

LIFE17 CCA/ES/000063

Deliverable 25

Technical Guide

Action E1. Communication and dissemination of results

17/03/2023



LIFE RESILIENT FORESTS “Coupling water, fire and climate resilience with biomass production in Forestry to adapt watersheds to climate change”

Executive Summary

The eco-hydrological forest management approach is part of the CAFE concept, which is not just the application of the CAFE DSS to quantify and optimize multiple objectives. If not, it intends to be established as a methodology for prioritization and promotion of multi-objective forest management that goes far beyond the use of this tool. The basis of this methodology is to achieve sustainable management of forest ecosystems by promoting multifunctional management of forests. To achieve this task, it is necessary to know that it is an eco-hydrological management, to have the area of interest well evaluated, to involve the actors of the territory, to define the necessary action plan and to quantify-optimize the multiple goods and services. As you can see, the last step is the one encompassed by the CAFE tool. But to make a correct application it is essential and necessary to dedicate the necessary time and effort, in order to obtain the best results. Therefore, this manual will give the main guidelines to apply this methodology and to be able to carry it out by any user and in any location. Thus, as professional recommendations to refine and understand what is happening in the ecosystem that is intended to be managed.

Name of the Deliverable	Number of associated action	Deadline
Technical Guide	E1	12/2021

Deliverable number: 25

Beneficiary responsible: UPV

Action: E1. *Action E1. Communication and dissemination of results* (From month 1 – month 54)



Gestión Forestal Eco-Hidrológica (Enfoque Multifuncional CAFE)

Guía Técnica

LIFE RESILIENT FORESTS

LIFE 17 CCA/ES/000063



Contenido

0. Introducción	2
1. Gestión forestal eco-hidrológica	2
2. Vocación y potencial del territorio a gestionar	5
2.1. Vocación CAFE	5
2.1.1. Componente Carbono:	9
2.1.2. Componente Agua:	10
2.1.3. Componente Fuego:	13
2.1.4. Componente Eco-Resiliencia:	15
2.2. Potencialidad CAFE	18
2.2.1. Procesos eco-hidrológicos	18
2.2.2. Variables responsables de los procesos	20
2.2.3. Asignación de pesos (método AHP)	22
2.2.4. Mapear potencialidad	24
2.2.5 Escenario de cambio climático	24
3. Desarrollo del plan de gestión multifuncional	25
4. Simulación eco-hidrológica	26
4.1. Modelos Basados en Procesos	26
4.2. Bases de datos globales	28
4.3. Parcelas experimentales	6
5. Optimización multiobjetivo DSS CAFE	8
6. Aplicación	9
7. Referencias	10

0. Introducción

El enfoque de gestión forestal eco-hidrológica se enmarca en el concepto CAFE, el cual no es solo la aplicación de la DSS CAFE para cuantificar y optimizar múltiples objetivos. Si no, que pretende ser establecida como una metodología de priorización y fomento de la gestión forestal multiobjetivo que va mucho más allá de el empleo de esta herramienta. La base que plantea esta metodología es conseguir una gestión sostenible de los ecosistemas forestales fomentando una gestión multifuncional de los bosques. Para lograr este cometido, se debe saber que es una gestión eco-hidrológica, tener bien evaluado el área de interés, implicar a los actores del territorio, definir el plan de acción necesario y cuantificar-optimizar los múltiples bienes y servicios. Como se puede ver, el último paso es el que engloba la herramienta CAFE. Pero para hacer una aplicación correcta es fundamental y necesario dedicarle es tiempo y esfuerzo necesario, para poder obtener los mejores resultados. Por tanto, este manual dará las directrices principales para aplicar esta metodología y poder llevarla a cabo por cualquier usuario y en cualquier ubicación. Así, como recomendaciones profesionales para afinar y comprender que esta ocurriendo en el ecosistema que se pretenda gestionar. Para comprender mejor este flujo de trabajo se puede visualizar el siguiente diagrama de flujo (Fig. 1) para comprender las partes que contendrá este documento.

Gestión Forestal Eco-Hidrológica (Enfoque Multifuncional CAFE)

Parcelas Experimentales		Enfoque CAFE (Carbono, Agua, Fuego, Eco- resiliencia)
Gestión forestal Eco-Hidrológica	Cuantificar Servicios Ecosistémicos (SE)	
Modelos de simulación		
Mapeo de Stakeholders		
Vocación CAFE del territorio	Indicadores: subsistemas ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico)	Determinar objetivo de gestión CAFE
Mapa de Potencialidad	Identificar Procesos Eco-Hidrológicos Determinar variables (Suelo-Planta-Atmósfera) implicadas Asignación de Pesos (método AHP) Mapear calculo aritmético (variables y pesos)	Obtener zonas preferenciales de actuación.
Desarrollar Plan de Gestión	Revisar normativa Documentos técnicos (PORF, Proyecto de Ordenación, Planes técnicos...) Inventarios de apoyo Acordar acciones posibles	Definir actuaciones selvícolas.
Adicionalidad de la Gestión	Aplicación DSS CAFE	Cuantificar incremento de SE

Figura 1. Etapas para lograr una gestión forestal ecohidrológica (Fte.: Elaboración propia).

1. Gestión forestal eco-hidrológica

Antes de empezar a explicar las directrices de la gestión eco-hidrológica, hay que saber que significa esta palabra, **“Eco-hidrología”**, ¿De qué trata?, ¿Qué es? Es una materia que aúna las disciplinas de la hidrología y la ecología. Inicialmente, tuvo mayor desarrollo en el estudio de los medios acuáticos, pero hoy en día se ha asimilado en el campo de la ecología terrestre dada su potencialidad. Normalmente, parte de la hidrología llega a la ecología y ello permite entender aspectos funcionales muy importantes de los sistemas forestales desde la perspectiva del agua, un recurso cada

vez más escaso y expuesto por el cambio climático. Y desde el cual, se puede llegar a todos los demás intereses (producción de bienes o servicios) y peligros (Riesgo de incendios, enfermedades, decaimiento) que los ecosistemas forestales pueden tener.

Otra definición que hay que tener en cuenta es “**Selvicultura**”, que trata de un conjunto de técnicas que tratan de la conservación, mejora, aprovechamiento y regeneración o, en su caso, restauración, de las masas forestales. La primera selvicultura “tradicional”, se originó como ciencia en el siglo XVII en centro Europa, donde su vocación era claramente producir madera y el factor limitante que se debía regular es la luz. Esta gestión forestal es la que hoy se conoce como de selvicultura de producción, que enfoca la gestión de las masas hacia la regulación de la fotosíntesis para generar producción primaria neta (biomasa o madera), en aquel momento se le centró poca atención al agua. Sin embargo, hoy día también se trabaja el consumo de agua, lo que hoy es más conocido como el uso eficiente del agua, cuanto carbono fijo por unidad de agua que empleo. Actualmente, hay una gran variedad de selviculturas y todas ellas tienen un vínculo con agua: 1) Selvicultura de Producción de agua, quizás menos conocida en nuestro continente, pero muy trabajada por los americanos desde los años 60, la cual se centra en el reparto del agua que se produce en los bosques, una primera parte que se consume por la propia masa (agua verde) y otra parte excedente (agua azul). 2) Selvicultura de protección del suelo, relacionada con los trabajos de restauración hidrológico forestal, los cuales se centraban en la parte alta de la cuenca y pretendían evitar erosión y que el agua que llegara a los cauces y posteriormente a los embalses agua abajo. 3) Selvicultura de prevención de incendios, gestión enfocada a reducir los riesgos de incendios de los bosques, modificando el tipo de combustible, comportamiento, combustible, hidratación, no solo extinción. 4) Selvicultura adaptativa al cambio climático, pretende solucionar el problema que tendrán las masas con la reducción del aporte hídrico que será el factor limitante y decisivo con el cambio climático, porque la subida de temperatura no será tan decisiva. La intención de esta gestión es reducir el estrés hídrico de las masas y las opciones de acción que se presentan son estrategias que se basan en la cantidad de agua que se tenga para el bosque: resistencia (“Mantener” ej: bosques boreales que pueden aguantar), de resiliencia (ayudar a las especies existentes) y Transición (Proponer cambios de especies principal).

Se puede observar que todos estos tipos de selviculturas tienen en común el agua como elemento de clave, el cual es fundamental y se encarga de modular los procesos ecosistémicos de primer orden que sustentan a los ecosistemas forestales, tales como los hidrológicos, climáticos, edáficos, antropogénicos, producción primaria y perturbaciones. Por lo tanto, la **selvicultura eco-hidrológica** pretende unificar todas estas variantes por medio de la gestión del elemento clave “El agua”, cuya gestión permite modular en los ecosistemas y para poder realizarla de forma correcta hay que cuantificarla. De este modo, se puede pasar a obtener los demás servicios ecosistémicos y ponerles número o valor. Además de ver como la gestión forestal puede potenciarlos y fomentarlos por medio de diseños de tratamientos selvícolas.

La selvicultura Eco-Hidrológica pone el agua en el centro, para lograr que aspectos como la transpiración, el uso de agua por los árboles, la infiltración, la recarga de acuíferos, la calidad y la cantidad de agua y muchas otras medidas pueden ser abordados explícitamente en la gestión forestal. Todos estos procesos que tienen que ver con el agua del sistema, retroalimentan a su vez a otros procesos que ocurren en los bosques, como es el crecimiento de biomasa, el riesgo de incendio (hidratación del

suelo-vegetación o de los combustibles), resiliencia climática o efecto cooling entre otros (Del Campo et al., 2017).

Es por esto, que la gestión forestal eco-hidrológica tiene claro el papel de la cuantificación del agua en el sistema y del resto de servicios ecosistémicos, los cuales pueden considerarse como los objetivos de gestión. Siendo agrupados todos ellos en 4 grupos y que dan nombre al concepto **“CAFE” (Carbono, Agua, Fuego y Eco-Resiliencia)** (Fig. 2). Este enfoque pretende saber por medio de la gestión forestal como es el cambio de reparto del agua en el sistema. Esta técnica pretende determinar turnos y densidades óptimas basados en la disponibilidad del agua para la masa residual de árboles que se quedan en el sistema y, por tanto, producir agua verde para hidratar a las masas y hacerlas más resilientes al cambio climático, hidratar el combustible y reducir el riesgo de incendio o incrementar el secuestro de carbono. O para producir agua azul en la cuenca y que sea disponible para llevarlas a los embalses y poder usarla el ser humano. Esto depende de las condiciones, criterios y los valores hídricos de la zona donde se lleve a cabo y con el objetivo principal o compuesto que se pretenda alcanzar con la silvicultura Eco-Hidrológica.

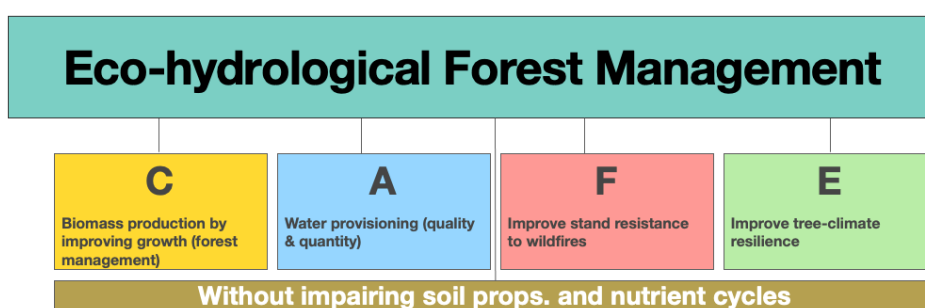


Figura 2. Servicios ecosistémicos (SE) relacionados con el Carbono, el Agua, el Fuego y la Eco-resiliencia a sequías extremas derivados de la gestión forestal eco-hidrológica (Fte.: Elaboración propia).

La Eco-Hidrológica nos obliga a cuantificar los procesos relacionados con el agua, la dinámica de la vegetación y el ciclo de carbono y sus mutuas interacciones. Esta es la equivalencia al seguimiento dasométricos de una masa forestal desde su diseminado hasta fustal, con cifras relativas a su ciclo hidrológico: agua que usa, que transpira, que infiltra, contribución al caudal de estiaje de un río o recarga de acuífero, todo esto con un seguimiento periódico que refleje su variabilidad espacio-temporal y tener registrada la gestión forestal para ver como modifica cada una de estas mediciones Del Campo et al., 2019).

La gestión forestal debe tener en cuenta lo que la sociedad les demanda a los bosques para poder satisfacer las necesidades, siempre desde un enfoque sostenible y que otorgue resiliencia a los sistemas naturales. Es por eso, que el papel de los bosques no es meramente producir madera o biomasa y la producción de productos tradicionales, como en otros momentos de nuestra historia. Además, no hay que perder de vista a los peligros a los que se enfrentan, los cuales también se ven agravados por las influencias del cambio climático. Tener esta perspectiva de los bosques es quedarse a medio a gas y por lo que la gestión forestal cuesta tanto ejecutarse en muchos lugares. Hay que conseguir que se vea que la gestión forestal tiene un papel mucho más vital y necesaria para la sociedad moderna, como es: 1) el aprovisionamiento de agua, en una época en la que las sequías son mucho más intensas y frecuentes, siendo más y más común que los embalses de muchas partes del mundo estén en sus niveles más bajos de la historia. 2) reducción de riesgo de incendios, evitando que multitud de personas que viven en la

interfaz urbano-forestal de las ciudades del mediterráneo se vean directamente afectadas y en peligro de muerte, además de otras muchas personas que destinan sus trabajos a estas áreas agro-forestales que tardan mucho tiempo en recuperar su estado actual. 3) el secuestro de carbono, haciendo que los bosques capten CO₂ y ayuden a apalear o mitigar los efectos del cambio climático y de este modo reducir los gases de efectos invernadero que harán que muchas especies se vean drásticamente afectas. 4) la resiliencia climática, haciendo que los bosques sean más fuertes a los cambios y garantizando su perduración en el tiempo para generaciones futuras. 5) Paisaje o biodiversidad, que permita degustarnos la vistas y los sentidos cuando cada vez se fomenta más las actividades recreativas en los espacios naturales. 6) Recursos directos, madera o corcho cada vez más empleada en la construcción; miel o piñones, para repostería; aromáticas, para inciensos o perfumes; pastos o bellotas, para el ganado. Y a todo esto se le suma un largo etcétera que hace que los bosques sea una gran fuente de bienes y recursos. Pero para que todo esto tenga más valor, hay que sacarlo del cajón de lo intangible y cuantificarlo, optimizarlo y gestionarlo. Del mismo modo que se ha hecho tradicionalmente con la biomasa o la producción de madera, donde se sabe claramente que gestión es la más apropiada para generar más de este recurso según el sitio donde se quiera llevar a cabo.

Por tanto, a esta nueva era a la que se enfrentan los bosques de peligros, se le suma la necesidad cuantificar que cantidad de bienes y servicios generan los ecosistemas forestales y de comprender cómo la gestión forestal modifica cada uno ellos. Del mismo modo, que cada vez se tiene más claro que los bosques tienen un papel fundamentalmente multifuncional, hay también la responsabilidad de aplicar una gestión forestal multiobjetivo para fomentar los múltiples bienes y servicios que se están generando y si no es así, cuantificarlos todos para saber como se afectan cuando se prioriza uno frente a otros. Ya que muchos de estos objetivos entran en conflictos unos frente otro al ser contrapuestos y hay que buscar una relación de compromiso. Es aquí, donde el papel de la herramienta DSS CAFE, arroja un poco de luz en la complicada tarea de asignar actuaciones forestales para optimizar múltiples servicios ecosistémicos. Además, de cuantificar los valores iniciales. Pero dado que cada bosque es muy variado y las necesidades de gestión a las que quiere dar respuesta son muy distintas, la herramienta CAFE es muy polivalente y ajustable, el usuario debe tener una idea muy amplia y clara del terreno donde quiera llevar a cabo esta metodología.

2. Vocación y potencial del territorio a gestionar

Dado que los sistemas forestales son complejos, se necesita de la metodología de gestión forestal eco-hidrológica para conocer estas dinámicas naturales y la relación que tienen entre sí todos los servicios ecosistémicos, a la vez de tenerlos cuantificados. Además, estos sistemas tienen una gran variabilidad y cada territorio por sus condiciones de sitio puede tener una orientación y margen de mejora más fuerte de un servicio ecosistémico frente a otro. Es por este motivo, que la gestión puede derivarse según el tipo de grupo CAFE al que pertenezca. Para hacer esto de la forma correcta, en este manual se aconseja a los gestores que caractericen bien el medio socio-ecológico donde se quiere llevar a cabo.

2.1. Vocación CAFE

Previamente a la planificar la gestión que un territorio y, por tanto, la cuantificación y optimización de los bienes y servicios que se deriven de ella. Hay que conocer bien la zona de estudio donde se quiere llevar a cabo esta acción. Ya que, no todos los sitios son iguales y tienen las mismas capacidades para producir un recurso u otro. Por este

motivo, es necesario hacer una buena evaluación del territorio y saber la línea base de la que se parte y como está enmarcada en una escala mayor del territorio, cada uno de los servicios ecosistémicos. De este modo, se puede saber si el valor desde el que parte es alto o bajo y si tiene margen de mejora. Este primer paso es lo que se conoce como **“La Vocación del Territorio”**. Para valorar esta vocación, se utiliza la actitud del territorio a producir cada uno de los 4 grupos CAFE: Carbono, Agua, Fuego o Eco-resiliencia (adaptación al cambio climático), por medio de la silvicultura eco-hidrológica. Para evaluar la aptitud que prioriza, hay que generar un diagnostico del territorio que se agrupa en los siguientes subsistemas del mismo: **A**tmósfera, **S**uelo, **P**lanta, **H**idrológico y socio-**E**conómico (**ASPHE**). Esta es la forma mínima en la que se puede representar y analizar todo el ecosistema. Dentro de cada uno de los grupos existen diversas variables que sintetizan y comprenden el ecosistema. En la siguiente tabla (Tabla 1) se pueden ver algunos ejemplos de que variables sería las que estarían incluidas dentro de cada grupo.

Tabla 1. Integración de variables en subsistemas ASPHE.

Subsistema	Variables
Atmósfera	Meteorología Índices fitoclimáticos Índices de aridez RCP
Suelo	Geología-litología Fisiografía Taxonomía Textura
Planta	Vegetación Biodiversidad Estado fitosanitario Perturbaciones Dasometría Gestión
Hidrología	Morfología de la cuenca Agua superficial Agua subterránea Calidad del agua
socio-Económico	Población Política Figuras de protección Valor paisajístico

Es necesaria para la evaluación de la vocación de cada componente CAFE, diferentes indicadores que conformen cada uno de los subsistemas. La selección de estos indicadores es un criterio abierto y crítico que cada gestor puede ajustar o modificar. Incluyendo más o menos para hacerlo tan complejo como pueda determinar. En este manual, se darán una lista de algunos de ellos, pero se aconseja ajustarlo localmente en un proceso de co-creación, por medio de un criterio llamado “**Living Lab**”.

Donde se habla con distintos actores implicados en el territorio “**Stakeholders**” y de forma consensuada, entre todos seleccionar los indicadores pertinentes, así como la determinación de sus pesos y umbrales por medio de

Living Lab: es un entorno de experimentación donde los usuarios pueden co-crear innovaciones. “Laboratorio viviente” es un concepto que se define como ecosistema de innovación abierta.

La Comisión Europea caracteriza los Living-Labs como Alianzas Público-Privado-Personas (PPP) para la innovación abierta impulsada por los usuarios. Los Living-Lab se basan en cuatro actividades principales:

- Co-creación: co-diseño de los usuarios y de los productores.
- Exploración: el descubrimiento de los usos emergentes, los comportamientos y las oportunidades del mercado.
- Experimentación: la implementación de escenarios “en vivo” dentro de las comunidades de usuarios.
- Evaluación: evaluación de conceptos, productos y servicios de acuerdo a criterios socio-ergonómicos, socio-cognitivos y socio-económicos.

funciones genéricas del tipo a), b) o c) (Fig. 3), que las establezcan de 0 a 1 para finalmente obtener el valor medio en cada subsistema ASPHE y global.

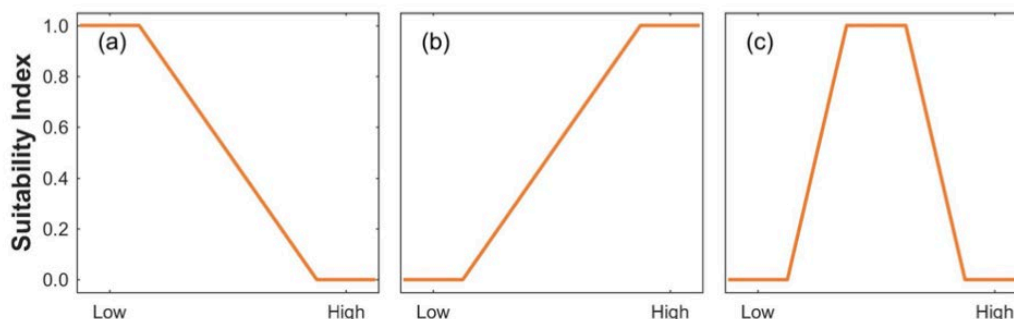


Figura 31. Funciones genéricas para obtener el índice de adecuación de los distintos indicadores (Fte.: Elaboración propia).

Para la selección de los actores implicados hay todo un proceso que selecciona y prioriza a los participantes que se van a involucrar dentro del Living Lab.

Stakeholders (SH): Concepto creado en la década de 1980 por el filósofo estadounidense Robert Edward Freeman. Hace referencia a cualquier individuo u organización que, de alguna manera, es impactado por las acciones de determinada empresa. En una traducción libre para el español, significa "partes interesadas".

Freeman sostenía que los grupos de interés son indispensables y que siempre se deberían tener en cuenta para la planificación estratégica de cualquier negocio.

De esta manera, entender que el triunfo o fracaso de cualquier empresa, siempre afectará no solo a sus dueños, sino que también afectará a todos los que la rodean. Es decir, a sus trabajadores, a sus socios, proveedores, competidores, familias de todos los involucrados y por supuesto a sus clientes.

El Análisis de Stakeholders (ASH) es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones muy utilizada, la cual contempla la identificación, la determinación de los intereses, el poder, la influencia y la forma de documentar e informar sobre los resultados. En el ASH, se identifica a los individuos o grupos de individuos que se ven afectados directa o indirectamente por un proyecto u organización, tienen interés o pueden afectar a una decisión, y se analizan sistemáticamente sus funciones, relaciones y/o intereses.

Mapeo de SH: consta de 3 fases.

- **Identificación:** enumeración de los posibles interesados y tener en cuenta, que funciones específicas deben desempeñar durante su participación. Además, deberían clasificarse según las 4 dimensiones del sistema de innovación de cuádruple hélice: **Gobierno, Ciudadanos, Academia e Industria** y debe garantizarse una representatividad equilibrada de cada dimensión.

- **Análisis:** evaluación de los posibles interesados y tener en cuenta que pueden tener niveles completamente diferentes de interés e influencia en el proyecto. Por tanto, se deben evaluar los siguientes criterios.

I. **Capacidad:** Evaluar la capacidad de recursos de cada parte interesada teniendo en cuenta sus conocimientos, experiencia y capacidades técnicas.

II. **Disposición:** Evaluar la disponibilidad y voluntad de participación de las partes interesadas.

III. **Influencia:** Evaluar el número y la calidad de las conexiones de las partes interesadas, que pueden influir en todas las partes implicadas.

IV. **Necesidad:** Evaluar la necesidad de inclusión de las partes interesadas.

- **Priorización:** clasificación de los posibles interesados con el método AHP para su priorización según sus pesos. Los cuáles deberían estar entre 12-16 participantes que representen a los miembros de la cuádruple hélice y que serán los actores que participen en la formación de Living Lab.

A continuación, se mostrarán criterios relacionados con la orientación de la gestión que se pueda buscar en función del objetivo principal que se busque. Además de distintas tablas que enmarcan los indicadores o procesos del ecosistema que son propuesto en los distintos subsistemas ASPHE.

2.1.1. Componente Carbono:

Los SE relacionados con el carbono están relacionados directamente con la productividad primaria o calidad de estación. Por lo tanto, aquellas combinaciones de suelo, pendiente, régimen térmico y pluviométrico que favorecen la producción primaria tienen un peso determinante. Igualmente, es preciso considerar que esta orientación productivista puede suponer ciertos riesgos tales como:

- Escasez de agua, por alto consumo hídrico de la selvicultura intensiva
- Degradación de la calidad del agua, por i) una mayor concentración de sedimentos en suspensión por tránsito de vehículos y maquinaria dado el mayor número de intervenciones selvícolas; o por ii) contaminación resultante de aplicaciones de enmiendas o fertilizantes que puedan lixiviar y afectar fuentes de agua. En general, se asume que las cortas y aprovechamientos forestales suponen riesgos potenciales en la calidad de las aguas.
- Degradación del suelo por erosión o por compactación debida igualmente al tránsito de maquinaria, etc.
- En una selvicultura productiva son precisas ciertas simplificaciones del ecosistema a favor de la especie principal y la forma principal de masa, lo que podría llevar asociados ciertos compromisos en aspectos tales como la biodiversidad estructural y biológica del bosque o su impacto paisajístico, que podrían resultar menguados.

Otro aspecto de vital importancia a la hora de priorizar este componente es la adecuación previa de las masas existentes y, por tanto, la no necesidad de hacer transformaciones o conversiones de masa que supongan plazos excesivos. Finalmente es muy deseable su encaje (o estímulo) en las economías locales y los usos tradicionales del monte (biomasa, madera, etc.) y en las políticas sectoriales y los objetivos generales marcados en la Planificación Forestal del Territorio. Para objetivar SE relacionados con el componente Carbono en selvicultura eco-hidrológica se ha desarrollado la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico) para objetivar SE relacionados con el componente Carbono en selvicultura eco-hidrológica.

<i>Decisión que se quiere tomar: realizar una selvicultura para producir biomasa/madera/C</i>				
Subsistema	Factores relevantes	Función	Valor 0	Valor 1
A-1	Régimen pluviométrico (P anual)	B	450	800
A-2	Periodo vegetativo (grados día, Tb:5°C)	B (>1000)	1000	4500
A-3	Aridity Index (P/ET _o)	B	0.4	1
A-4	Productividad potencial forestal (m ³ /ha año) o B (>3.0) PPN		3	9
A-5	Int-Dur-Frec Sequías (SPI-IDF)	A	3	0
A-6	Cambio Productividad potencial forestal (fracción)	8.5 B (>0.9PPF)	0.5	0.9
S-1	Suma déficit hídrico suelo	B (Def)	-800	-100
S-2	SOC 0-10cm (%)	B (..)	0	5

S-3	Calidad de estación (site index, SFI, PISY)	B (I, II)	5	17.5
S-4	Clase textural 1-9	C (1-7-12)	12	7
S-5	Pendiente	A (<15%)	30	5
S-6	pH	C(4.5-6.5/7.5-9)	4.5	6.5
H-1	Equilibrio agua azul/verde (1-QJun/Qfeb)	A	1	0.2
H-2	Reserva hídrica media > 50%	B	50	80
H-3	Tendencia niveles piezométricos (%variación)	B	-20	20
H-4	NO3 (Calidad Química agua, ej uso potable)	A	50	0
H-5	Sólidos suspensión (Calidad física agua)	A	20	0
P-1	Existencias VCC IV IFN por ha de uso forestal	B (existente)	50	200
P-2	Importancia selvícola sp principal (productividad alta/mejorada genéticamente/con demanda industria/organización dasocrática/tablas prod./Itinerarios para las spp)	B (>2/3)	0	0.7
P-3	Perturbaciones abióticas (plagas, enfmds., abióticos:fuego, vto./nieve)	A (Bajo)	0	1
P-4	Decaimiento arbolado (tendencia índice multiespectrales)	B	-1	1
P-5	Índice de biodiversidad Margalef (afección x A (bajo simplificación ecosistema)		200	20
E-1	Medios técnicos disponibles (planific., gestión y aprovechamientos)	B (Medio- Bajo)	0	1
E-2	Calidad/fragilidad paisaje	A	1	0
E-3	Propensión población aprovechamientos forestales	B (Medio- Bajo)	0	1
E-4	Afección o estímulo economía/industria local (biomasa, madera, brigadas, etc.)	B (Medio- Alto)	0	1
E-5	Valor existencias en pie €/hectárea		1000	5000
E-6	Contexto jurídico y socioeconómico proclive aprovechamientos forestales (normativa, precio C, etc)	B (Medio- Alto)	0	1
E-7	Encaje en políticas sectoriales y objetivos generales marcados en la Planificación Forestal	B (Medio- Alto)	0	1

2.1.2. Componente Agua:

Respecto al Agua, los cambios de las relaciones bosque-agua con la gestión forestal dependen en gran medida del tipo de bosque, suelo/fisiografía, régimen dominante de precipitación y meteorología durante la lluvia. Tras una clara, la partición de la lluvia resultante será diferente según la estructura forestal específica que se trate y las características meteorológicas de la lluvia. Así, el aumento de la precipitación neta en una estructura forestal aclarada podría contrarrestarse con una mayor evaporación desde el suelo y/o menor precipitación bajo condiciones semiáridas, con lo que podría argumentarse en contra la efectividad del componente Agua en la silvicultura eco-

hidrológica. Con respecto a la redistribución del agua infiltrada, los procesos hidrológicos subterráneos (subsistema suelo) se relacionan también con la estructura forestal por su papel determinante en la dinámica de la ladera y la hidrología del suelo. La gestión forestal puede aumentar la humedad del suelo y la recarga del agua subterránea, pero esto depende mucho de la heterogeneidad subsuperficial y dinámica de flujo espacio-temporal (conectividad y patrones de flujo preferencial en laderas), que a su vez depende de las características de la lluvia, el estado de humedad del suelo antecedente, la hidrofobicidad, el tipo de suelo y el espesor y la topografía. La termicidad e irregularidad del clima (precipitaciones) son factores que no contribuyen a la efectividad en la producción de agua azul con la silvicultura. El subsistema hidrológico es también determinante, pues la capacidad de almacenamiento y dinámicas de los tanques subsuelo, cauces y embalses determina la mayor o menor necesidad de un suministro de agua azul proveniente de la silvicultura. Finalmente, el subsistema socioeconómico es también clave ya que debe existir una demanda ambiental, agrícola, urbana o industrial de agua para dar sentido a esta orientación Agua-producción.

Para objetivar SE relacionados con el componente Agua en silvicultura eco-hidrológica se han desarrollado en dos Tablas que muestran los umbrales de cada indicador o factor relevante de los cinco subsistemas fundamentales según se trate de producción de agua o protección del suelo.

Tabla 3. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico) para objetivar SE relacionados con el componente **Agua (producción)** en silvicultura ecohidrológica (CAFE).

*Decisión que se quiere tomar: realizar una silvicultura para producir **agua en cantidad***

Subsistema	Factores relevantes	Función	Valor 0	Valor 1
A-1	Régimen pluviométrico (P anual)	B	380	900
A-2	Densidad erosividad (R-factor/P)	A	2.5	1.2
A-3	Aridity Index (P/ET _o)	B	0.4	1
A-4	Estacionalidad periodo húmedo año (Po+Pi/P)	B	0.5	0.7
A-5	Periodo vegetativo (grados día)	A	4000	2000
S-1	% días SM>40% AD	B	0	67
S-2	Infiltrabilidad suelo (Kc sat)	B	10	60
S-3	Pendiente	A	30	10
S-4	Erodibilidad suelo (Factor K RUSLE)	A	0.041	0.03
S-5	Slope Length and Steepness factor (LS-factor)	A	7.5	0.1
H-1	Rango percentiles caudal medio (Q25/Q75)	B	1	5
H-2	Rango percentiles piezometría media (local o no) (Q25/Q75)	B	1	1.5
H-3	Rango percentiles agua embalsada media (Q25/Q75)	B	1	1.5
H-4	Impacto 1Hm3/año (equiv 1000Ha) sobre reserva anual	B	0	5

H-5	Vulnerabilidad calidad química aguas superficiales/subterráneas	A	1	0
P-1	Uso agua especies arbóreas principales (mm/día)	B	0.1	2.5
P-2	Interceptación especies arbóreas principales (%Pg)	B	10	25
P-3	Fracción cabida cubierta	B	50	85
P-4	Clases naturales de edad	C	0.0	1
P-5	Vulnerabilidad biodiversidad	A	1	0
E-1	Complejidad técnica ejecución (F. Ppal. Masa, irreg. à coetánea)	B	0	1
E-2	Mejora o estímulo de economía local (suministros públicos, riegos, concesiones regantes).	B	0.0	1
E-3	Encaje en políticas sectoriales y objetivos generales de Planificación Hidrológica y Forestal	B	0.0	1
E-4	Calidad/fragilidad paisaje	A	1	0

Tabla 4. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico) para objetivar SE relacionados con el componente **Agua (protección)** en silvicultura ecohidrológica (CAFE).

Decisión que se quiere tomar: realizar una silvicultura para producir agua en calidad y proteger el suelo

Subsistema	Factores relevantes	Función	Valor 0	Valor 1
A-1	Régimen pluviométrico (P anual efectiva)	C (0-300-750-->)	1500	750
A-2	P_max24_T100	B	60	160
A-3	Densidad erosividad (R-factor/P)	B (>1.6)	1.2	2.5
A-4	Aridity Index (P/ET _o)	A	0.65	0.2
A-5	Periodo vegetativo (grados día, T _b :5°C)	B (>2000)	4500	2000
A-6	Int-Dur-Frec Sequías (SPI-IDF)	B	0	3
S-1	Infiltrabilidad suelo (K _c sat)	A (C,D)	60	10
S-2	Rugosidad (pedregosidad, manning, despojos, agregados)	A	40	0
S-3	Erodibilidad suelo (Factor K RUSLE)	B (>0.3)	0.03	0.041
S-4	Slope Length and Steepness factor (LS-factor)	B	0.1	7.5
S-5	SOC 0-10cm	A	5	0
H-1	Escurrimiento media anual (mm) (Morgan, 1997)	C-B (0-80-500->)	80	500
H-2	Coef Escurrimiento Q/P	B	0.1	0.5

H-3	Sólidos suspensión física agua)	(Calidad B	(20 0	20
H-4	Densidad drenaje cuenca (m/m2)	B	0	0.05
H-5	NO3 (Calidad Química agua, ej uso potable)	B (50 ppm)	0	50
P-1	Fracción cabida cubierta arbolado	A (<75%)	85	30
P-2	Fracción cubierta suelo (total)	A (40-75%)	100	50
P-3	Forma principal de masa (irregular, regular, coetanea,...)	B	0	1
P-4	Presencia spp caducifolias, copa clara o crecimiento lento	B	0	1
P-5	Índice de biodiversidad (Margalef, afección x simplificación ecosistema)	A (bajo)	200	20
E-1	Afección erosión sistemas productivos (agricultura, ganadería, poblaciones, etc).	B (Medio-Alto)	0	1
E-2	Afección erosión infraestructuras hidráulicas (cuencas vertientes embalses).	B (Medio-Alto)	0	1
E-3	Afección o estímulo economía/industria local (costes depuración, filtrado, limpieza canalizaciones, reparaciones, etc).	B (Medio-Alto)	0	1
E-4	Encaje en políticas sectoriales y objetivos generales marcados en la Planificación Hidrológico-Forestal	B (Medio-Alto)	0	1
E-5	Reconocimiento (secuestro/protección)	C B (positivo)	0	1

2.1.3. Componente Fuego:

En lo relativo al Fuego, la modificación de la vegetación supone i) la reducción del combustible o disminución de la carga de combustible disponible, ii) la conversión del combustible, por la cual unos combustibles son reemplazados por otros con distinta inflamabilidad y iii) el aislamiento/fragmentación del combustible, consistente en aislar grandes compartimentos de combustible mediante fajas/áreas cortafuegos o cinturones verdes.

La selvicultura preventiva se basa en aplicar unos principios que definen las condiciones de bosques resistentes al fuego, consistentes en reducir los combustibles de superficie, reducir combustibles de escalera y reducir la densidad de copas. Estos son:

- El comportamiento del fuego en superficie debe controlarse reduciendo los combustibles de la superficie o estimulando un reverdecimiento de pastos y arbustos bajos.

- La reducción en el potencial de antorcheado (salto a copas) se logra reduciendo el comportamiento potencial del fuego en superficie más aumentando la altura de la base del dosel.
- La reducción en la propagación potencial activa del fuego de copas se logra reduciendo la densidad aparente del dosel.
- Mantener los árboles grandes en el rodal si existen, pues son más resistentes al fuego por sus copas más altas y corteza más gruesa.

No todos los tratamientos de reducción de combustible reducirán los problemas de incendio, pero, si los tratamientos se planifican con estos principios de bosques a prueba de incendios, los combustibles y la estructura del bosque marcan una diferencia con mayor resistencia al fuego. Si se aplica un tratamiento apropiado de los combustibles, la reducción general en el comportamiento esperado del fuego y su severidad generalmente compensan cambios en los factores meteorológicos, como la velocidad del viento y la humedad del combustible.

Para objetivar SE relacionados con el componente Fuego en selvicultura eco-hidrológica se han desarrollado las Tablas 5, que muestra los umbrales de ejemplo para cada indicador o factor relevante de los cinco subsistemas fundamentales.

Tabla 5. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico) para objetivar SE relacionados con el componente Fuego en selvicultura ecohidrológica (CAFE).

<i>Decisión que se quiere tomar: realizar una selvicultura para tener bosques resistentes al fuego</i>				
Subsistema	Factores relevantes	Función	Valor 0	Valor 1
A-1	Nivel riesgo incendio forestal	A	4	1
A-2	Promedio días año con Tmax>30°C	B ()	0	180
A-3	DPV Jun-Ago Kpa	B	1	2
A-4	Suma MDC durante periodo peligro incendio (DMC>300)	B(300-540 o 600-2160)	600	2160
A-5	Int-Dur-Frec Sequías (SPI-IDF)	B	0	3
A-6	Velocidad media anual viento	B (2-12)	2	12
A-7	Aridity Index (P/ETo)	A	1.7	0.32
S-1	Clase textural 1-9 (hidrofob en texturas gruesas)	B (8-12)	8	12
S-2	Erosión Hídrica potencial (RUSLE)	A	100	0
S-3	Rugosidad (pedregosidad, manning, despojos, agregados)	A	40	0
S-4	Orientación S (area.S/area.total)	B	0.25	0.5
S-5	Pendiente	B (>30%)	10	30
H-1	Escorrentía media anual (mm)	C-B (0-80/500->)	80	500
H-2	Coef Escorrentía Q/P	B	0.1	0.5
H-3	Densidad drenaje cuenca (m/m2)	B	0	0.05
H-4	NO3 (Calidad Química agua, ej uso potable)	B (50 ppm)	0	50

H-5	Sólidos suspensión (Cald física agua)	B (20 ppm)	0	20
P-1	Carga combustibles en superficie (hmat*fccmat)	B)	0	200
P-2	Altura copa viva/o matorral	B	0.5	2
P-3	Densidad aparente de copas (LAI, FCC)	B	50	85
P-4	Fragmentación bosque (mosaico, áreas/fajas cortafuegos).	B	0.5	1
P-5	Modelo combustible	B	1	7
E-1	Afección o estímulo economía/industria local (biomasa, madera, brigadas, etc.)	B (Medio-Alto)	0	1
E-2	Presencia humana (Igniciones, Densidad diseminados, parches/km2)	B (positivo)	0	0.15
E-3	Encaje en políticas sectoriales y objetivos generales marcados en la Planificación autonómica	A (< 0.7)	4	1
E-4	Presencia humana (protección bienes y población: Ind Agreg Urbano)	B (positivo)	1	0.5
E-5	Valor econ. ecosistemas forestales (IV_IFN) €/ha	B	0	2500

2.1.4. Componente Eco-Resiliencia:

En el contexto del cambio climático actual, la silvicultura adaptativa trata de aumentar la disponibilidad de agua para el arbolado planteando espesuras intermedias que mejoren el balance hídrico de la masa; el objetivo es mejorar las condiciones de la masa y surge especialmente en áreas semiáridas donde la provisión de bienes y servicios por los bosques está amenazada por el cambio global y más específicamente por las sequías más intensas. Los bosques mediterráneos padecen una combinación de factores climáticos estresantes que en numerosas ocasiones han desencadenado una mortandad generalizada del arbolado. Esto puede ser más grave en masas artificiales y poblaciones marginales donde el impacto del cambio climático requiere de una silvicultura adaptativa proactiva y urgente que haga que las masas sean más resilientes. Además de favorecer la biodiversidad de los bosques para que presente un sistema más diverso, que por lo general hace que sea más estable y con capacidad de adaptación a las perturbaciones.

Para objetivar SE relacionados con el componente Eco-Resiliencia en silvicultura en silvicultura eco-hidrológica se han desarrollado la tabla 6, que muestra las valoraciones obtenidas para cada indicador o factor relevante de los cinco subsistemas fundamentales.

Tabla 6. Relación de indicadores relevantes en cada subsistema ASPHE (A: Atmósfera, S: Suelo, H: Sistema Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: sistema socioeconómico) para objetivar SE relacionados con el componente Eco-resiliencia en silvicultura ecohidrológica (CAFE).

Decisión que se quiere tomar: realizar una silvicultura para favorecer la eco-resiliencia y adaptación del bosque al cambio climático

Subsistema	Factores relevantes	Función	Valor 0	Valor 1
A-1	Aumento Aridity Index RCP 8.5 (P/ET _o)	A	0	-0.5
A-2	Aumento IDF Sequías (SPI-IDF)	B	0	1
A-3	Aumento otras perturbaciones climáticas	B		
A-4	Aridity Index (P/ET _o)	A	1	0.2
A-5	Aumento termicidad (GDD8.5=X*GDD)	B	1	2
A-6	Int-Dur-Frec Sequías (SPI-IDF)	B	0.65	3
S-1	Clase textural 1-9 (fertilidad y retención agua)	B (8-12)	8	12
S-2	Suma déficit hídrico suelo	A	-100	-800
S-3	Profundidad suelo	A	60	20
S-4	Calidad de estación (site index, SFI, PISY)	A (III-IV)	10	5
S-5	Desequilibrios en balance C suelo (I-O<<>>0)			
S-6	Pendiente	B (>30%)	10	30
H-1	Aumento sequía sistemas hidrolg (frecuencia, Intensidad, duración)	B	-20	20
H-2	Tendencia Q medio/reserva hídrica	B	-20	20
H-3	Reserva hídrica media < 50%	B	70	10
H-4	Tendencia niveles piezométricos (%variación)	B	-20	20
H-5	Equilibrio agua azul/verde (1-QJun/Qfeb)	B	0.2	1
P-1	Alta densidad arbolado	B (<0)	150	750
P-2	Diversidad estructural y biológica	A	4	1
P-3	Decaimiento arbolado (tendencia índice multispectrales)	A	1	-1
P-4	Carbono acumulado por hectárea de uso forestal	B (<0)	10	60
P-5	Fragmentación (mosaico, áreas/fajas cortafuegos) del bosque.	A	0.5	1
P-6	Cambio previsto hábitats sp ppal. (Mantenimiento hábitat central-óptimo sp en el turno común)	B	0	0.7
E-1	Afección o estímulo economía/industria local (biomasa, madera, brigadas, etc.)	B (Medio-Alto)	0	1
E-2	Encaje en políticas sectoriales y objetivos generales marcados en la Planificación autonómica (Estrategia 2021-2030)		0	1
E-3	Reconocimiento C (secuestro/protección)	B (positivo)	0	1
E-4	Calidad/fragilidad paisaje	B	0	1

E-5	Complejidad técnica ejecución (tipo masas, propiedad,...)	0	1
E-6	Valor econ. ecosistemas forestales (IV_IFN) €/ha	B	0 2500

Cada uno de estos indicadores tendrá un valor para la zona de estudio y estará comprendido en 0 y 1. Se recomienda hacer el valor promedio de los indicadores tanto por subsistema por el conjunto total. De este modo, se tendrá un valor final de vocación para cada uno de los grupos CAFE. Finalmente, esto dará una orientación de que objetivos son más fuertes y hacia donde puede orientarse la gestión para fomentar dicho objetivo principal o la combinación de estos para realizar gestión multifuncional de su bosque que posteriormente serán seleccionado en la DSS CAFE.

A continuación, se pone un diagrama de araña (Fig. 4) donde se muestra como ejemplo la puntuación o pesos de cada uno de los objetivos CAFE y separados por subsistema. Donde se ha realizado en cada uno el promedio de sus indicadores de forma consensada entre los diferentes actores implicados. Como se puede comprobar, en este ejemplo, todas las cuencas tienen la misma vocación, predominando los objetivos Agua y Carbono frente a los otros.

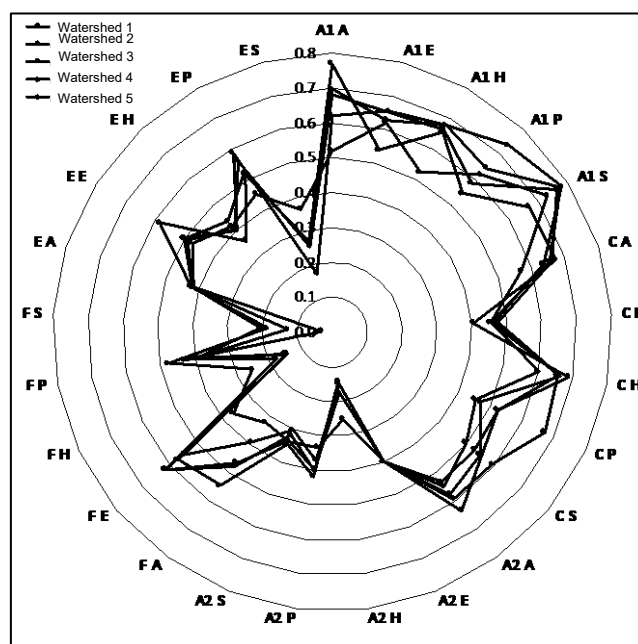


Figura 4. Ejemplo de evaluación de objetivos ecohidrológicos en 5 cuencas, componente CAFE (primera letra): **Carbono (C)**, **Agua-producción (A1)**, **Agua-protección (A2)**, **Fuego (F)** y **Eco-resiliencia (E)** y subsistema (segunda letra), A: Atmósfera, S: Suelo, H: Hidrológico, P: ecosistema forestal y E: socioeconómico.

Sin embargo, aun en este punto no se puede determinar el plan de gestión que debe abordarse para obtener el objetivo de gestión, simplemente se sabe qué objetivo es prioritario en el área de estudio donde se quiere aplicar la DSS. Para completar este paso, es necesario fijarse en la distribución espacial del objetivo a conseguir. Esto se logra con el siguiente punto de este apartado.

2.2. Potencialidad CAFE

Una vez que se tienen clara la vocación genérica del territorio, es decir hacia que objetivo ecohidrológico hay que priorizar con la gestión, es necesario saber cómo es la distribución espacial para obtener dicho objetivo en el territorio. De esta forma, saber aquellas áreas de puntos calientes donde centra la atención. Realizar este paso es importante, esto se debe a que en muchas ocasiones no se puede hacer una gestión en todo el territorio estudiado y solo se pueden ejecutar planes de acción en sitios concretos por limitación de recursos económicos. Por estas situaciones, es que se ha pensado en generar un “**Mapa de Potencialidad**”, que permita saber aquellos rodales o áreas de interés para generar el bien o servicio de interés según la vocación que se esté persiguiendo.

Para poder obtener dicho mapa, una vez establecidos objetivos ecohidrológico que se persiguen, se deben de completar la identificación de los procesos eco-hidrológicos directamente implicados en ellos y la valoración cuantitativa mediante variables que llevan asignado un peso proporcional a su importancia. Estas variables modulan los procesos identificados y su variabilidad espacial dará el margen de acción de la silvicultura.

2.2.1. Procesos eco-hidrológicos

El primer paso que hay que realizar es identificar los procesos ecohidrológicos a los que hay prestar atención para mejorar los objetivos que tienen más vocación. Fijándose que subsistema son los principales. A continuación, se muestran los principales procesos que deben focalizarse según el objetivo CAFE, pero que pueden ser modificados y ajustado dentro del proceso de co-creación del LL.

Procesos ecohidrológicos para producción de biomasa/carbono (C)

Para fomentar la producción de biomasa, se debe saber que la masa debe tener un nivel competencia controlado para conseguir que los incrementos anuales en secuestro de carbono sean los máximos posibles para el sitio donde se quiere realizar. Lograr este objetivo principal es el más sencillo de conseguir, ya que, en la formación a todos se ha inculcado este tipo de silvicultura tradicional. Por tanto, cubrir este objetivo se logra con un buen esquema de gestión. Si se pretende determinar esta variabilidad en el territorio, hay que focalizar los siguientes procesos que son los que pueden determinar que zonas son más potenciales para dicho objetivo:

- **Productividad Primaria:** Ya sea bruta o neta, la productividad permite ver el valor potencial del sitio. De este modo, saber que zonas tienen mejor calidad de sitio o calidad de estación.
- **Existencias actuales de carbono:** Ver el stock de carbono que hay en vuelo y suelo, permite saber qué tipo de masa se tiene y hacia que puedes derivarse. Mientras que, en el suelo, interesa saber el carbono orgánico para saber una historia más larga de cómo ha sido de bueno captando carbono cada sitio.

Procesos ecohidrológicos para Agua-Producción (A1)

Para lograr el objetivo de agua producción, se debe de tener presente que el agua debe de moverse de las masas forestales a los embalses o acuíferos. Ya sea por sistema superficial o subterráneo y esto va a depender de la permeabilidad del terreno. Por lo tanto, esto va a permitir saber que tipo de movimiento de agua se quiere producir y fomentar. Si nos centramos en movimientos superficiales, la silvicultura deberá generar un recurso hídrico adicional que debe circular desde las laderas hasta los fondos de

valle y canalizarse en cursos fluviales para finalmente llegar a distintos embalses. Para lograr este cometido hay que fijarse en los siguientes procesos:

- **Precipitación neta (Pn)**, que está compuesta de trascolación más escorrentía fustal (resulta de restar la interceptación a la lluvia incidente) y es un claro indicador del agua del que se parte y que se puede producir en un sistema gestionado. Esto solo aplica heterogeneidad en sitios muy extensos o simplemente te contextualiza la situación de partida dependiendo donde está el sitio de estudio.
- **Infiltración**, que determina el agua que llega al compartimento suelo y es la que debe moverse por la gravedad hacia las partes bajas.
- **Flujos de ladera**, que pueden ser en superficie, dentro del suelo o concentrado en regueros por diversas conexiones dependiente de la fisiografía.

Procesos ecohidrológicos para Agua-Protección (A2)

Si se pretende un enfoque de gestión que se enmarque el objetivo de fomentar el agua protección, se debe realizar una gestión forestal que no ponga en riesgo la estabilidad del suelo. Para asegurar esto, la gestión debe tener en cuenta aquellos procesos que tiene que ver con las pérdidas de suelo producidas por la erosión. Por todo esto, hay que buscar aquellos indicadores que hagan que los problemas erosivos sean más elevados. Aquí principalmente se mira al subsistema suelo, que alberga información de fisiografía y textural del suelo.

- **Pendientes altas (Factor LS)**, aquellas zonas donde la pendiente sea superior a 30% pueden estar expuestas a pérdida de suelo si no disponen de una cubierta vegetal que lo proteja de la lluvia o si se le realiza un tratamiento forestal muy intenso. Por esto, son zonas a tener controladas y con preferencias para la gestión de protección.
- **Erosividad potencial:** Otro factor importante Erosividad (Factor K Rusle), Densidad erosiva (Factor R)
- **Calidad física de agua:** evaluar la calidad del agua que se está generando en la cuenca es fundamental para saber cómo es el proceso de erosión que se está acumulando, por tanto, determinar los sólidos en suspensión puede ser un gran indicativo de estos procesos.
- **Cubierta:** es importante saber de qué situación se parte, antes de poder aplicar actuaciones sobre la masa. Ya que, las densidades finales en zonas de riesgo no deben ser muy bajas.

Procesos ecohidrológicos para Riesgo de Incendio (F)

Hacer una gestión que busca como objetivo la reducción de riesgo de incendio, hace que se tenga que prestar atención al bloque vegetación para ver el combustible disponible en el ecosistema y, por otro lado, información estadística sobre las causas de incendios. Con esta información se puede buscar indicadores y procesos que permitan definir qué áreas son más o menos potenciales para realizar esta gestión.

- **Periodos de riesgo:** Lo que es conocido como los periodos de incendios (Fire Season). Esto puede usarse como un contador que determina el número de días que cada zona está expuesta a un peligro. Donde las condiciones ambientales hacen que el riesgo sea elevado.
- **Disponibilidad del combustible:** este un parámetro fundamental puesto que permite saber cuánto material está disponible si sucede un incendio y por ello

saber lo virulento que puede llegar a ser. Para determinar bien esto, se debe tenerse en cuenta multitud de variables como combustible en superficie, continuidad vertical y horizontal. Todo lo bien se pueda identificar esta información, permitirá una mayor exactitud en los resultados que se obtengan.

- **Probabilidad de igniciones:** Del mismo modo, es importante saber cómo es de posible que suceda un incendio, ya sea por factores naturales o humanos.

Procesos ecohidrológicos para Eco-Resiliencia (E)

Cuando el objetivo de gestión es aumentar la eco-resiliencia de los bosques, hay que centrarse en los procesos ecohidrológicos que tienen que ver con el subsistema atmósfera, para ver si hay sitios más expuestos al cambio climático. Y, por otro lado, el subsistema planta, ver cómo está su estado.

- **Incremento de aridez:** Evaluar este empeoramiento del sistema meteorológico en toda la zona de estudio puede resaltar áreas más expuestas por las severidades climáticas que se pueda producir con el cambio climático.
- **Decaimiento de la masa:** Una buena evaluación del estado fisiológico de la vegetación permite detectar si la masa se verá afectada.
- **Diversidad estructural y biológica o genética:** Otro factor clave es saber como es la biodiversidad que alberga el sistema. De este modo, ver si la masa es capaz de adaptarse al cambio.

2.2.2. Variables responsables de los procesos

Dependiendo de la vocación y, por consiguiente, los procesos ecohidrológicos principales a los que hay que prestarle atención, hay que observar y determinar variables que integran el subsistema ASPHE. Simplificar este paso es una tarea difícil, puesto que hay multitud de variables que finalmente están relacionadas con la mayoría de procesos que suceden en el sistema. Sin embargo, en este apartado se intenta simplificar al máximo el número de variables que se van a utilizar. A continuación, se da un listado preliminar de variables que se aconsejan incluir según el objetivo de gestión que se vaya buscando y los procesos que lo modulan (tabla). Como ya se ha comentado en los anteriores apartados, esta selección puede modificarse localmente con ayuda de los LL y la participación de los SH.

Tabla 7. Variables responsables de los procesos y de los objetivos.

Objetivo	Procesos	Variables
Biomasa/carbono	Existencias actuales de carbono	GPP o NPP
		Biomasa aérea (Alométricas con Alturas y diámetros)
		Carbono Orgánico en suelo (SOC)
	Productividad	Incrementos anuales (Crecimiento)
		Calidad de estación

Objetivo	Procesos	Variables
Agua-Producción	Aumentar P neta	Lluvia incidente
		Cobertura dosel
		ETP (Radiación//T ^a)

	Disminuir pérdidas (Balance hídrico)	Cobertura dosel
		Especie principal
	Conectividad ladera	Porosidad drenable del suelo
		Conductividad hidráulica
		Humedad antecedente
		Espesor suelo
		Canales preferentes (espesura)
		Área contribuyente
		Pendiente microcuenca
		Geometría ladera

Objetivo	Procesos	Variables
Agua-Protección	Pendientes altas	Pendiente
		Slope Length and Steepness factor (LS Factor)
	Erosividad potencial	Densidad erosiva (R-factor/P)
		Erodibilidad suelo (Factor K RUSLE)
		Rugosidad (pedregosidad, manning, despojos, agregados)
	Calidad física agua	Sólidos en suspensión
		Contenido de Nitratos
	Cubierta	Densidad de pies
		FCC

Objetivo	Procesos	Variables
Riesgo de Incendio	Periodos de riesgo	Nº Días de Tmax>30°C
		Humedad relativa
		FWI >x
	Disponibilidad del combustible	Modelo de combustible
		Carga de combustible en superficie
		Matorral
		Altura copa viva
		Densidad de copas
		Fragmentación del bosque
	Probabilidad de igniciones	Nº de rayos al año
		Causas humanas

Objetivo	Procesos	Variables
Eco-Resiliencia	Incremento de aridez	Índice de aridez
		Tendencias de precipitación histórica
		Albedo
	Decaimiento de la masa	Perdidas de producción primaria
		Defoliación de copas
	Diversidad estructural y biológica o genética	Nº de estratos
		Nº de especies arbóreas
		Nº de especies arbustivas
		Origen/procedencia de la masa

2.2.3. Asignación de pesos (método AHP)

El siguiente paso que se debe completar en esta metodología es la determinación de importancia o peso que se asigna a cada una de las variables que se utilicen para calcular para cada proceso ecohidrológico, que finalmente permitirá conseguir una gestión forestal con el enfoque CAFE que fomentaba la vocación del territorio.

La forma que se propone esta guía para la asignación de pesos es por un proceso jerárquico analítico, denominado el método AHP (Analytic Hierarchy Process). Es un método para organizar y analizar decisiones complejas, usando matemáticas y psicología. Fue desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1970 y se ha perfeccionado desde entonces (Saaty, 2008). Ha sido ampliamente usado y es considerado como el más robusto de análisis de decisión multicriterio MCDA (Kaim et al., 2018). Este análisis ayuda a capturar tanto aspectos subjetivos como objetivos de una decisión al reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones por pares y luego sintetizar los resultados. Para su empleo, se han tomado un conjunto de criterios y subcriterios de evaluación para el objetivo de la vocación del territorio, dando un conjunto de opciones entre las cuales se debe tomar la mejor decisión. La integración de información geoespacial utilizando el enfoque AHP permite el análisis y evaluación multicriterio en el análisis de idoneidad de la tierra.

Los criterios y subcriterios son las variables que gobiernan los procesos identificados en el punto previo. Por ejemplo, si se trata de producir agua mediante recarga de acuíferos, se puede identificar la conductividad hidráulica (Ks) del suelo como una de las variables que intervienen en el proceso hidrológico de drenaje profundo. La Ks se puede subdividir en clases (clasificación por natural breaks de Jenks, implementada en SIG) que son evaluadas entre sí con la escala introducida por (Saaty, 2008) y además la Ks se enfrenta a otras variables responsables del proceso de recarga de acuíferos por el mismo método. Las comparaciones por pares en el AHP se determinan con valores de 9 a 1/9 (Tabla 8). A través de la matriz de comparación por pares, el AHP calcula la ponderación para cada criterio o variable. Para las asignaciones de pesos, se recomienda revisar tanto bibliografía como asesoramiento de expertos que puedan aportar conocimiento. A través de la matriz de comparación por pares, el AHP calcula la ponderación para cada criterio tomando el vector propio correspondiente al mayor valor propio de la matriz y luego normalizando la suma de los componentes a la unidad.

Tabla 8. Ponderación de la importancia para el objetivo.

<i>Intensidad de la importancia</i>	<i>Definición</i>	<i>Explicación</i>
1	Igual importancia	Dos factores contribuyen por igual al objetivo
2	Igual importancia a moderada	Cuando se necesita un compromiso
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un factor sobre otro
4	Importancia moderada a fuerte	Cuando se necesita un compromiso
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un factor sobre otro
6	Importancia fuerte a muy fuerte	Cuando se necesita un compromiso
7	Importancia muy fuerte	Un factor se ve fuertemente favorecido, y su dominio se muestra en la práctica
8	Importancia muy fuerte a extrema	Cuando se necesita un compromiso
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un factor sobre otro es del más alto orden posible de afirmación

En las siguientes tablas (Tabla 9 y 10) se pueden ver un ejemplo para realizar una silvicultura ecohidrológica que tiene como objetivo CAFE producir agua en cantidad. Para ello, se han utilizados los criterios que hacen referencia a los procesos de interés (Tabla 9), donde se cruzan todos y se asignan pesos. Y luego cada uno de esos procesos se relacionan con las variables que intervienen (Tabla 10) donde podemos ver el ejemplo de uno de eso proceso (Balance hídrico).

Tabla 9. Ejemplo de ponderación de criterios

Silvicultura para producir agua en cantidad	Balance hídrico	Conectividad ladera
Balance hídrico	1	1/3
Conectividad ladera	3	1

Tabla 10. Ejemplo de ponderación de los subcriterios

Balance hídrico	ETP	Cobertura dosel	Especie	Lluvia incidente
ETP(Radiación//T ^a)	1	1/4	3	1/3
Cobertura dosel	4	1	5	1/2
Especie	1/3	1/5	1	1/5
Lluvia incidente	3	2	5	1

2.2.4. Mapear potencialidad

El último paso que falta para completar la potencialidad del enfoque CAFE que se esté buscando y por tanto, tener la distribución del territorio que represente la idoneidad de cada sitio a producir dicho objetivo. Se obtiene con el álgebra de mapas que se realiza en GIS, con las variables que componen los procesos que interesan cuantificar, para lograr el objetivo de gestión que se buscaba con la vocación del sitio. Y, por otro lado, con los pesos que se hayan establecidos en el paso anterior y que ponderarán dichas variables, se conseguirá un mapa ráster de idoneidad. Posteriormente los valores obtenidos se pueden normalizar de 0-1 o se pueden categorizar en los grupos que se estimen como se puede ver en el ejemplo siguiente (Fig. 5).

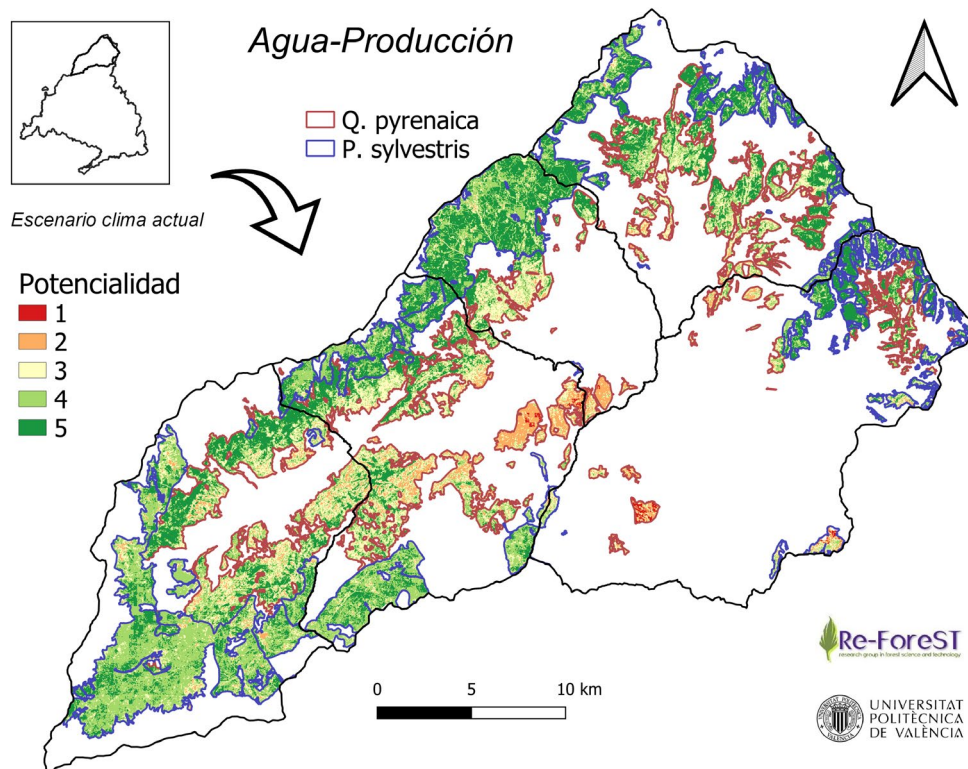


Figura 5. Ejemplo de mapa de idoneidad a producir agua-producción (Fte.: Elaboración propia).

2.2.5 Escenario de cambio climático

El mapa de idoneidad o potencialidad que se ha obtenido con los pasos que se han visto en los apartados anteriores puede verse ampliamente modificado si planteamos toda esta metodología frente a un paradigma de clima distinto. Es cuando entra en juego las series climáticas de escenarios de cambio climático (RCP 4.5 o RCP 8.5).

Esto haría que el mapa de potencialidad a producir del objetivo del enfoque CAFE que se buscara puede verse afectado por las condiciones climáticas severas que pueden estar por venir. Es por eso que puede ser interesante realizar este mismo proceso utilizando las capas de clima de escenario climático en cuestión o incluso que re estructure el peso de los criterios o subcriterios que se hayan empleado para obtener el mapa. Esta cuestión es decidida por el equipo encargado de realizar esta valoración.

3. Desarrollo del plan de gestión multifuncional

Una vez que se tiene bien caracterizado el sitio y se conoce tanto la vocación del territorio, como la potencialidad de las áreas que son más idóneas. El siguiente aspecto importante a tener en cuenta es el plan de gestión que debe aplicarse. Este debe estar bien estructurado para lograr una gestión sostenible. Para alcanzar dicho objetivo, debe desarrollarse teniendo claros los requisitos legislativos, técnicos y socioeconómicos. Previo a todo esto, lo primero de todo es tener claro cual es el objetivo fundamental de un plan de gestión forestal. Cuyo cometido es desarrollar un documento aplicable a terrenos forestales que garantice la Gestión Forestal Sostenible (GFS), aportando una valiosa información al propietario de los terrenos y planifica la gestión que se va a hacer en el terreno durante los siguientes años.

Dentro del marco legislativo, hay que tener presente que existen diversas normativas que regulan las acciones de gestión. Estas normativas están vinculadas a distintas administraciones, europeas, nacionales o regionales, todo esto depende del país al que cada gestor pertenezca. Dependiendo de las competencias que tengan adquiridas cada administración son unas u otras las que implementan las medidas legales que regulan más estrictamente el marco de acción. Además, existen otros pactos, compromisos, foros, paneles, conferencias y convenios ambientales de carácter global que también deben estar presente para cumplir con la política forestal. Por tanto, hay que tener esto presente antes de tomar las medidas que se quieren llevar a cabo. Siendo el primer paso que hay que realizar, una revisión de toda la normativa vigente y existente que regula la planificación forestal. De esta forma, se tendrá un claro conocimiento de las acciones permitidas de carácter legal a la hora de llevar a cabo la gestión.

Las siguientes pautas que hay que contemplar, son las que pertenecen al marco técnico. Aquí hay que determinar los documentos necesarios que hay que desarrollar para poder llevar a cabo la gestión del territorio desde el corto al largo plazo y que deben cumplir la legislación forestal. Además, para poder llevar a cabo estos instrumentos de gestión, se utiliza otra información complementaria que evalúa la evolución de la vegetación en el tiempo, como son los inventarios forestales. Si se quiere ver una visión general de los planes de gestión forestal o instrumentos equivalentes para cada uno países miembros de la UE, se puede consultar el siguiente [documento](#). Los instrumentos principales de gestión que hay que desarrollar en todos los países miembros, son fundamentalmente dos, los planes de Gestión forestal y los proyectos de ordenación de montes. La diferencia es el tamaño de la superficie a planificar. Como información de apoyo para desarrollar los planes de gestión de forma adecuada, existen los inventarios forestales que periódicamente se revisan y evalúan para determinar el estado de la masa y saber como es su evolución y perduración. Con este soporte, los técnicos pueden determinar como se encuentra el estado del bosque y definir, cual es la planificación oportuna para asegurar su estabilidad. Dependiendo del estado de la masa y del objetivo que se quiera buscar con la planificación forestal. Hay que determinar las medidas de acción que se deben incluir en el plan de gestión para definir los tratamientos selvícolas que hay que llevarse a cabo. Estos tratamientos pueden tener dos objetivos principales adaptar la masa a unas mejores condiciones de vida (cortas de mejoras o intermedias) o tener la finalidad de regenerar la masa (cortas de regeneración), estas dependiendo del tipo de masa son más continuas o discontinuas. En todas ellas, la intensidad de cortas está muy clara cuando se pretende producir madera o se busca otro objetivo único. Sin embargo, cuando se pretende conseguir una gestión multifuncional obtener la planificación correcta se hace más difícil. Es por eso, que se necesitan de herramientas

de soporte a la decisión que ayuden a comprender los intereses contrapuesto de los distintos bienes y servicios.

Para concluir con el desarrollo del plan de gestión, falta por completar el marco socioeconómico. Este permitirá conocer las inquietudes locales que influyen en la sociedad y en la economía. La participación pública es un requisito legal que se deriva de numerosos convenios y acuerdos internacionales finalmente traducidos a leyes nacionales o autonómicas. En ellos se enmarcan la necesidad de impulsar procesos participación pública en todo lo relativo al planeamiento, en general y al medio ambiente.

Todas estas medidas pretenden escuchar y comprender la diversidad de percepciones existentes sobre el sector forestal, y promover la articulación de las mismas para el desarrollo de pautas consensuadas con los distintos actores implicados en los ecosistemas forestales. Para realizar este cometido, existen diversas metodologías de participación ciudadana, nosotros recomendamos que se siga trabajando en el planteamiento ya utilizado en otros bloques anteriores con el uso de LL.

Con todos estos criterios, se puede definir definitivamente el plan de gestión forestal que busca mejorar el objetivo CAFE. Sin embargo, si se busca mejorar varios objetivos porque hay más de uno que tiene la vocación alta o, por el contrario, no hay ninguno con valor alto y se busca compensar una mejoría múltiple. Estas medidas están fijadas en la gestión forestal multifuncional, pero en la mayoría de proyectos se hacen por separado la cuantificación o el cambio que supondrá en el ecosistema. Sin embargo, la DSS CAFE es capaz de combinar todos los bienes y servicios y determinar una planificación conjunta de todos ellos en función del criterio o preferencia del gestor. Por eso, para promover una silvicultura orientada a la adaptación a cambios ambientales y sociales, basada en el conocimiento del funcionamiento del bosque. La investigación e innovación en planificación forestal multifuncional a diferentes escalas y el desarrollo de herramientas de apoyo a la gestión y planificación forestal son claves en este sentido.

4. Simulación eco-hidrológica

Para poder comprender correctamente la importancia de este apartado, lo primero que hay que saber es la definición de simulación. Se trata de una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real.

4.1. Modelos Basados en Procesos

La gestión forestal tiene influencia directa en los ciclos biogeoquímico e hidrológico de la masa. Elementos como el C, N y el agua se encuentran almacenados de forma dinámica en los distintos compartimentos del ecosistema: hojas, ramas, troncos, raíces, horizontes del suelo, etc., que se ven modificados con la gestión forestal, bien por adición (plantación) o por sustracción (claras, desbroces, podas, etc.). Dicha modificación no se reduce simplemente a una disminución o incremento del elemento concreto, sino que también puede afectar a la dinámica de intercambio entre compartimentos. La adecuada compartimentalización y caracterización tanto de los depósitos como de su intra e inter dinámica, resulta crucial para analizar y cuantificar adecuadamente los efectos de la gestión forestal más allá de la producción de madera.

En el caso concreto de la gestión forestal eco-hidrológica, el eco-hidrovoxel (EHV) es una unidad de volumen suelo-planta-atmósfera que conecta de forma dinámica los distintos compartimentos del ecosistema a través del agua (Fig. 6). En un ecosistema forestal el agua puede encontrarse en el acuífero (si lo hay), en los distintos horizontes

del suelo, en las raíces, troncos, ramas y/o copas, y desplazarse de forma más o menos rápida a través de cada uno de esos compartimentos hasta su salida del ecosistema, bien sea en forma de vapor de agua hacia la atmósfera, o en forma líquida como escorrentía superficial, interflujo y/o flujo subterráneo. Por tanto, el volumen de agua total que podemos observar en una masa forestal en un momento dado se encuentra compartimentalizado en cada uno de los componentes de ese eco-hidrovoxel, cuya modificación física a través de la gestión forestal, no sólo aumenta o disminuye el número de compartimentos, sino que también modifica la cantidad de agua que van a recibir y/o liberar. La cuantificación del agua que entre, salga y/o se almacene en cada uno de esos componentes es precisamente lo que permite conocer el efecto de la gestión forestal eco-hidrológica orientada a la provisión hidrológica. Por tanto, la metodología empleada tanto en la caracterización del eco-hidrovoxel como en su cuantificación influye directa y significativamente en la calidad de los resultados. En este sentido, el uso de modelos mecanicistas que permitan una representación integrada del ecosistema, conectando escalas e incluyendo interacciones y retroalimentaciones no lineales, resulta clave para obtener unos resultados precisos, detallados y fiables. Estos modelos son capaces de transformar las variables climáticas en variables fisiológicas relevantes, mediante la representación de procesos hidrológicos, biogeoquímicos y fisiológicos no lineales y su interacción con la atmósfera (variables climáticas).

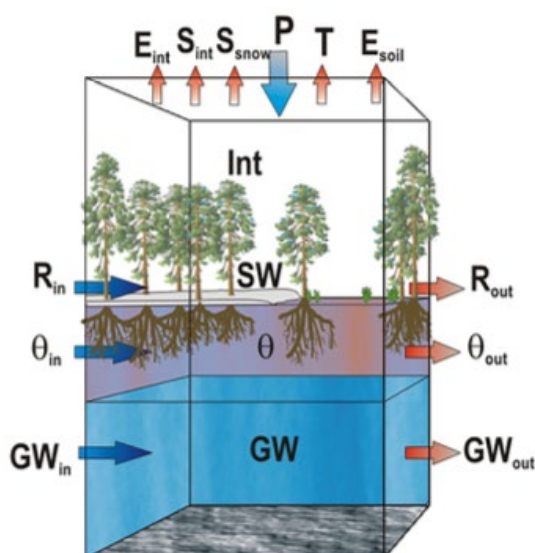


Figura 6. Ilustración gráfica del concepto de eco-hidrovoxel y los procesos hidrológicos representativos del mismo (Fte.: Moreno et al., 2018).

Para cuantificar los servicios ecosistémicos, la gestión forestal eco-hidrológica hace uso de los modelos basados en procesos para por medio de la simulación poder reproducir los ciclos y procesos que suceden en el ecosistema. De este modo, se puede saber el valor de muchos bienes y servicios que es difícil de evaluar de un modo más empírico. Además, por medio de estas técnicas se puede tener la evolución espacio-temporal de los distintos procesos ecosistémicos que suceden en los bosques y la relación que tienen entre sí. Hay diversos modelos que se pueden emplear y la mayoría de ellos se basan en la simulación de los ciclos del agua y del carbono principalmente. La DSS CAFE integra 3 modelos diferentes: RHESsys, Biome-BGC MuSo, Tetis.

Biome-BGC MuSo:

Es un modelo biogeoquímico que simula el almacenamiento y el flujo de agua, carbono y nitrógeno entre el ecosistema y la atmósfera, y dentro de los componentes del ecosistema terrestre (Hidy et al., 2016). Las partes principales del ecosistema se definen como planta, suelo y hojarasca. Dado que el modelo simula los ciclos de agua, C y N de los ecosistemas, el modelo define los siguientes compartimentos principales (algunos de ellos no están presentes en ecosistemas específicos): hoja (C, N y agua), raíz fina (C, N), fruto (C, N), tallo blando (C, N), madera viva (C, N), madera muerta (C, N), raíz gruesa (C, N), suelo (C, N y agua) y hojarasca (C, N). Es un modelo agregado (no espacialmente distribuido) y trabaja con masas monoespecíficas y con un solo estrato vertical. La estructura de la masa se representa en términos de LAI y de Kg C/m², y el suelo se representa mediante una subdivisión del mismo en 10 capas de diferentes profundidades de forma que es posible simular el movimiento del agua a lo largo del perfil del suelo. Cada capa requiere de una caracterización física (textura, capacidad de campo, punto de saturación y punto de marchitez permanente) proporcionada por el usuario.

RHESSys:

Es un modelo ecohidrológico diseñado para simular el ciclo y el transporte integrados de agua, carbono y nitrógeno en un terreno espacialmente variable. El modelo está estructurado como una representación del paisaje jerárquica y espacialmente anidada, con una serie de procesos hidrológicos, microclimáticos y ecosistémicos asociados a objetos específicos del mismo en diferentes niveles de la jerarquía. Este enfoque está diseñado para facilitar el análisis ambiental que requiere una comprensión de los procesos dentro de la cuenca, así como los flujos agregados de agua, carbono y nitrógeno. RHESSys se ha aplicado en una variedad de tipos de ecosistemas, incluyendo regiones boscosas de coníferas caducifolias y praderas, ecosistemas de tipo alpino y mediterráneo, y zonas urbanas (Tague y Band, 2004). Este modelo distribuido es capaz de introducir heterogeneidad que hay en el sistema, desde el suelo hasta la vegetación. Permite trabajar con diversos tipos de vegetación e incluso con diferentes estratos. Del mismo modo, ocurre con el suelo.

Tetis:

Es un modelo de simulación hidrológica distribuido espacialmente mediante la subdivisión de la cuenca en celdas regulares con parámetros de base física (Francés et al., 2007). Tetis permite el acoplamiento de diversos submódulos y para este trabajo se ha activado el de vegetación (Pasquato et al., 2015; Ruiz-Pérez et al., 2017). El modelo incorpora adecuadamente la variabilidad espacial de los ciclos hidrológicos y parte del crecimiento de la vegetación. Su base conceptual se basa en el principio de parsimonia, es decir, se selecciona el modelo con el menor número de parámetros para obtener prestaciones similares. El uso de este modelo es recomendable cuando las métricas relacionadas con el ciclo hidrológico son muy importantes, ya que son las que predominan. Mientras que, el ciclo del carbono es bastante limitado dentro de este modelo.

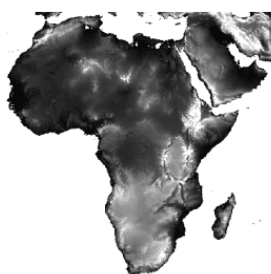
4.2. Bases de datos globales

Para poder utilizar estos modelos de simulación se necesita tener datos de los distintos bloques que componen el ecosistema (suelo, planta y atmósfera). Mucha de esta información puede tenerse caracterizada del sitio del estudio por medio de inventarios y puntos de muestreo de la persona que intenta implementar estos modelos y poder

simular lo que está ocurriendo en el ecosistema. Pero otras muchas veces toda esta información debe obtenerse por medio de datos regionales, nacionales o europeos. Para complementar a los datos regionales y nacionales, que cada usuario puede tener controlados y sabe qué información de cada uno de los tres bloques puede conseguir, como puede ser: estaciones meteorológicas, inventarios forestales, tipos de suelos, etc. Se ha pensado compartir información de bases de datos de carácter global, que puedan dar un valor aproximado y valioso como punto de partida en ciertas ocasiones. Con la ayuda de esta información global, se puede tener información de cualquier parte del mundo de las diferentes variables biofísicas que se necesitan para los modelos de simulación como datos de entrada para poder ser ejecutados. Si es cierto, que los datos que proporcionan estas bases de datos son muy groseros pero muchas veces es mejor que no tener ningún dato. Por tanto, se recomienda que en la medida de lo posible se revise la información que necesitan estos modelos por medio de fuentes locales, regionales o nacionales, y si es posible por medio de muestreos nuestros o monitoreos propio si se pretende tener mucha más exactitud en los resultados que se obtengan.

Modelos Digitales del Terreno

NASADEM: NASA NASADEM
Digital Elevation 30m



NASADEM is a reprocessing of STRM data, with improved accuracy by incorporating auxiliary data from ASTER GDEM, ICESat GLAS, and PRISM datasets. The most significant processing improvements involve void reduction through improved phase unwrapping and using ICESat GLAS data for control. Documentation: User's Guide

Existen distintas bases de datos relacionadas con los MDT, siendo la principal diferencia la resolución espacial que tengan. Dado que los datos son a escala global, la resolución máxima que se puede emplear es de 30 metros. Dependiendo de la escala del trabajo que se quiera ejecutar es un tamaño más que suficiente. O al menos, si el modelo que se va a utilizar es no distribuido, se puede saber el valor puntual de la elevación en el sitio de interés. El enlace de esta información se encuentra:

<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/dem>

Suelo

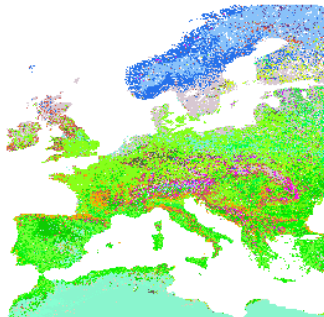
Dentro de la categoría suelo, se pueden encontrar distintas bases de datos por continente sobre multitud de información referente a las características de suelo. En concreto se puede saber, taxonomía, texturas, contenido de carbono orgánico, densidad, pH o conductividad. Toda esta información puede obtenerse puntualmente consultando el mapa o descargándose el área de interés si se va a utilizar modelos distribuidos. El enlace de toda esta información se encuentra:

<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/soil>

A continuación, mostramos cada una de las categorías de suelo que se pueden utilizar.

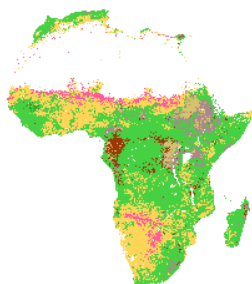
Taxonomía

OpenLandMap USDA Soil
Taxonomy Great Groups



Predicted USDA soil great group probabilities at 250m. Distribution of the USDA soil great groups based on machine learning predictions from global compilation of soil profiles. To learn more about soil great groups please refer to the Illustrated Guide to Soil Taxonomy - NRCS - ...

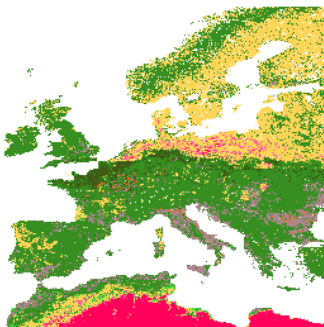
iSDAsoil USDA Texture Class



USDA Texture Class at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be seen. Soil property predictions were made by Innovative Solutions for Decision ...

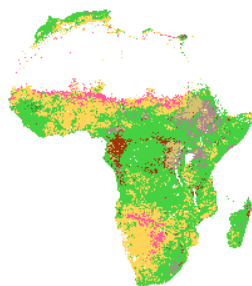
Textura

OpenLandMap Soil Texture Class
(USDA System)



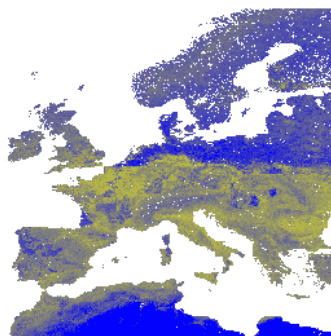
Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m. Derived from predicted soil texture fractions using the soiltexture package in R. Processing steps are described in detail here. Antarctica is not included. To access ...

iSDAsoil USDA Texture Class



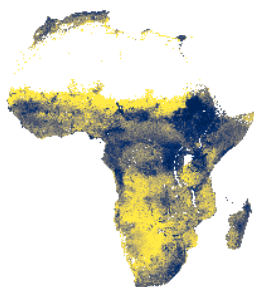
USDA Texture Class at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be seen. Soil property predictions were made by Innovative Solutions for Decision ...

OpenLandMap Sand Content



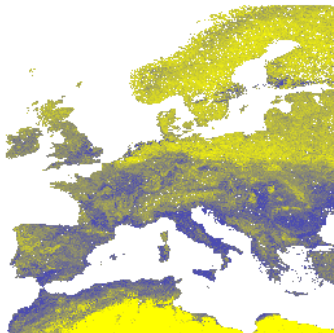
Sand content in % (kg / kg) at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. Based on machine learning predictions from global compilation of soil profiles and samples. Processing steps are described in detail here. Antarctica is ...

iSDAsoil Sand Content



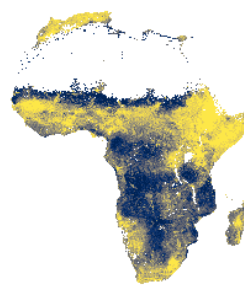
Sand content at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm, predicted mean and standard deviation. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be seen. Soil property predictions were made by Innovative ...

OpenLandMap Clay Content



Clay content in % (kg / kg) at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution Based on machine learning predictions from global compilation of soil profiles and samples. Processing steps are described in detail here. Antarctica is ...

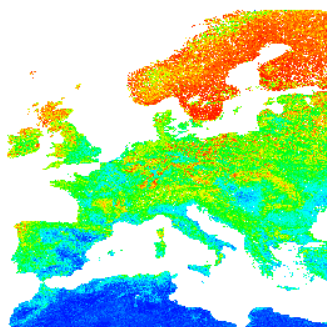
iSDAsoil Silt Content



Silt content at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm, predicted mean and standard deviation. Pixel values must be back-transformed with $\exp(x/10)-1$. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be ...

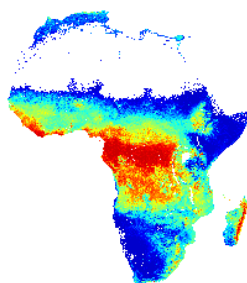
Ph

OpenLandMap Soil pH in H2O



Soil pH in H2O at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution Processing steps are described in detail here. Antarctica is not included. To access and visualize maps outside of Earth Engine, use this page. If you ...

iSDAsoil pH



pH at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm, predicted mean and standard deviation. Pixel values must be back-transformed with $x/10$. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be seen.

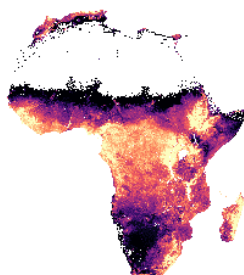
SOC

OpenLandMap Soil Organic Carbon Content



Soil organic carbon content in $\times 5 \text{ g / kg}$ at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution Predicted from a global compilation of soil points. Processing steps are described in detail [here](#). Antarctica is not included. ...

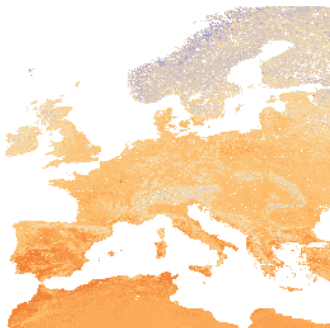
iSDAsoil Organic Carbon



Organic carbon at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm, predicted mean and standard deviation. Pixel values must be back-transformed with $\exp(x/10)-1$. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) might be ...

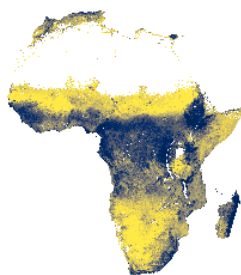
Densidad aparente

OpenLandMap Soil Bulk Density



Soil bulk density (fine earth) $10 \times \text{kg / m}^3$ at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. Processing steps are described in detail [here](#). Antarctica is not included. To access and visualize maps outside of Earth ...

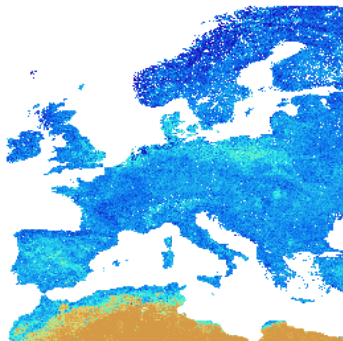
iSDAsoil Bulk Density, <2mm Fraction



Bulk density, <2mm fraction at soil depths of 0-20 cm and 20-50 cm, predicted mean and standard deviation. Pixel values must be back-transformed with $x/100$. In areas of dense jungle (generally over central Africa), model accuracy is low and therefore artifacts such as banding (striping) ...

Contenido de Agua en suelo

OpenLandMap Soil Water Content
at 33kPa (Field Capacity)



Soil water content (volumetric %) for
33kPa and 1500kPa suctions predicted at
6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and
200 cm) at 250 m resolution Training
points are based on a global compilation
of soil profiles: USDA NCSS AfSPDB ISRIC
WISE EGRPR SPADE ...

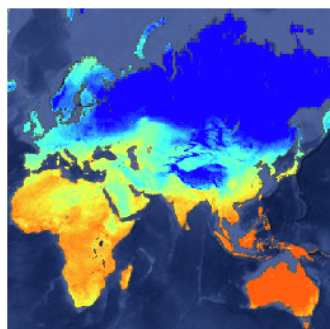
Atmósfera

Este bloque es el más fácil de obtener información de una estación meteorológica cercana, pero para sitios remotos o donde esta información es recientemente nueva o nula. Estas colecciones de datos globales que se pueden encontrar, pueden ser una única opción. En esta sección se puede encontrar múltiples bases de datos relacionado con el clima. Aquí se pueden encontrar diferentes resoluciones temporales (horario, diario o mensual). Además de la resolución espacial que tienen, que dependiendo de la colección que se use cambia.

También hay diferentes variables que se pueden encontrar en estos catálogos, temperatura, evapotranspiración, precipitación, viento y radiación, entre otras. Toda esta información se puede revisar en el siguiente enlace:

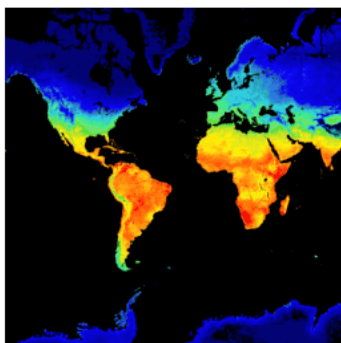
<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/climate>

GLDAS-2.2: Global Land Data Assimilation System



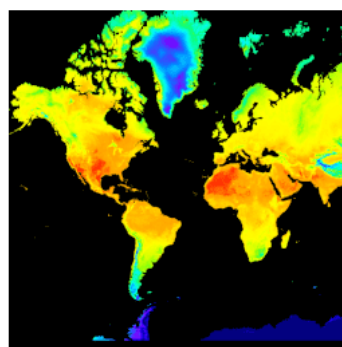
NASA Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) has three components: GLDAS-2.0, GLDAS-2.1, and GLDAS-2.2. GLDAS-2.0 is forced entirely with the Princeton meteorological forcing input data and provides a temporally consistent series from 1948 through 2014. GLDAS-2.1 is forced with a combination of model ...

GCOM-C/SGLI L3 Land Surface Temperature (V3)



This product is the temperature of terrestrial land surface. This is an ongoing dataset with a latency of 3-4 days. GCOM-C conducts long-term and continuous global observation and data collection to elucidate the mechanism behind fluctuations in radiation budget and carbon cycle needed to make ...

ERA5-Land Hourly - ECMWF Climate Reanalysis



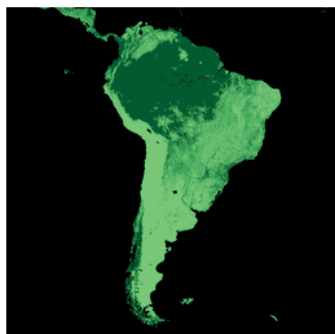
ERA5-Land is a reanalysis dataset providing a consistent view of the evolution of land variables over several decades at an enhanced resolution compared to ERA5. ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate reanalysis. Reanalysis combines model data with ...

Vegetación

Para caracterizar la vegetación se pueden utilizar del mismo modo que en el anterior bloque, información que provenga de bases de datos regionales o nacionales. Si esta información no existe, se puede obtener esta información de estas bases de datos mundiales. En este grupo se pueden tener información que hace referencia al tipo de cobertura que tiene el suelo, Biomasa aérea, LAI, o múltiples misiones satelitales de la que obtener series de índices espectrales. Esta información puede evaluarse y obtenerse en el siguiente enlace:

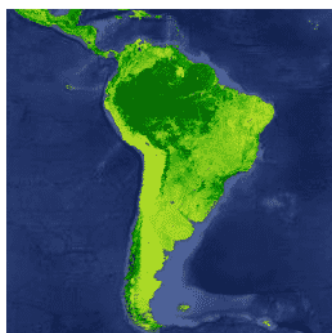
<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/vegetation>

Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps



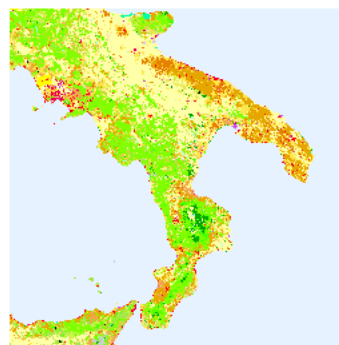
This dataset provides temporally consistent and harmonized global maps of aboveground and belowground biomass carbon density for the year 2010 at a 300-m spatial resolution. The aboveground biomass map integrates land-cover specific, remotely sensed maps of woody, grassland, cropland, and tundra biomass. Input maps were ...

MOD44B.006 Terra Vegetation Continuous Fields Yearly Global 250m



The Terra MODIS Vegetation Continuous Fields (VCF) product is a sub-pixel-level representation of surface vegetation cover estimates globally. Designed to continuously represent Earth's terrestrial surface as a proportion of basic vegetation traits, it provides a gradation of three surface cover components: percent tree cover, percent ...

Copernicus CORINE Land Cover



The CORINE (coordination of information on the environment) Land Cover (CLC) inventory was initiated in 1985 to standardize data collection on land in Europe to support environmental policy development. The project is coordinated by the European Environment Agency (EEA) in the frame of the EU ...

4.3. Parcelas experimentales

Otro gran pilar de la gestión eco-hidrológica es el monitoreo continuado del ecosistema por medio de parcelas experimentales. Esto permite conocer en particular nuestro sitio de estudio y poder reproducirlo correctamente con la simulación. Los datos reales de mediciones continua que toman tienen que ver con la distribución de agua en los distintos estanques del EHV y con ciclo del carbono. Por medio de estos valores se puede calibrar y validar los modelos que se empleen para obtener las variables eco-hidrológicas del ecosistema.

El planteamiento básico parte de una caracterización eco-hidrológica en una parcela tipo, donde se hace un monitoreo detallado de los tres compartimentos que componen el complejo suelo-planta-atmósfera (Fig. 7). Para ello, se emplean tanto medidas automáticas mediante sensores controlados por un sistema de adquisición de datos centralizado (*datalogger*) como medidas manuales de menor periodicidad, pero igualmente importantes para una correcta cuantificación de los flujos, los procesos y las variables de estado.

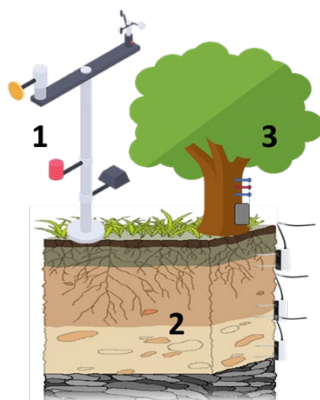


Figura 7. Sensorización del ecohidrovóxel (Fte.: Elaboración propia).

La *meteorología* se cuantifica generalmente a una altura de 2 metros sobre el dosel gracias a una estación climática completa (Fig. 8) instalada en una torre fija. Entre las mediciones, se encuentran las relacionadas con la lluvia, la humedad, temperatura del aire, y otras que permiten la estimación de la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de FAO-Penman-Monteith, variable de gran interés para una descripción adecuada y comparable de la demanda atmosférica.



Figura 8. Detalle de una estación climática completa para la medida de doce variables simultáneamente. Su diseño compacto y su protocolo de comunicación SDI-12 permiten que se pueda programar y descargar la información gracias a la conexión con un sistema de adquisición de datos centralizado.

La *vegetación* se caracteriza tanto en términos hídricos como estructurales y de biomasa. En cuanto al ciclo hidrológico, se llevan a cabo mediciones de transpiración y contenido hídrico del tronco en 6 árboles representativos de las clases diamétricas de la parcela bajo estudio. Para la transpiración se emplean sensores de flujo de savia (Fig. 9) basados en la estimación de la velocidad de un pulso de calor tanto aguas arriba como aguas abajo del emisor, de manera que varios termopares registran el aumento de la temperatura y con ello la velocidad. Para el caso de la humedad del tronco, se utilizan sensores diseñados originariamente para el suelo, pero calibrados en laboratorio para el xilema bajo estudio. Para ambos tipos de medidas se instala un sensor por árbol en la misma orientación y a la altura del pecho (1.30 m sobre el suelo).



Figura 9. Detalle del sensor flujo de savia propuesto para estimar la transpiración (modelo UGT SFM-4 Sensor) (Fte.: UGT, Umwelt-Geräte-Technik GmbH).

A la misma altura que los sensores anteriores, se disponen dendrómetros de banda que permiten medir la variación diaria que representa el crecimiento secundario (incremento en diámetro). Se procede a instalar también un sensor por árbol monitoreado. Al igual que en el caso de las mediciones atmosféricas, el protocolo de comunicación SDI-12 permite que se pueda programar y descargar la información gracias a la conexión con el sistema de adquisición de datos centralizado.

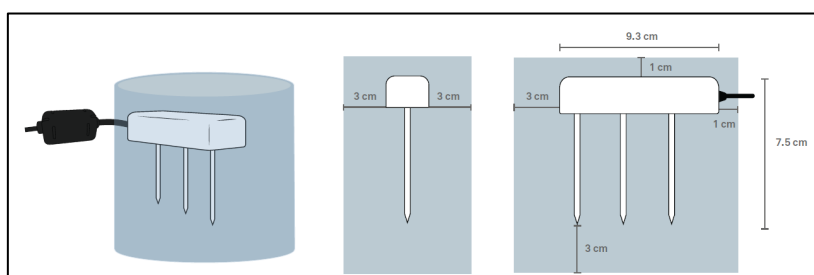


Figura 10. Sonda propuesta para medir el contenido hídrico del tronco y suelo (modelo Teros 11), con especificaciones del volumen explorado. Esta sonda a su vez mide temperatura (Fte.: Meter Group).

En cuanto al *suelo*, cada árbol monitoreado llevará asociado sondas de humedad del suelo (Fig. 10) en 2 puntos de muestreo y a 3 profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm) (6 sondas por árbol), además de una sonda de potencial hídrico a la profundidad intermedia de 15-30 cm. Paralelamente, se llevará a cabo un muestreo al inicio del experimento para obtener las propiedades edafológicas más comunes tales como la pedregosidad, la textura, la densidad aparente y el carbono y nitrógeno orgánicos, entre otras. Además, se recomienda la instalación de medidores de caudal tipo Parshall en

aquellas parcelas donde existan regueros o cauces próximos. Igualmente, se propone hacer piezómetros en zonas basales de conexión con la capa freática local.

Gracias a la combinación de parcelas eco-hidrológicas y de los modelos de simulación, se puede saber que está ocurriendo en el espacio y en el tiempo en las multitudes de procesos que suceden en el ecosistema. Además de ver como un cambio en la masa afecta a cada uno de ellos.

5. Optimización multiobjetivo DSS CAFE

La DSS CAFE se revelan como una potente herramienta capaz de llevar el concepto de la multifuncionalidad desde el plano teórico al práctico. Dado el gran abanico de uso en el que se puede emplear, esta herramienta se hace muy polivalente y versátil en la planificación de la gestión forestal. Ya que, permite configurar los diferentes tipos de bosques con multitud de opciones de gestión. Además, da la opción al gestor de poder ser ajustada en diferentes niveles. Pudiendo utilizarse de forma básica con los valores iniciales que se adjuntan como ejemplo con la herramienta, donde el usuario ajusta brevemente información de partida. Así, puede obtener los valores potenciales fácilmente sin necesidad de profundizar en la parte de simulación. De este modo, el gestor puede tener unos umbrales potenciales para cada uno de los SE calculados por la herramienta. Mientras que, si cumple con las indicaciones propuesta por este manual, puede ajustar mucho más su caso de estudio.

Por tanto, y recopilando todos los puntos visto hasta ahora, una vez que vas a utilizar la DSS los pasos que se deben plantear para hacer una gestión forestal multifuncional son:

- Ver la vocación y potencialidad del territorio a producir cada uno de objetivos CAFE para priorizar y dirigir la gestión.
- Ver qué gestión forestal se pretende abordar.
- Ajustar los procesos eco-hidrológicos al área de estudio.

Una vez que esto se tiene claro, es el momento de empezar a trabajar dentro de la DSS. En este momento, es cuando hay que saber transcribir esta información que se tiene de la planificación de la gestión que se necesita hacer y que se va a aplicar en la herramienta.

Por lo tanto, aquí se verán los pasos que se deben de pensar y llevar a cabo dentro de la interfaz de la DSS.

- 1) **Modelo a emplear:** se empieza pensando y seleccionando el modelo de simulación correcto para obtener la planificación de gestión de la masa. Aquí, en función del tipo de masa que se pretenda gestionar puede ser empleado un modelo u otro. Modelo distribuido: masas heterogéneas “RHEssys”, principalmente bosques protectores. Modelos no distribuidos: masas homogéneas “BIOME”, principalmente bosques productores. También, en función de la gestión que se busque. Si es calcular densidad de plantación “BIOME” y si es muchas preguntas sobre las claras (¿Dónde?, ¿Cuándo?, ¿Cuánto? Y ¿Como?) “RHEssys”.
- 2) **Preguntas de Gestión:** Enlazando con el punto anterior, se seleccionan las preguntas a las que debe dar respuesta la herramienta para determinar el plan de acción optimizado. Es, por tanto, que se deben de saber cuales son las acciones de gestión que se quieren incluir. Primero ver si las acciones de gestión incluyen plantación y corta o solo una de ellas. Si se quieren saber ambas, solo se puede utilizar el modelo BIOME que es el que la integra. Sin embargo, ya se

saben sus limitaciones, solo funciona por un estrato y no es distribuido. Mientras que, si se quiere saber características de como debe ser las claras, se puede emplear cualquier modelo. Aquí, el que responde las 4 preguntas sobre las claras es RHESsys. Los demás modelos no integran en su planificación de la gestión respuesta a todos estos criterios de la acción.

- 3) Servicios Ecosistémicos a optimizar:** Aquí es el punto donde el gestor sabe que métricas (SE) quiere incluir en la optimización para determinarle el plan de gestión que los maximice o minimice cada uno de los bienes o servicios que interesen incluir. Solo pueden seleccionarse 5 objetivos a optimizar, los demás serán simplemente cuantificados. En este punto, es cuando todo el trabajo previo que recomienda esta guía tiene importancia para saber escoger los SE que están involucrados. En este punto, el gestor debe seleccionar a cada métrica que calcula la DSS CAFE dependiendo del modelo empleado, si quiere maximizarlo, minimizarlo o simplemente cuantificarlo (Fig.11).

Metrics	Optimization type			Models
☒ Biodiversity	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys, Biome
☒ Biomass	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys, Tetis
☒ Carbon	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys
☒ DeepMoisture	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	Biome
☒ Evaporation	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	Tetis
☒ Improve	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys
☒ Kdbi	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys
☒ NEP	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	Biome
☒ Percolation	☐ Maximize	☐ Minimize	☒ Info	RHESsys, Biome, Tetis

Figura 11. Métricas a seleccionar en DSS.

Con todo esto claro, se puede lanzar la ejecución de CAFE (siempre que los datos hayan sido ajustados a la zona de estudio, los valores deben ser calibrados y validados previamente). Por tanto, en este punto la herramienta puede demorarse hasta varias horas si la zona de estudio o el periodo de simulación es muy extenso. Es momento de esperar y tener paciencia.

6. Aplicación

Una vez que la herramienta es ejecutada, los resultados son obtenidos en la parte de visualización. La herramienta aporta diversas soluciones de gestión, puesto que es una herramienta de soporte, no reemplaza o sustituye el juicio y la participación del gestor. La DSS propone diversas opciones de gestión y cómo cada una, da aprovisiones de los diversos servicios ecosistémicos generados de esas intervenciones. Es aquí, cuando el gestor debe interactuar por última vez con la herramienta para filtrar y seleccionar la solución más apropiada según su criterio experto. Para realizar este paso, la DSS tiene la parte de visualización interactiva que facilita al usuario el filtrado de las soluciones.

Aquí el gestor puede apoyarse en los criterios utilizados en la vocación para hacer el filtrado. Es decir, el gestor debe seleccionar una solución en base a lo que quiera obtener prioritariamente. Dicho de otra forma, debe priorizar de que bienes y servicios prefiere sacar valores más altos o bajos y en función de eso ir seleccionando una y otra soluciones (Fig. 12). En este paso de priorización para a la selección de la solución factible, también se puede hacer una reunión final en los procesos de Living Lab con lo SH que han participado en el proceso.

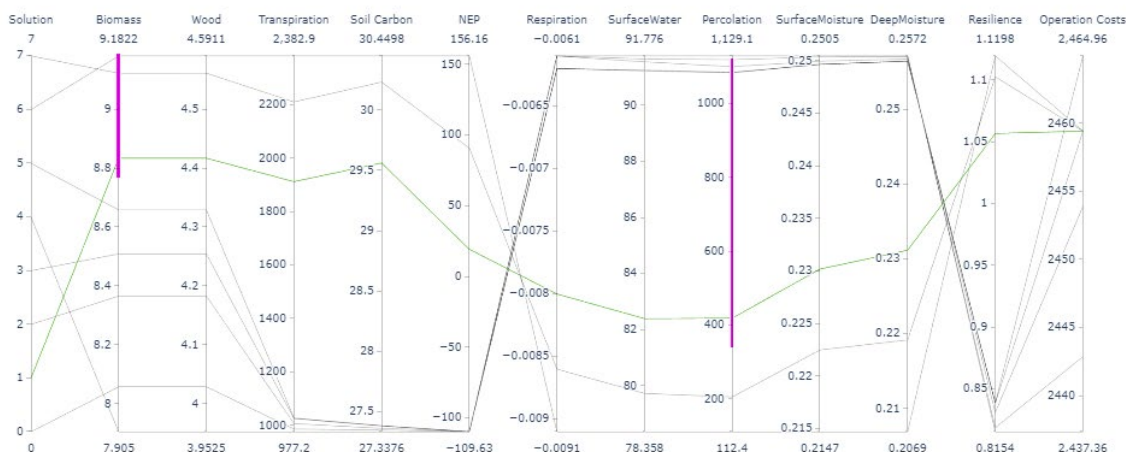


Figura 12. Ejemplo de filtrado priorizando biomasa extraída y agua percolada.

Mientras que una vez que se tiene la solución definitiva, esta hay que llevarla a la realidad. Es decir, en el momento de realizar una actuación forestal que proponga la herramienta, hay que adaptarla para que pueda ser aplicada sobre el terreno. Esto es necesario de saber, puesto que puede sufrir una cierta variación puesto que el medio natural siempre presenta dificultades. Con saber si el tipo de actuación forestal que te aconseja la DSS es bajo, medio o alto, puede ajustar las actuaciones selvícolas más o menos a estos criterios. Del mismo modo, saber si el momento de volver a intervenir es corto plazo, medio o largo. También ayuda a orientar como destinar cada año las actuaciones forestales sobre los distintos bosques que se estén gestionando.

7. Referencias

- del Campo, A.D., González-Sanchis, M., Lidón, A., García-Prats, A., Lull, C., Bautista, I., Ruíz-Pérez, G., Francés, F., 2017. Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate, in: Křeček, J., Haigh, M., Hofer, T., Kubin, E., Promper, C. (Eds.), *Ecosystem Services of Headwater Catchments*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45–57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57946-7_6
- del Campo, A.D., González-Sanchis, M., García-Prats, A., Ceacero, C.J., Lull, C., 2019. The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice. *Agricultural and Forest Meteorology* 264, 266–282. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.016>
- Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M.Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Nagy, Z., 2016. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities. *Geosci. Model Dev.* 9, 4405–4437. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>.

Kaim A, Cord AF, Volk M. 2018. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environ Model Softw* [Internet]. 2018; 105:79–93. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.031>

Pasquato, M., Medici, C., Friend, A.D., Francés, F., 2015. Comparing two approaches for parsimonious vegetation modelling in semiarid regions using satellite data. *Ecohydrology* 8, 1024–1036. <https://doi.org/10.1002/eco.1559>

Ruiz-Pérez, G., Koch, J., Manfreda, S., Caylor, K., Francés, F., 2017. Calibration of a parsimonious distributed ecohydrological daily model in a data-scarce basin by exclusively using the spatio-temporal variation of NDVI. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 6235–6251. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6235-2017>

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* 1, 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Tague, C.L., Band, L.E., 2004. RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *Earth Interact.* 8, 1–42. <https://doi.org/10.1175/1087-3562>