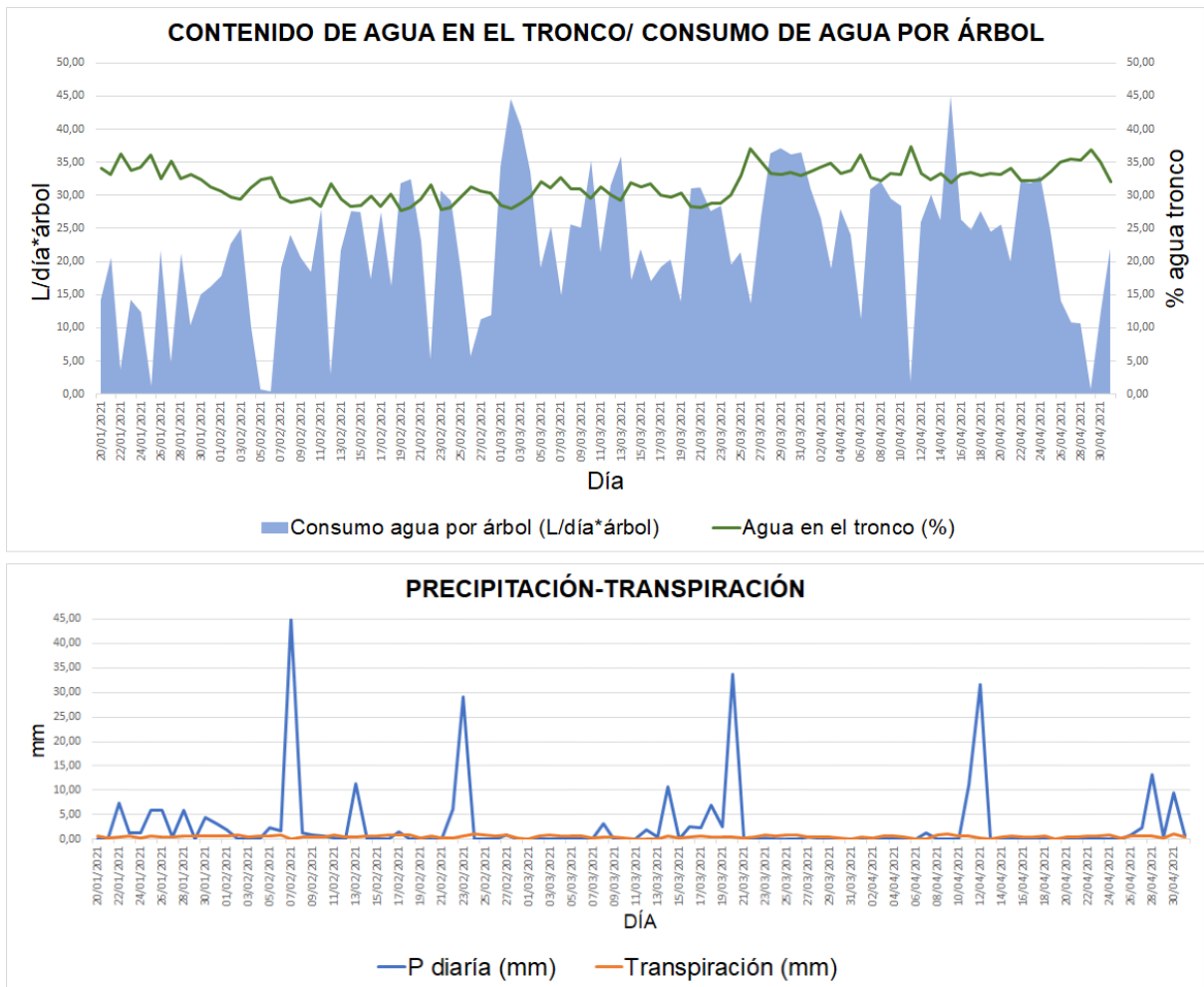


Figura 7. Gráficas donde se representa la cantidad de agua en el tronco (%), el consumo de agua por el árbol (l/día), la P y la transpiración (mm) registrados en la parcela de experimentación.
Fuente: Elaboración propia.

5.3. CARACTERIZACIÓN DEL COMPARTIMENTO ATMÓSFERA

Las variables medidas y representadas en la Figura 8 son: P, temperatura diaria, radiación solar, DPV, HR y velocidad media del viento.

La precipitación media durante este periodo fue de 2,71 mm diarios, con un máximo de 44,86 mm el 7 de febrero. La temperatura media fue de 11,3°C con una media máxima de 26,9°C el 1 de abril y una media mínima de -1,81°C el 10 de marzo.

El 13 de abril la HR fue del 100%, cuando el DPV era nulo y la radiación solar registrada fue de tan solo 15,2 W/m². El día de menor HR fue el 15 de febrero, con un DPV de 1,80kPa y 118,7 W/m². Al ver los datos se puede corroborar las relaciones entre las variables mencionadas en el punto 5.3. La velocidad media del viento fue de 1,61 m/s, con una velocidad máxima de 4,66 m/s el 26 de enero y una mínima de 0,40 m/s el 22 de febrero.

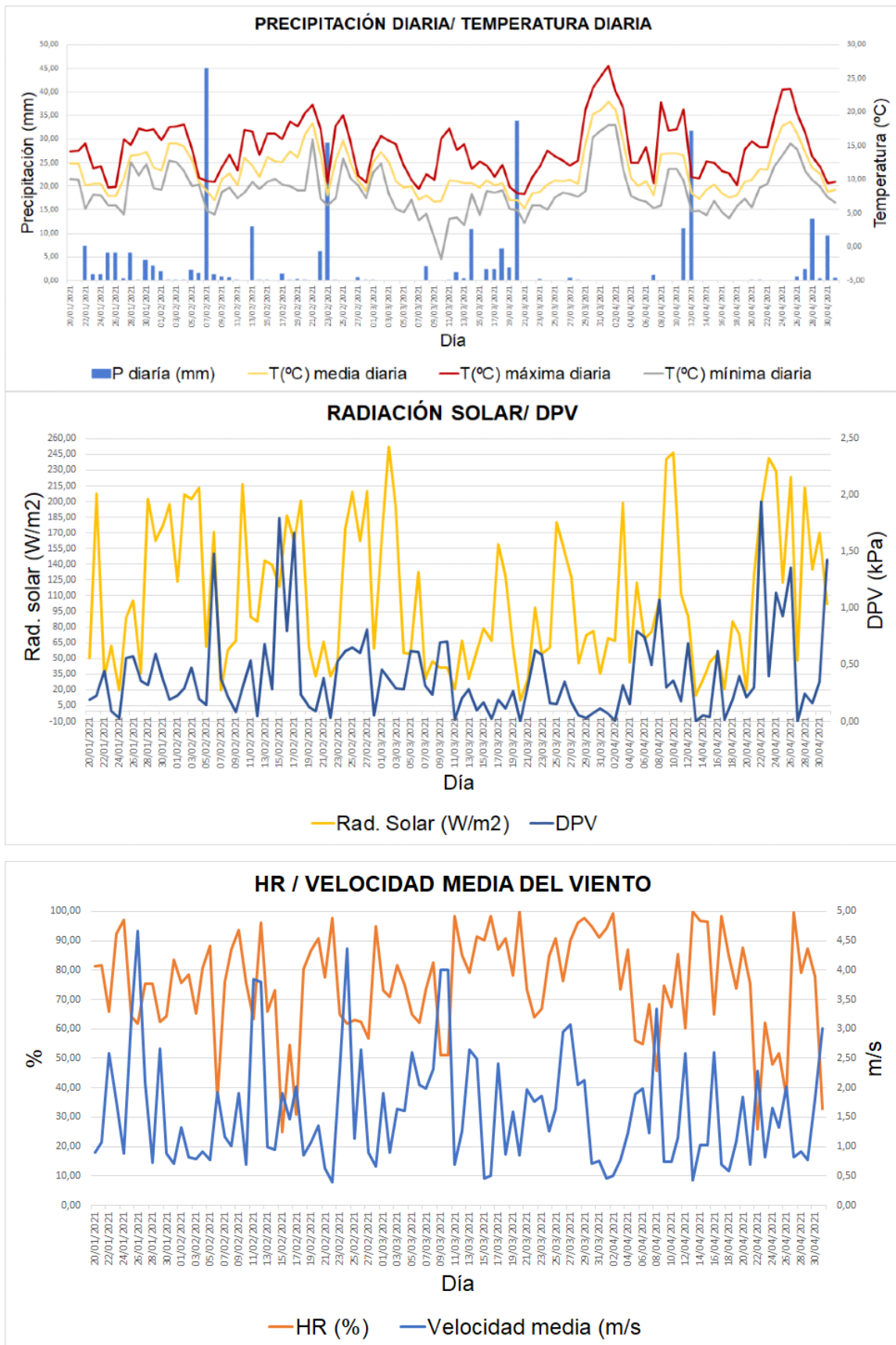


Figura 8. Graficas donde se registra la P diaria (mm), la temperatura diaria (°C), la radiación solar (W/m²), el DPV (kPa), la HR (%) y la velocidad media del viento registrados en la parcela de experimentación

6. CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA DEL ITINERARIO HABITUAL TRAS LA UTILIZACIÓN DEL MODELO.

El modelo de simulación utilizado en este trabajo es el Biome-BGCMuSo 6.1, un modelo biogeoquímico basado en procesos que simula el almacenamiento y el flujo diario de agua, carbono y nitrógeno entre el ecosistema y la atmósfera, teniendo en cuenta también los componentes del ecosistema (Hydi *et al* , 2021). Dos de las condiciones más importantes para su aplicación es que la masa sea monoespecífica y que tenga un solo estrato, por lo que es ideal en plantaciones forestales como la de la cuenca piloto.

Teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo, la cuantificación del agua será el proceso clave a identificar. Sin embargo, como una de las intenciones de este trabajo es proponer una gestión que favorezca los ingresos por PSA de los SE, la fijación de carbono es uno de los SE a los que se le está estableciendo un mercado, por lo que tenerlo en cuenta dentro de la ecohidrología forestal es de gran interés, aplicando así la multifuncionalidad que necesita la selvicultura forestal.

Los inputs que requiere el modelo se dividen en cuatro grandes grupos: datos meteorológicos, datos del suelo, datos ecofisiológicos y datos de la gestión forestal (Anexo 11). Muchos de estos datos han sido extraídos de la caracterización del punto 3 y los datos tomados en la cuenca piloto (Figuras 6, 7 y 8). Mientras que otros, son valores por defecto que da el programa.

El uso de este modelo tiene tres fases: calibración, validación y simulación

6.1. CALIBRACIÓN

Esta fase consiste en ajustar los parámetros de la zona de estudio mediante una comparación sucesiva entre los datos simulados y los observados hasta conseguir un buen ajuste. Para ello se utilizaron las series temporales de humedad del suelo (Figura 7) observadas en la parcela experimental.

Teniendo en cuenta que la humedad del suelo a distintas profundidades es una variable con muchos datos (valores diarios), para poder relacionar lo observado con lo simulado es necesario calcular el coeficiente de correlación de Pearson (r). El valor de este coeficiente siempre es mayor a 0, siendo 0 ausencia de correlación y 1 correlación totalmente significativa (Martínez, 2009). En la Tabla 8 se muestra que su correlación es significativa por lo que el modelo se da como calibrado

Tabla 8. Valores de correlación de Pearson obtenidos tras comparar los datos medidos en la parcela experimental con los datos de la simulación.

| Parámetro | Pearson |
|--------------|---------|
| Agua a 5 cm | 0,88 |
| Agua a 20 cm | 0,92 |
| Agua a 45 cm | 0,92 |

6.2. VALIDACIÓN

Una vez transcurrida la calibración, se realiza una nueva comparación entre los datos simulados y observados, ya no con la idea de modificar parámetros sino de comprobar que sí se ajustan los valores. Las variables para comparar fueron: el LAI y el diámetro normal (Dn). El valor del LAI observado se mencionó en el apartado 4.2.

Para el cálculo del Dn simulado se aplicaron ecuaciones alométricas de Moore⁹ relacionando la biomasa y el diámetro a una edad concreta en el *Pinus radiata* con los datos de biomasa que genera el modelo. Según los datos tomados en la parcela experimental por el Proyecto SINCERE, el Dn observado es de 33,54 cm. Los valores obtenidos y simulados del LAI y el Dn son muy próximos (Tabla 9) por lo que el modelo se considera validado y se puede proceder a la simulación

Tabla 9. Comparación de valores simulados y obtenidos para el LAI y el Dn que determinan que el modelo es válido.

| Variable | Observado | Simulado |
|---------------------------------------|-----------|----------|
| LAI (m ² /m ²) | 1,5 | 1,8 |
| Dn (cm) | 33,5 | 31,5 |

6.3. SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA.

Una vez finalizada la calibración y la validación se procede a hacer la simulación con el itinerario actual mencionado en la Tabla 5 y las tres series climáticas que se generaron con el programa informático ClimGen según indica el Anexo 11.

Adicionalmente, se tendrán en cuenta las otras dos densidades mencionadas en el punto 3.5.2 (1650 pies/ha y 2250 pies/ha) para poder determinar la influencia de la densidad en la cantidad de agua infiltrada y la escorrentía.

En términos de carbono el modelo obtiene los resultados de la Producción Neta del Ecosistema (PNE)¹⁰ y el carbono extraído¹¹ (Kg/m²).

Todos los datos serán referidos a cada una de las actuaciones forestales y densidades como se ve en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con el itinerario habitual.

| Itinerario habitual | | 1100 pies/ha | | 1650 pies/ha | | 2250 pies/ha | |
|---|------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| AGUA INFILTRADA Y ESCORRENTIA (%) | | | | | | | |
| Año | % extraído | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía |
| 8 | 15 | 46,2 | 9,5 | 46,9 | 9,5 | 46,1 | 9,5 |
| 14 | 35 | 46,8 | 8,8 | 46,1 | 8,7 | 45,1 | 8,6 |
| 23 | 47 | 39,1 | 8,6 | 36,3 | 8,3 | 33,3 | 8,1 |
| 35 | 100 | 12,4 | 5,8 | 12,3 | 5,6 | 9,6 | 5,7 |
| Total | | 36 | 8,2 | 35,4 | 8,1 | 33,5 | 8 |
| PNE Y CARBONO EXTRAÍDO (kgC/m²) | | | | | | | |
| Año | %extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído |
| 8 | 15 | -1,4 | 0 | -1,4 | 0 | -1,4 | 0 |
| 14 | 35 | 0,1 | 0 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,1 |
| 23 | 47 | 0,7 | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 1,1 | 0,4 |
| 35 | 100 | 9,8 | 2,5 | 10,0 | 2,6 | 10,1 | 2,7 |
| Total | | 9,2 | 2,8 | 9,7 | 3,0 | 10,2 | 3,1 |

⁹ Las ecuaciones alométricas de Moore se definen como “aplicaciones matemáticas que permiten realizar análisis de las relaciones entre diferentes dimensiones de la planta” (Rodríguez, 2013)

¹⁰ PNE: diferencia entre la cantidad de carbono orgánico fijado en un ecosistema mediante la fotosíntesis y la respiración total de carbono orgánico que podría perder en el ecosistema (Boletín Agrario, s.f.)
Sera una referencia para establecer la cantidad de carbono fijado por el sistema.

¹¹ El carbono extraído hace referencia a la cantidad de biomasa que se extrae al intervenir silvícolamente (leñas, maderas, piñas y otros productos). Teniendo en cuenta que la fracción de carbono contenido en la materia seca (m.s) tiene un valor genérico de 0, 5 kg de C por kg de m.s. (Penman *et al*, 2008)

Si observamos los datos de la Tabla 10 y las gráficas del Anexo 12 se puede determinar que a menor valor de densidad inicial (Ni), mayor cantidad de agua llegará al suelo (agua infiltrada más escorrentía). Esto se debe a que al haber menos pies/ha habrá menor interceptación y mayor transpiración y, por ende, mayor Pn que podrá infiltrarse y estar disponible para la absorción por las raíces de los árboles, o escorrentía que recargará los acuíferos.

Sin embargo, a medida que avanza el itinerario, aunque se disminuye la densidad, el porcentaje de agua infiltrada disminuye. La razón es que la disminución de la densidad con las claras potencia la vitalidad y el vigor del arbolado, lo que causa un incremento en el diámetro de la copa, lo que aumentará la cantidad de agua interceptada (Polyfarming, s.f.)

Por esto, la mejor opción en términos de cantidad de agua en el suelo es la de 1100 pies/ha, la cual infiltra un 36% de la precipitación total (un 0,6% más que a una Ni de 1650 pies/ha y un 2,5% más que a una Ni de 2250 pies/ha). Con esta opción la escorrentía generada es de 8,2% y su variación no es significativa con respecto a las demás densidades.

En cuanto al carbono, una mayor Ni supone una PNE y una extracción de C mayor. La PNE se sitúa en un rango de 9-10 kgC/m², mientras que, la extracción es un 2-3% de kgC/m². Al contrario de la cantidad de agua, la PNE y la extracción de carbono aumentan a medida que avanza la gestión, alcanzando su máximo en el momento previo a la corta final (Anexo 12). Además, la disminución de la competencia con las claras favorece el crecimiento del diámetro, lo que se traduce en una mayor cantidad de biomasa a extraer.

7. MODIFICACIONES POSIBLES AL ITINERARIO HABITUAL Y SUS IMPLICACIONES EN LA PROVISIÓN DE AGUA Y BIOMASA.

7.1. ALTERNATIVAS PROPUESTAS

En el punto 6.3 se evidenció la influencia que tiene la densidad (tanto la inicial como a lo largo del itinerario) en la provisión de agua y carbono. Sin embargo, es necesario determinar qué efectos tiene la aplicación de otros itinerarios con una distribución de claras diferente a las mismas Ni aplicadas previamente y a un turno distinto.

Para ello, se realizaron dos alternativas: Alternativa 1 (Tabla 11) y Alternativa 2 (Tabla 12) con una distribución de intensidad/frecuencia diferente al itinerario habitual.

Algunas diferencias relevantes entre los tres itinerarios (itinerario habitual y Alternativas propuestas) que pueden implicar cambios significativos en la ecohidrología son:

- La Alternativa 1 tiene un turno menor (32 años).
- La Alternativa 2 hace el clareo cinco años más tarde de lo habitual (13 años).
- En las Alternativas sí habrá extracción de masa en la 2da clara.
- El itinerario habitual es el único que disminuye el porcentaje de extracción de la última clara con respecto a las dos anteriores.

Tabla 11. Alternativa 1 propuesta con un turno menor al habitual (32 años) y una distribución de intensidad/frecuencia diferente

| Año | Intervención | % aprox. Extracción |
|-----|--------------------------|---------------------|
| 0 | Repoblación | 0 |
| 8 | Clareo y poda baja | 27 |
| 14 | 1ra clara | 44 |
| 18 | 2da clara con extracción | 50 |
| 23 | 3ra clara con extracción | 33 |
| 32 | Corta final | 100 |

Tabla 12. Alternativa 2 propuesta con mismo turno que el habitual pero otra distribución de intensidad/frecuencia.

| Año | Intervención | % aprox. Extracción |
|-----|--------------------------|---------------------|
| 0 | Repoblación | 0 |
| 13 | Clareo y poda baja | 32 |
| 18 | 1ra clara | 44 |
| 20 | 2da clara con extracción | 60 |
| 25 | 3ra clara con extracción | 80 |
| 35 | Corta final | 100 |

7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN FORESTAL.

Una vez determinadas las alternativas silvícolas se ingresaron los datos de gestión forestal al modelo para proceder a hacer la caracterización para cada una de las Alternativas (Tabla 13 y 14).

Tabla 13. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con la Alternativa 1.

| Alternativa 1 | | 1100 pies/ha | | 1650 pies/ha | | 2250 pies/ha | |
|---|------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| AGUA INFILTRADA Y ESCORRENTIA (%) | | | | | | | |
| Año | % extraído | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía |
| 8 | 27 | 46,2 | 9,5 | 46,2 | 9,5 | 46,1 | 9,5 |
| 14 | 44 | 47,6 | 8,8 | 47,3 | 8,7 | 46,9 | 8,7 |
| 18 | 50 | 46,4 | 9 | 45,3 | 8,9 | 43,9 | 8,8 |
| 23 | 33 | 38,6 | 8,7 | 34,6 | 8,5 | 33 | 8,2 |
| 32 | 100 | 20,0 | 6,8 | 17,8 | 6,6 | 16,4 | 6,5 |
| Total | | 39,8 | 8,56 | 38,24 | 8,44 | 37,26 | 8,34 |
| PNE Y CARBONO EXTRAÍDO (kgC/m²) | | | | | | | |
| Año | %extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído |
| 8 | 27 | -1,4 | 0 | -1,4 | 0 | -1,4 | 0 |
| 14 | 44 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 50 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,2 |
| 23 | 33 | 0,9 | 0,2 | 1,2 | 0,2 | 1,4 | 0,3 |
| 32 | 100 | 6,3 | 1,7 | 6,7 | 1,8 | 6,9 | 1,9 |
| Total | | 6,0 | 2 | 6,7 | 2,2 | 7,4 | 2,4 |

Tabla 14. Datos de agua y carbono obtenidos tras la simulación con la Alternativa 2.

| Alternativa 2 | | 1100 pies/ha | | 1650 pies/ha | | 2250 pies/ha | |
|---|------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| AGUA INFILTRADA Y ESCORRENTIA (%) | | | | | | | |
| Año | % extraído | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía | Infiltración | Escorrentía |
| 13 | 32 | 47,1 | 9,2 | 46,9 | 9,2 | 46,7 | 9,2 |
| 18 | 44 | 44,9 | 8,9 | 43,7 | 8,7 | 42,0 | 8,6 |
| 20 | 60 | 40,8 | 8,7 | 38,7 | 8,5 | 36,0 | 8,3 |
| 25 | 80 | 35,0 | 8,9 | 32,4 | 8,7 | 29,7 | 8,5 |
| 35 | 100 | 18,3 | 6,1 | 17,5 | 6,0 | 17,1 | 6,0 |
| Total | | 37,2 | 8,40 | 35,80 | 8,30 | 34,30 | 8,10 |
| PNE Y CARBONO EXTRAÍDO (kgC/m²) | | | | | | | |
| Año | %extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído | PNE | Extraído |
| 13 | 32 | -1,46 | 0,01 | -1,42 | 0,01 | -1,37 | 0,02 |
| 18 | 44 | 0,28 | 0,07 | 0,40 | 0,10 | 0,55 | 0,10 |
| 20 | 60 | 0,38 | 0,18 | 0,49 | 0,23 | 0,63 | 0,25 |
| 25 | 80 | 1,33 | 0,56 | 1,56 | 0,65 | 1,79 | 0,57 |
| 35 | 100 | 7,41 | 1,72 | 7,58 | 1,75 | 7,67 | 1,80 |
| Total | | 7,96 | 2,55 | 8,61 | 2,74 | 9,26 | 2,74 |

En el apartado 6.3 se había determinado que la densidad que más infiltra agua es la de Ni de 1100 pies/ha, siendo esta afirmación cierta para la Alternativa 1 y 2. Por ello, se elige esta densidad como óptima y como punto de partida para comparar los tres itinerarios.

Al comparar los datos en gráficas con la Ni óptima establecida (Anexo 13) se determina que las implicaciones de la gestión forestal son:

- El itinerario habitual es el que más carbono fija y secuestra. El incremento se ve claramente evidenciado por haber disminuido el porcentaje de extracción en la última clara, previo a la corta final.
- La Alternativa 1 es la que mayor porcentaje de agua infiltrar a lo largo de la gestión (39,8%). Sin embargo, corresponde con el itinerario que menores valores de C fija (6 kgC/m²) y extrae (2,2 kgC/m²), lo que significa que el turno influye significativamente en términos de C.
- Al haber realizado el clareo más tarde en la Alternativa 2 no se evidencia cambios significativos de agua o carbono con respecto a los otros dos itinerarios.
- Una vez realizada la 3ra clara aumenta exponencialmente el carbono y extraído, que al final significará mayor madera disponible para la venta.

En conclusión, la Alternativa 2 a una densidad de 1100 pies/ha se encuentra en el medio de los valores de las otras dos opciones, aparentando ser la mejor opción.

8. VALORACIÓN ECONÓMICA Y PROPUESTA DE MEJORA

En el apartado anterior (7.2) se determinó que la Alternativa 2 es la mejor opción por presentar valores intermedios en términos de agua y carbono con respecto a las otras dos opciones. No obstante, antes de elegirla es necesario realizar un presupuesto de los beneficios obtenidos al final de turno¹² para cada una de las alternativas (Tabla 15).

¹² Beneficios: ingresos o PSA (agua + biomasa extraída + CO2 fijado) – gastos de la gestión forestal.

Los criterios establecidos para el cálculo de los ingresos están expuestos en el Anexo 14. Para el cálculo de los gastos, los propietarios forestales de la zona han proporcionado una estimación de los gastos medios generados (Anexo 15) estableciendo unos gastos medios para cualquiera de las tres opciones de 17900 €/ha.

Tabla 15. Beneficios para cada uno de los itinerarios.

| | PSA €/ha | | |
|---------------------|---------------------|---------------|---------------|
| | Itinerario habitual | Alternativa 1 | Alternativa 2 |
| Agua | 31558,8 | 31530,2 | 32558,4 |
| Fijación de carbono | 1012,9 | 660,6 | 4095,7 |
| Biomasa extraída | 6375 | 2500 | 3187,5 |
| TOTAL PSA | 38946,7 | 34690,8 | 39841,6 |
| | Gastos €/ha | | |
| Gestión forestal | 17900 | | |
| BENEFICIOS | 21046,7 | 16790,8 | 21941,6 |

Al comparar los beneficios, se puede comprobar que la Alternativa 2 es la mejor opción, generando 895€/ha (4%) más que el itinerario habitual y 5151€/ha (23%) más que la Alternativa 1.

El PSA por la provisión de agua es la que más beneficios genera, ya que esta zona al ser muy lluviosa acumula una cantidad significativa de precipitación a lo largo del turno (28400 mm para un turno de 32 años y 42000 mm para un turno de 35 años).

9. DISCUSIÓN DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES

A la hora de aplicar la ecohidrología forestal en la gestión de las plantaciones actuales de *Pinus radiata* del País Vasco, un factor fundamental ha sido entender las interacciones del CSPA para poder reconocer qué cambios generados por la gestión forestal en la morfología y el desarrollo de las plantas repercutirán en una mayor o menor provisión de agua.

Realizar una caracterización de la zona de estudio y una primera caracterización ecohidrológica del itinerario habitual con los datos de la parcela experimental, fue el punto de partida para determinar una propuesta de mejora. Asimismo, las variables ecohidrológicas y ecofisiológicas medidas posibilitaron la calibración, validación y simulación del modelo BIOME-BGC_MuSo .

Además del ciclo del agua, el BIOME-BGC_MuSo cuantifica otros procesos. Teniendo en cuenta que la silvicultura multifuncional es un enclave hoy en día en la gestión de las masas arboladas, cuantificar el carbono supondrá incluir también PSA por este. En definitiva, la provisión de agua, el carbono fijado y el carbono extraído (considerado como venta de madera) serán los SE potenciados por la ecohidrología forestal en la cuenca piloto.

No obstante, para identificar qué actuaciones de la gestión forestal influyen en esos SE, es necesario tener diferentes itinerarios de gestión para establecer comparaciones. Por ello, la propuesta de dos itinerarios diferentes (Alternativa 1 y 2), constituyó la base de la elección de una propuesta de mejora al itinerario silvícola actual.

De esa comparación, la densidad (pies/ha) es una de las variables que más influye en la cantidad de esos SE. Existen dos respuestas según si se actúa sobre la Ni o sobre la N a lo largo del turno:

- Cambios en la Ni: la cantidad de pies/ha es directamente proporcional a la interceptación, por lo que un aumento en la Ni supondrá mayor agua interceptada, lo que se traduce en menor cantidad de agua que podrá llegar al suelo para infiltrarse o para llegar hasta el acuífero por escorrentía, es decir, en menor provisión de agua.
- Cambios en la N con claras y clareos: disminuir la cantidad de pies/ha con la gestión forestal genera una menor competencia entre pies, lo que se traduce en un aumento de la vitalidad y vigor del arbolado y, por ende, un aumento del diámetro de la copa y del tallo. Además, en términos de carbono, el aumento del vigor y la vitalidad supone una mayor fijación de C y mayor cantidad de biomasa a extraer a final de turno.

Otro aspecto importante, principalmente en el carbono, es el turno. Se puede comprobar que la Alternativa 1 (turno de 32 años) supone una reducción significativa del PNE y de la extracción de biomasa, lo que generará un menor beneficio de €/ha a lo largo del turno. Esto se debe a que, desde la última clara hasta la corta final, la cantidad de C fijado y extraído aumenta exponencialmente, por lo que realizar corta final antes es cortar ese crecimiento exponencial.

Por todos los aspectos mencionados previamente, la Alternativa 2 fue la opción elegida generando un 4% más de beneficios que el itinerario actual. Esto evidencia que la aplicación de la ecohidrología forestal potenciará los bienes y servicios de los bosques y con ello su multifuncionalidad.

En conclusión, aplicar la ecohidrología forestal en los montes repercutirá en un aumento de los SE ofrecidos, no solo del agua, aunque sea el centro de gestión, sino también de otros aspectos como la fijación del carbono y la cantidad de madera para la venta. Esto, unido al establecimiento de PSA supone un nuevo reenfoque de la silvicultura para generar más beneficios económicos para los propietarios, y por consiguiente ventajas ambientales y sociales para la sociedad. No obstante, se debe tener en cuenta que en la realidad la cuenca hidrológica comprende masas mixtas con edades distintas y diferentes usos del suelo, que tendrán una influencia directa en todas las variables medidas. Por lo tanto, el reto principal de la ecohidrología es ampliar la escala pensando en que la cuenca es un gradiente de componentes del paisaje con efectos acumulativos (Sivapalan, 2005).

10. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología- AEMET. (2018). *Diccionario ilustrado de meteorología Humedad relativa*. Recuperado en junio de 2021, de https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/485_humedad-relativa
- Agencia Vasca del Agua (URA). (2010). *Actualización de la evaluación de recursos hídricos de la CAPV 2010*. Gobierno Vasco.
- Agencia Vasca del Agua- URA. (2003). *Estudio de evaluación de los recursos hídricos totales en el ámbito de la CAPV*. Gobierno Vasco.
- Agencia Vasca del Agua- URA. (septiembre de 2015). *Propuesta de proyecto de la demarcación hidrográfica del Cantábrico Oriental*. Recuperado en junio de 2021, de https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/documentacion_plan_2015_2021/es_def/adjuntos/20151214/01_MEMORIA%20Cantabrico%20Oriental.pdf
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D. Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
- Anbiotek. (2009). *El medio acuático en Bizkaia*. Erandio.
- Agencia Estatal de Meteorología- AEMET. (2018). *Diccionario ilustrado de meteorología Humedad relativa*. Recuperado en junio de 2021, de https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/485_humedad-relativa
- Agencia Vasca del Agua-URA. (2010). *Actualización de la evaluación de recursos hídricos de la CAPV 2010*. Intecsa-Inarsa. Recuperado en junio de 2021, de https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/documentacion/2014_recursos_capv/es_def/adjuntos/MEMORIA_ACTUALIZACION_EVALUACION_DE_RECURSOS_HIDRICOS_DE_LA_CAPV_2010.pdf
- Agencia Vasca del Agua-URA. (2003). *Estudio de evaluación de los recursos hídricos totales en el ámbito de la CAPV*. Intecsa-Inarsa. Recuperado en junio de 2021, de https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/documentacion/evaluacion_recursos_hidricos/es_rh/adjuntos/memoria.pdf
- Agencia Vasca del Agua- URA. (2015). *Plan hidrológico. Revisión 2015-2021. Parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental*. URA. Recuperado en junio de 2021, de https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/documentacion_plan_2015_2021/es_def/adjuntos/20151214/01_MEMORIA%20Cantabrico%20Oriental.pdf
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos*. FAO. Roma. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Anbiotek. (2009). *El medio acuático en Bizkaia. Resumen*. Erandio. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.bizkaia.eus/home2/Archivos/DPTO9/Temas/Pdf/Resumen%20%20de%20a%20Monografia%20del%20Medio%20acuático%20en%20bizkaia.pdf?hash=8d0ff1fb094794fe906c30368fe8ff6a>
- BIOME-BGC_Muso. (2 de febrero de 2021). *Biogeochemical model*. Széchenyi. Recuperado en junio de 2021, de <http://nimbus.elte.hu/bbgc/index.html>

- Bioagro. (13 de abril de 2020). *DPV- Déficit de Presión de Vapor*. Recuperado en junio de 2021, de <https://brioagro.es/dpv-deficit-de-presion-de-vapor/>
- Calvo, M., Silva-Pando, F., Rozados, M., Blanco, M., Rodríguez, P., Duo, I. (2005). *El índice de área foliar (LAI) en masas de abedul (Betula celtiberica ROTHM. ET VASC. en Galicia*. Departamento de Ecología CIFA. Apartado 127. Pontevedra.
- Campbell Scientific. (15 de noviembre de 2017). Producto CR1000X. Datalogger para medida y control. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.campbellsci.es/cr1000x>
- Chandler, D., Seyfried, M., Murdock, M., McNamara, J. (2004). *Field Calibration of Water Content Reflectometers*. Soil Science Society of American Journal, 1.
- Chenost, C., Gardette, Y.-M., Demenois, J., Grondard, N., & Perrier, M. (s.f.). Los mercados de carbono forestal. Recuperado en junio de 2021, de <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.1501>
- Hamilton, L., Dudley, N., Greminger, G., Hassan, H., Lamb, D., Stolon, S., Tognetti, S. (2009). *Los Bosques y el Agua*. FAO. Roma. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.fao.org/3/i0410s/i0410s01.pdf>
- Del Palacio, F.; Martín, F., Hernández, Á., Rojo, L. (2018). *Inventario Nacional Erosión Suelos- Biskaia*. País Vasco. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid
- Edeso, J. M. (2020). *El relieve en el País Vasco*. Instituto Geográfico Vasco. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.ingeba.org/liburua/cursosup/edeso/csgedeso.htm>
- Euskalmet (s.f.). *El clima en Euskadi*. Agencia Vasca de Meteorología. Última revisión: 15 de julio de 2021. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.euskalmet.euskadi.eus/clima/euskadi/>
- GeoEuskadi. (s.f.). *Visor de geoEuskadi*. Gobierno Vasco. Última revisión: 24 de junio del 2020. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.geo.euskadi.eus/geoestudioa/apps/MapSeries/index.html?appid=006cddb30ee44c76a41a0ebd952d560e>
- FAO. (s.f.). *Glosario de términos sobre humedad del suelo*. Última revisión: 10 de julio de 2020. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm>
- García, F. (2021). *El agua en las plantas. Absorción y transporte de elementos minerales*. Escuela Técnica Superior del Medio Rural y Enología. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas%20PDF/Tema%2012%20Transporte%20en%20el%20xilema.pdf>
- Gil-Marín, J. A., Rodríguez, R., Jasso-Cantú, D., Zermeno, A. (2006). *Resistencia estomática, transpiración y potencial hídrico en sábila con diferentes condiciones ambientales*. Terra Latinoamérica. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. 355-365. Chapingo. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311103007.pdf>
- Gil-Pelegrín, E., Aranda, I., Peguero-Pina, Vilagrosa, A. (2005). *El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal*. Unidad de recursos forestales. Zaragoza.

- Gobierno Vasco. (16 de Febrero de 2020). *Mapa Forestal CAE 2020*. Datos de Biskaiia. Recuperado en junio de 2021, de https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/mapa_forestal_2020/es_agripes/adjuntos/BIZKAI2020.pdf
- Groome, H. (1987). *Situación actual y perspectivas futuras del sector forestal de la Comunidad Autónoma Vasca*. Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur10/10groome/10groome.htm>
- Hamilton, L. (2009). *Los bosques y el agua*. FAO. Roma
- Herrero, A., Zavala, M. (2015). Los bosques y la biodiversidad frente al Cambio. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. Recuperado en junio de 2021, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/informeCompletoconentradilla2_tcm30-70199.pdf
- Holbrook, N. (1995). *Stem water storage*. Chapter 7. In *Plant stems. Physiology and functional morphology*. San Diego.
- Hydi, D., Barcza, Z., Hollós, R., Thornton, P. E., Running, S., Fodor, N. (2021). *User's Guide for Biome_BGCMuSo 6.1*. Budapest. Recuperado en junio de 2021, de http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGC_MuSo_v6.1.pdf
- Instituto de Recursos Naturales y agrobiología de Sevilla. (9 de julio de 2021). *Ecofisiología: medidas ofertadas*. Gobierno de España. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.irnas.csic.es/ecofisiologia-medidas-ofertadas/>
- Instituto Vasco de Estadística. (4 de Enero de 2018). *Precios de los productos forestales percibidos por el sector forestal de la C.A. de Euskadi. Septiembre 2017*. Recuperado en junio de 2021, de https://www.eustat.eus/elementos/ele0012200/precios-de-los-productos-forestales-percibidos-por-el-sector-forestal-de-la-ca-de-euskadi/tbl0012262_c.html
- Ramos, L., Moreno, M. F., Roldán, J., Cienfuegos, Hevia, I. (s.f.). *Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica de "El Cabril"*. Córdoba. Universidad de Córdoba. Córdoba. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p498.pdf>
- Martínez, R. M., Tuya, L. C., Martínez, M., Pérez, A., Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. La Habana. Recuperado en junio de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017
- Mendikat. (s.f.). Arrikurutz. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.mendikat.net/com/mount/5303>
- Min, Y., Zengyuan, L., Xin, T., Li, Z., Yu, Z. (2019). *Improved simulation of carbon and water fluxes by assimilating multi-layer soil temperature and moisture into process-based biogeochemical model*. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences. Beijing. Recuperado en junio de 2021, de <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-019-0171-5>

- Ministerio para la Transacción Ecológica y Reto Demográfico. (s.f.). *Cambio climático: Sumideros de carbono*. Recuperado en junio de 2021, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mecanismos-de-flexibilidad-y-sumideros/sumideros_tcm30-178384.pdf
- Montero, G. (2018). *Breve Descripción del Proceso Repoblador en España (1940-1995)*. Celulosa y Cartón. Recuperado en junio de 2021, de <https://distritoforestal.es/historia-forestal/breve-resumen-del-proceso-repoblador-en-espana>.
- Onwuka, B. M. (2018). *Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth*. *Adv Plants Agric Res*. 2018;8(1):34-37. Recuperado en junio de 2021, de <https://medcraveonline.com/APAR/effects-of-soil-temperature-on-some-soil-properties-and-plant-growth.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- Penman, J., Gytarsky, M., Hirashi, T., Krug, T., & Kruger, D. (2008). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/spanish/full.pdf>
- Peralta, O. (2019). *Infiltración.III.3.1. Definición*. Recuperado en junio de 2021, de <https://silo.tips/download/iii3-infiltracion-iii31-definicion>
- Portal Frutícola. (4 de Marzo de 2016). *Los estomas y la transpiración de las plantas*. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/03/04/los-estomas-y-la-transpiracion-en-las-plantas/>
- Pulido-Velázquez, M. (2013). *Design of efficient water pricing policies integrating basinwide resource opportunity costs*. *Journal of Water Resources Planning and Management*,139(5), 583-592.
- Rivas-Martinez, S. (1983). *Pisos bioclimáticos de España*. Lazaroa
- Rodríguez, N. (2013). *Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación*. CAR- Corporación autónoma regional de Cundinamarca. Bogotá. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade19e5bcb8e.pdf>
- Rodríguez, M. (2006). *El Pino radiata en la historia forestal vasca. Análisis de un Proceso de Forestalismo Intensivo*. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Munibe. Donostia. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.aranzadi.eus/fileadmin/docs/Munibe/2006001247.pdf>
- Savé, R., Biel, F (2005). *Aproximación al ciclo del agua en ecosistemas forestales*. *Invest Agrar*, 1-16. Vol. 14, Nº 3, 2005, págs. 497-512
- Segerer, C. (2006). *Hidrología I*. Universidad del Cuyo, Facultad de Ingeniería Civil. Mendoza

- Sivapalan, M. (2005). *Pattern, Process and function: Elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale*. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Recuperado en junio de 2021, de <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa012>
- Southern Mulch. (s.f.). What is Clay Loam. Recuperado en junio de 2021, de <http://www.southernmulch.com/article-what-is-clay-loam.php>
- Timberpolis . (s.f.). *Calculadora de madera de volúmen a peso*. Recuperado en junio de 2021, de <https://www.timberpolis.es/calc-timber-weight.php#goToPage>
- Weather Spark . (s.f.). Clima en Berriatúa. Recuperado en junio de 2021, de <https://es.weatherspark.com/y/39043/Clima-promedio-en-Berriat%C3%BAa-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Xiang, L., Qingfu, X., Jianzhi, N., Salli, D., McPherson, E. (2017). *Rainfall interception by tree crown and leaf litter: An interactive process*. Hydrological Processes. Hydrological Processes Volume 31, Issue 20. Recuperado en junio de 2021, de <https://doi.org/10.1002/hyp.11275>
- Zalewski, M. (2010). *Ecohydrology for compensation of Global Change*. International Institute of the Polish Academy of Sciences, European Regional Centre for Ecohydrology under the auspices of UNESCO. Lodz.