Resultados del proyecto LIFE BIOREFFORMED (2019-2024)

LIFE
Biorefformed

Uso de la biomasa forestal en procesos de biorrefinería

¿Una oportunidad para poner en valor la biomasa generada en actuaciones silvícolas de adaptación y restauración?

DOCUMENTO TÉCNICO PARA EL SECTOR FORESTAL

Edita: Centro de la Propiedad Forestal. Generalitat de Catalunya. Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona). www.cpf.gencat.cat

Cita recomendada: Baiges, T.; Cervera, T.; Palero, N.; Pedret, M., Puy, N. Rovira, P., Vayreda, J., Fábregas, E., Gabarrell, X., Ayxela, L. (2024). Uso de la biomasa forestal en procesos de biorrefinería. ¿Una oportunidad para poner en valor la biomasa generada en actuaciones silvícolas de adaptación y restauración? Resultados del proyecto LIFE BIOREFFORMED (2019-2024).

Diseño gráfico y maquetación: CTFC

lifebiorefformed.eu

El proyecto LIFE BIOREFFORMED ha sido cofinanciado por el programa LIFE Environment and Resource Efficiency de la Unión Europea.

CC BY NC SA

Socios

CTFC · ENERG-bas · CREAF · UAB Universitat Autònoma de Barcelona · ICTA Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals ICTA-UAB · Generalitat de Catalunya Centre de la Propietat Forestal

Cofinanciadores

Diputació Barcelona

ÍNDEX

1/ Uso de la biomasa forestal en procesos de biorrefinería. ¿Una oportunidad para poner en valor la biomasa generada en actuaciones silvícolas de adaptación y restauración? 4

El proyecto LIFE BIOREFFORMED (2019-2024) 4

Biomasa procedente de actuaciones de adaptación y restauración de alcornocales y pinares mediterráneos 5

¿Qué productos se obtienen en una biorrefinería? 6

2/ Principales resultados del proyecto LIFE BIOREFFORMED 8

Proceso y productos finales obtenidos 8

Eficiencia de los distintos tipos de biomasa forestal testada 9

Rendimiento e impacto de la extracción de biomasa forestal 10

Rendimiento e impacto de la biorrefinería 11

3/ Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de pinares densos de regenerado posincendio de pino carrasco 12

Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas 13

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería 13

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa 13

Principales retos técnicos y logísticos 14

Productos de biorrefinería obtenidos y rendimientos 14

4/ Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de pinares afectados por perturbaciones naturales (bióticas o abióticas) 16

Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas 17

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería 17

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa 17

Principales retos técnicos y logísticos 18

Productos químicos obtenidos y rendimientos 18

5/ Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de la gestión de adaptación de alcornocales al nuevo contexto climático 20

Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas 21

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería 21

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa 22

Principales retos técnicos y logísticos 22

Productos químicos obtenidos y rendimientos 23

1 Uso de la biomasa forestal en procesos de biorrefinería. ¿Una oportunidad para poner en valor la biomasa generada en actuaciones silvícolas de adaptación y restauración?

La biomasa forestal primaria es un producto renovable con un alto potencial de contribución a la transición hacia una bioeconomía inclusiva que aumente, al mismo tiempo, la resiliencia de los paisajes agroforestales. Dentro de los posibles usos de la biomasa forestal, la obtención de componentes químicos para diferentes industrias mediante procesos de biorrefinería se contempla como una alternativa cada vez más viable para sustituir compuestos que hoy son derivados del petróleo.

Por otra parte, los bosques mediterráneos se encuentran en un momento de transición: cada vez es más patente la vulnerabilidad de muchas masas forestales al cambio climático y a sus efectos (sequías, plagas, tolvaneras, incendios...). Para hacerle frente, existen diversas actuaciones silvícolas que pueden reducir su vulnerabilidad, presente y futura, o restaurar su función productiva, social y ambiental. Sin embargo, estas actuaciones suponen una inversión económica, con nulo o bajo retorno a corto plazo.

El proyecto LIFE BIOREFFORMED (2019-2024)

En el marco del proyecto LIFE Biorefformed (LIFE19 ENV/ES/000544) *Implantación de una biorrefinería mediterránea para impulsar la gestión forestal sostenible a través de la obtención de productos de valor añadido*, se ha explorado la posibilidad de aprovechar en procesos de biorrefinería parte de la biomasa forestal generada en actuaciones silvícolas de adaptación, para lo cual se ha analizado toda la cadena de valor, desde la extracción en el bosque hasta la industria.

El objetivo del proyecto era doble:

- Testar la idoneidad de diversas especies arbóreas y arbustivas mediterráneas para ser usadas en procesos de torrefacción y pirólisis a fin de obtener productos químicos renovables y biocombustibles.

- Explorar la posible contribución de estos productos de alto valor añadido a la financiación de actuaciones silvícolas de mejora enfocadas a aumentar la resiliencia del bosque y su cadena de valor.

Biomasa procedente de actuaciones de adaptación y restauración de alcornocales y pinares mediterráneos

El proyecto LIFE BIOREFFORMED ha trabajado sobre **tres tipos de bosque prioritarios**:

1. **Pinares jóvenes de regenerado de pino carrasco posincendio:** zonas donde la regeneración natural después del incendio ha tenido éxito pero que presentan densidades excesivas. Si no se aplican tratamientos silvícolas, el crecimiento se estanca, se alarga la fase de alta vulnerabilidad a nuevos incendios y, al retrasarse la producción de piñón, se compromete la regeneración futura del arbolado en caso de incendio recurrente.

2. **Pinares adultos afectados por una perturbación natural reciente distinta del fuego** (daño biótico o abiótico). El aumento de la aridez debilita la vegetación y la hace más proclive a plagas y enfermedades, y a sufrir efectos más adversos. Esto es especialmente relevante en pinares densos o con un sotobosque abundante de quercíneas. Las afectaciones son cíclicas y con un grado y una mortalidad difíciles de predecir. La propia perturbación, o las cortas sanitarias posteriores, pueden generar masas desestructuradas que comprometen sus funciones productivas y ecológicas.

3. **Alcornocales envejecidos con una densidad de árboles excesiva y síntomas de decaimiento o alcornocales muy vulnerables a sequías o incendios** que es necesario adaptar a las nuevas condiciones climáticas. Se considera que, actualmente, dos tercios de los alcornocales catalanes en producción están ubicados en zonas que quedarán fuera de su rango ecológico en el año 2050.

Para cada una de estas situaciones, se han definido los tratamientos silvícolas más adecuados desde un enfoque multifuncional y se ha buscado optimizar la restauración de diferentes servicios ecosistémicos a la vez.

Estos tratamientos se han aplicado a nueve rodales demostrativos en diferentes condiciones, para evaluar la viabilidad, técnica y económica, de utilizar parte de la biomasa generada para obtener productos de interés para la industria química e identificar las limitaciones y oportunidades.

Las especies y tipos de biomasa cuya viabilidad se ha testado en procesos de biorrefinería han sido:

1. Pino carrasco joven (*Pinus halepensis*): madera con corteza fina, ramas y hojas.
2. Pino carrasco (*Pinus halepensis*): madera con corteza.
3. Pino piñonero (*Pinus pinea*): madera con corteza.
4. Encina (*Quercus ilex*): madera con corteza.
5. Alcornoque (*Quercus suber*): madera con corteza (leña).
6. Castaño (*Castanea sativa*): madera de castaño muerto, con corteza.
7. Brezo (*Erica arborea*.): madera, ramas y hojas.
8. Madroño (*Arbutus unedo*): madera, ramas y hojas.

¿Qué productos se obtienen en una biorrefinería?

De la biorrefinería, se obtienen siempre tres fracciones: líquida (*bio-oil*), sólida (*biochar* o biomasa torrefacta, según la temperatura del proceso) y gas.

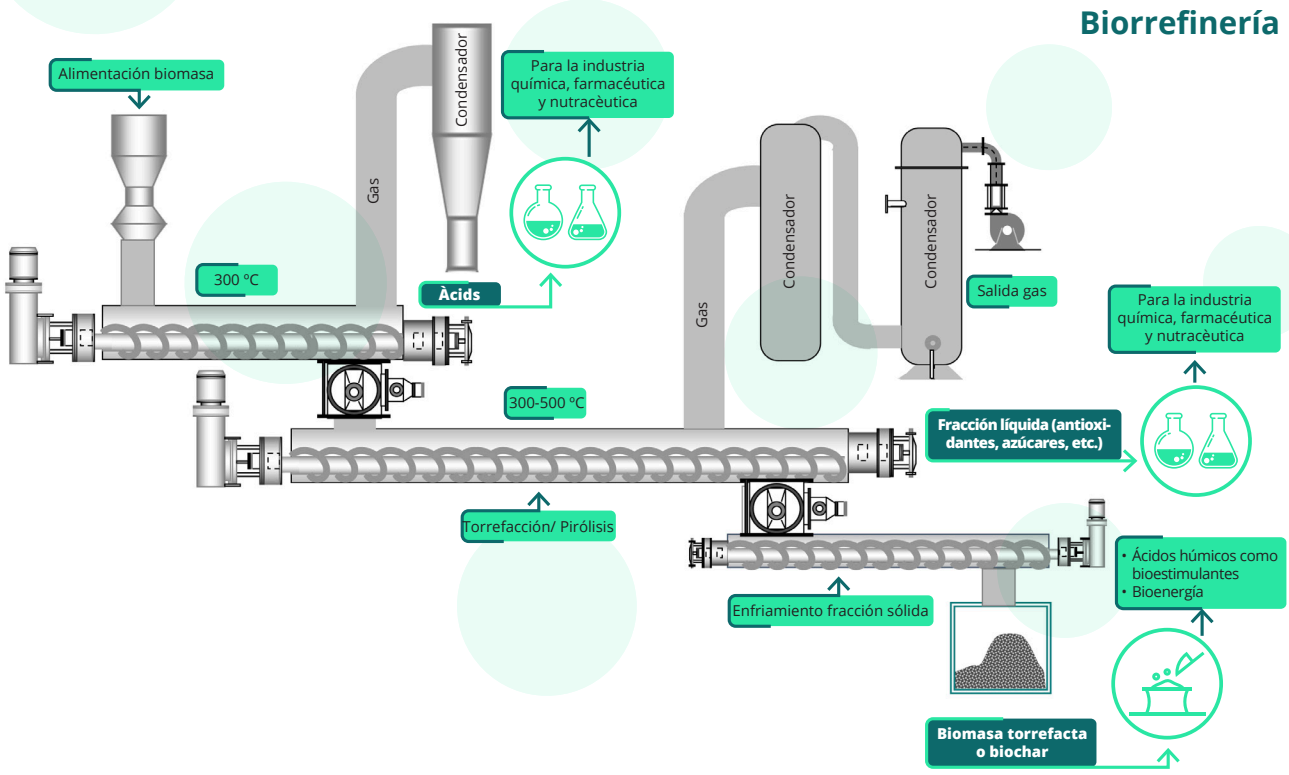


Figura 1. Esquema del proceso de biorrefinería.

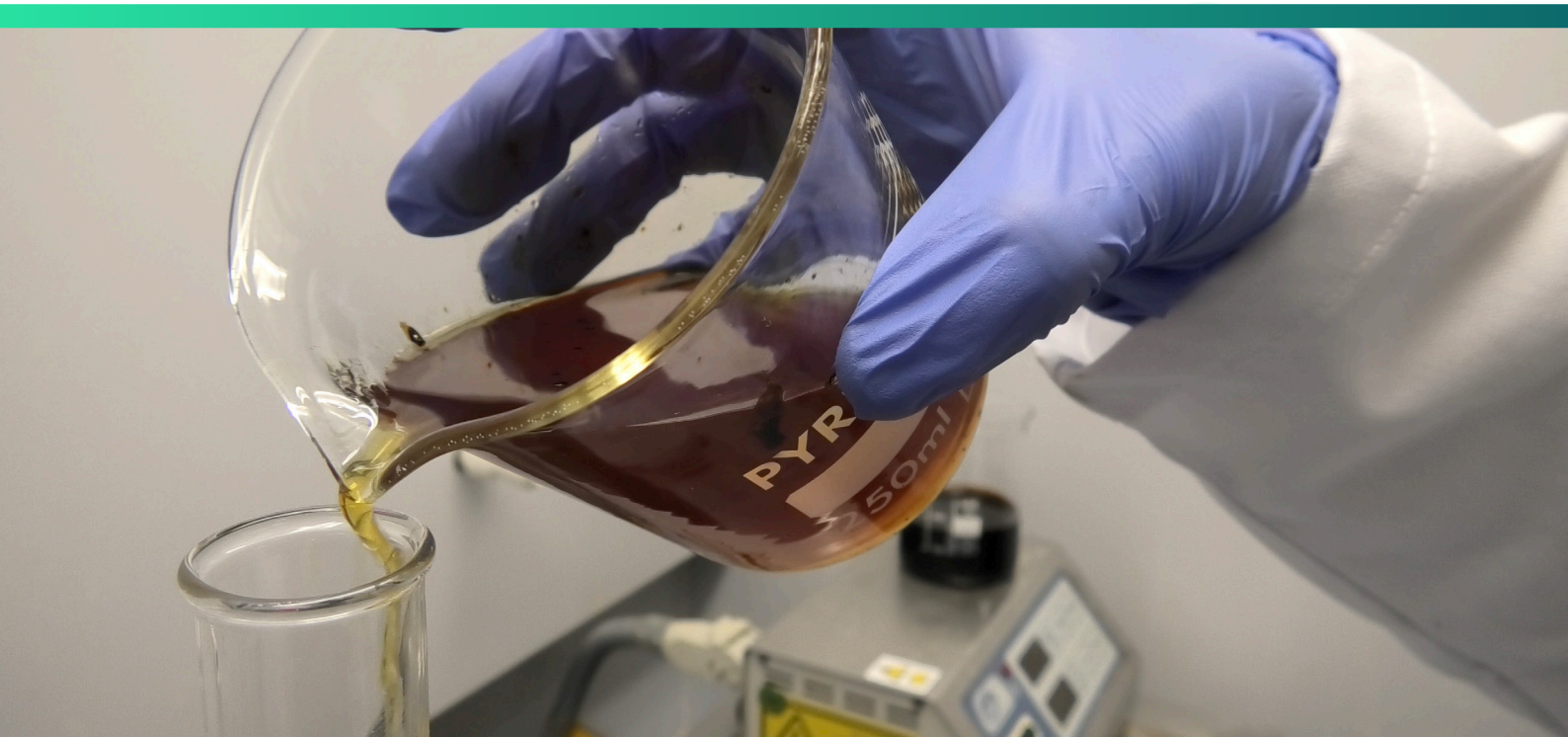
A partir de la **fracción líquida** (*bio-oil*), se pueden extraer una serie de compuestos de interés para la industria nutracéutica, alimentaria, cosmética, farmacéutica y química, como azúcares, antioxidantes (polifenoles), ácidos o resinas fenólicas. Para ello, es necesaria una segunda transformación, que en el proyecto se ha llevado a cabo a escala del laboratorio. Para conseguir implantarlo a escala industrial, haría falta escalar estas tecnologías. Los resultados referentes al rendimiento y al impacto de la biorrefinería solo hacen referencia a la primera transformación de la biomasa en *bio-oil*.

La **fracción sólida** obtenida se conoce como biomasa torrefacta cuando se obtiene a bajas temperaturas (hasta 300 °C) o como *biochar,* o biocarbón, si se obtiene por encima de los 400 °C. A partir de la biomasa torrefacta pueden obtenerse extractos húmicos y fúlvicos, que se utilizan como bioestimulantes en agricultura. El biochar, por su parte, puede utilizarse como estructurante del suelo para secuestrar el carbono y mejorar la retención de agua, o como biocombustible.

2 Principales resultados del proyecto LIFE BIOREFFORMED

Proceso y productos finales obtenidos

- La biomasa forestal se ha transformado mediante el proceso de la pirólisis y se ha obtenido **biochar (sólido) y bio-oil (líquido),** con diferentes usos según sus propiedades.
- Se ha observado que para producir bio-oil y para obtener compuestos de interés de mayor calidad y biochar a partir de biomasa forestal la **temperatura óptima** es de 450 °C. Por el contrario, para la producción de bioestimulantes a partir de la fracción sólida, de interés en la agricultura, la temperatura óptima ha sido de 300 °C.
- Los **productos obtenidos del bioaceite a 450 °C** con pino carrasco han sido compuestos **antioxidantes** (4 g por kilogramo de biomasa), **azúcares** (11 g por kilogramo de biomasa), **ácidos** (35 g por kilogramo de biomasa) y **resinas fenólicas**.
- Se ha desarrollado con éxito **un proceso integral multiobjetivo** de extracción y separación basado en técnicas de biorrefinería de compuestos de valor añadido a partir del bio-oil, de forma que con un solo proceso se puede obtener todos los productos químicos descritos, con una pureza igual o superior a la esperada.
- El **biochar** generado en este proceso ha demostrado no tener ningún efecto inhibidor de la actividad microbiana en el suelo, por lo que puede utilizarse como estructurante del suelo y con interés para la retención de agua. Este biochar también puede utilizarse como biocombustible con un rango de poder calorífico inferior, entre 23 y 30 MJ/kg.
- Los **bioestimulantes obtenidos a partir de la biomasa forestal torrefacta a 300 °C** son de alta calidad y todavía tienen margen de mejora. Sus propiedades son similares a los bioestimulantes obtenidos a partir de compost vegetal.



Eficiencia de los distintos tipos de biomasa forestal testada

- De los distintos tipos de biomasa forestal procesada en el proyecto, se han obtenido cantidades similares de compuestos de interés. Por tanto, se puede concluir que **no hay diferencias importantes entre las especies arbóreas de maderas duras o blandas, ni entre estas y las especies arbustivas**.
- Esto sugiere, por un lado, la **viabilidad del uso de todas las especies forestales testadas en este tipo de biorrefinería** y, por otro, la **posibilidad de mezclarlas y dar salida a biomasa de difícil aprovechamiento alternativo**, tales como i) matorral o arbolado pequeño con corteza y hojas procedente de desbroces o claras de repoblado,ii) leña (madera y corcho) procedente de cortas de selección en alcornocales o iii) madera mezclada de diferentes especies y características procedente de actuaciones posperturbación que generan poco volumen de madera.
- Entre las **especies arbóreas** estudiadas, los **pinos** (sobre todo el pino carrasco) han sido los mejores para la producción de compuestos antioxidantes (como el guayacol, catecol, fenol y vanilina, entre otros). El **castaño** y el **alcornoque** son los que han dado mejores resultados en la producción de extractos húmicos como estimulantes de la actividad microbiana del suelo y del crecimiento vegetal. Las **especies arbustivas**, como el brezo, han dado muy buenos resultados, sobre todo en lo que se refiere a la producción de ácidos, como el ácido acético.

Tabla 2.1. Rendimientos a 400 ºC (g producto/kg biomasa) y uso potencial de los productos obtenidos en el procesamiento de la biomasa procedente de los rodales demostrativos en la microbiorrefinería del LIFE BIOREFFORMED.

Bio-productos obte-nidos		Regene-rado pino carrasco	Pino ca-rrasco	Pino piño-nero	Encina	Al-cornoque	Castaño	Ma-droño	Brezo	
Fracción líquida	**Ácidos** Ácido acético Acido fórmico	21,1	17,6	16,0	19,8	17,6	11,5	11,9	25,6	Productos químicos farmacéuticos o aditivos alimentarios
	Azúcares Levoglucosano	8,3	9, 5	6,9	5,9	2,7	5,9	2,9	9,6	Compuestos de alto valor económico con aplicaciones en la industria química y alimentaria para su uso como plataforma química
	Aldehídos y cetonas Hidroxiacetona, Metilciclopentenolona, Furfural, 5HMF	6,4	5,4	3,8	6,0	2,9	2,1	2,4	5,4	Diversidad de aplicaciones en la industria química y alimentaria, des de aromatizantes hasta plataformas químicas
	Antioxidantes Fenol, Catecol, Vainillina, Guaiacol, p-creosol, p-cresol	4,4	4, 6	4,0	2,5	1,1	0,7	0,6	2,3	Industria cosmética, farmacéutica, nutracéutica, química y alimentaria, para su uso como antioxidantes, aromatizantes y reactivos para la síntesis de resinas fenólicas
	Resinas fenólicas	2,38	1,43	3,33	2,01	1,34	2,33	1,67	2,01	Adhesivo o aditivo en pinturas
	Lignina pirolítica	13,5	8,1	18,9	11,4	7,60	13,20	9,50	11,40	Combustible, precursor de materiales carbonosos y síntesis de adhesivos y aditivos
Fracción sólida	**Ácidos húmicos** (g/100 mL) Extracción a 300ºC	1,37	1,19	1,46	1,55	2,31	2,37	1,63	1,43	Abono de suelos agrícolas
	Biochar (MJ/kg) Extracción a 450 ºC	25,8	26,2	29,9	24,2	16,6	22,7	22,1	23,1	Enmienda de suelo agrícola o biocombustible

Rendimiento e impacto de la extracción de biomasa forestal

- **El aprovechamiento de la biomasa en biorrefinerías puede justificar la extracción parcial de la biomasa procedente de tratamientos de adaptación/restauración**, biomasa que, en muchas ocasiones, queda troceada en el bosque.

- **Es importante que en la extracción de biomasa para biorrefinería en bosques adultos se dejen las copas en el bosque**, ya que la copa (ramas y hojas) contiene un 60% del nitrógeno y potasio de la parte aérea y hasta un 50% del fósforo, de muy difícil recuperación natural. Solo **la extracción de biomasa de regenerado de pino carrasco o matorral se hace a matarrasa y se extrae al individuo entero**, pero el aprovechamiento se concentra en las zonas accesibles (franjas a ambos lados de los caminos), lo que a escala de rodal **representa un 10 % de la biomasa total** y contribuye, a su vez, a la prevención de los incendios forestales.

- **Los cuellos de botella del aprovechamiento de biomasa procedente de actuaciones de adaptación/restauración son los bajos rendimientos por hectárea** (el rendimiento medio en los rodales demostrativos ha sido de 13 t/ha) **y los altos costes de extracción**, que actualmente es manual. Las fichas que complementan este documento detallan los valores obtenidos en los distintos rodales demostrativos.

- Tras las actuaciones, las existencias de carbono aéreo son, lógicamente, menores debido a la corta y extracción de parte de la biomasa, pero **la reducción en las existencias de CO_2 solo se puede contabilizar como emisión neta de CO_2 si a corto plazo el material se destina a biocombustible**. Se espera un **efecto sumidero de CO_2** a causa de un aumento del crecimiento como consecuencia del tratamiento, pero todavía es imperceptible por el poco tiempo transcurrido.

- Una gestión forestal que se acompañe de la **valorización del patrimonio socioecológico histórico** (tangible e intangible) ligado a ese bosque puede promover los **Servicios Ecosistémicos Culturales** que ofrecen las fincas forestales. En este sentido, acciones como el mantenimiento de expresiones orales o conocimiento tradicional sobre el bosque y su gestión fomentan la transmisión de conocimiento, que **es a su vez una estrategia de resiliencia**.

Rendimiento e impacto de la biorrefinería

- Para que la biorrefinería empiece a ser rentable, es necesaria una alimentación de 1-2 t de astilla/hora, lo que supone aproximadamente de 6000 a 10.000 t de biomasa al año. **El escenario óptimo sería hacer rentable la biorrefinería con plantas pequeñas (microbiorrefinerías)** lo cual permitiría reducir los costes y el impacto del transporte, y abriría la puerta a la **posibilidad de que la planta fuera móvil**.

- Tanto para mejorar la rentabilidad económica como para reducir el impacto ambiental de todo el proceso, habría que optimizar las operaciones de extracción de la biomasa y su transporte, lo que implica **situar las biorrefinerías de forma estratégica en el territorio** y **optimizar las operaciones de pretratamiento** (almacenamiento y segundo astillado) y la carga de producto a procesar.

- Dentro de los costes operativos de la biorrefinería, **el coste más elevado es la compra de biomasa** seguido del coste de electricidad. El alto consumo de electricidad dificulta su ubicación en zonas con difícil acceso a la red y hay que explorar alternativas para generar energía como el uso de la propia biomasa o el biochar o la energía solar.

- **Buscar la producción de bio-oil a partir de la biomasa tiene sentido, desde el punto de vista ambiental**. La biorrefinería, con una temperatura de pirólisis de 400°C, ha resultado ser una alternativa viable y sostenible: **la producción de bio-oil y ácidos es 3,7 veces menos impactante que la producción combinada de los mismos productos mediante procesos industriales**. En cuanto a emisiones de CO2eq, el impacto global es de 0,5 kg de CO2 eq/kg de biomasa entrada para la mayoría de los productos, con la mayor parte asociada al astillado, seguido de los trabajos forestales y el transporte.

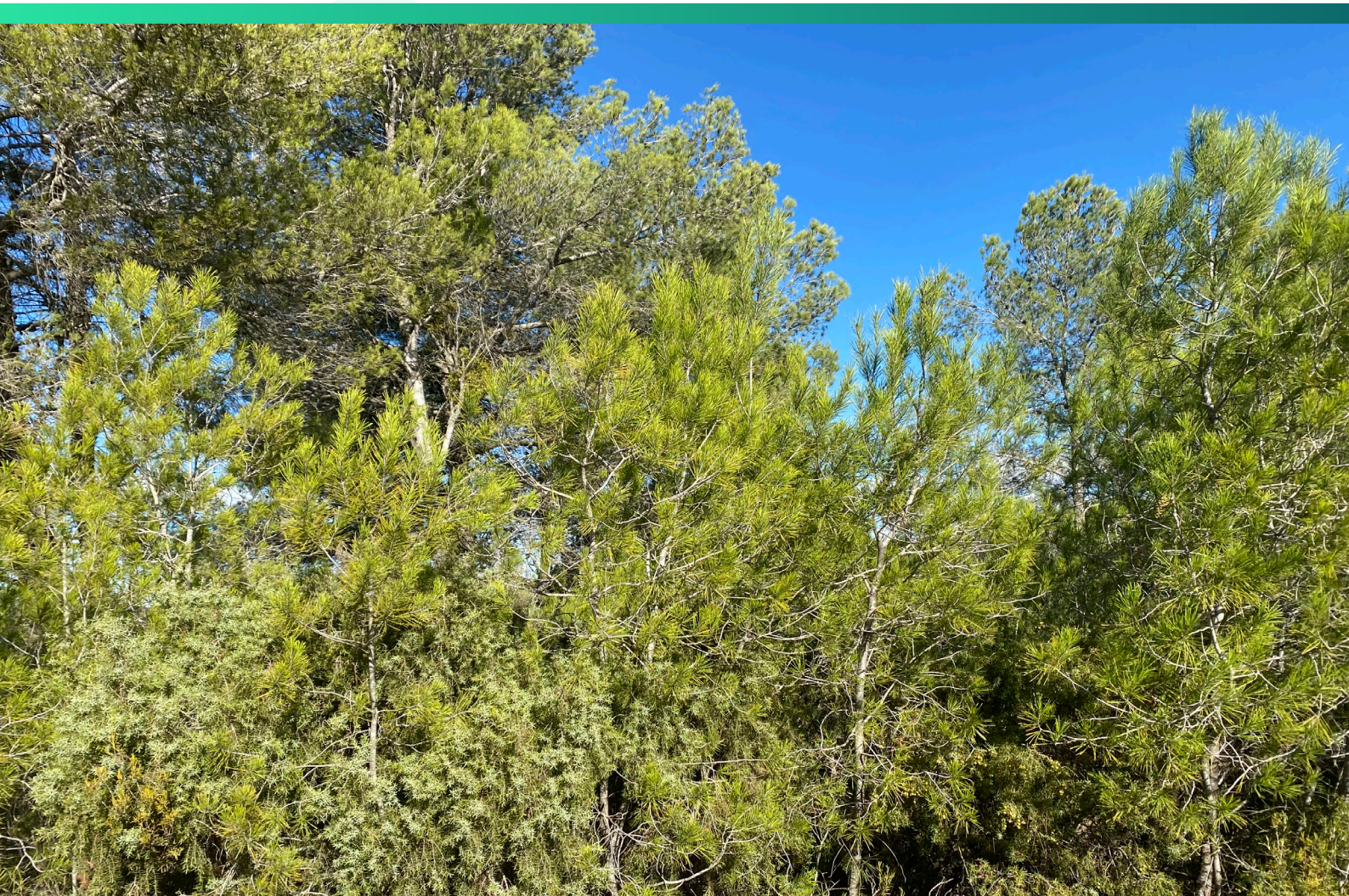
- Complementar la venta de los productos generados con la **posibilidad de vender créditos de CO_2 ligados a la producción de biochar** como sumidero de carbono puede contribuir a mejorar la rentabilidad de la biorrefinería y su impacto global.

3 Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de pinares densos de regenerado posincendio de pino carrasco

El pino carrasco es una especie extremadamente adaptada al fuego y al clima por su gran capacidad de colonización de suelos pobres, una alta resistencia a los periodos de sequía, la presencia de un banco de semillas de dosel (piñas serótinas) que se dispersan después de un incendio y su precocidad en la producción de semillas viables. Estas dos últimas características muestran la adaptación de la especie a una elevada recurrencia del fuego.

En Cataluña, los bosques dominados por el pino carrasco (*Pinus halepensis*) cubren aproximadamente 315.000 hectáreas. Durante el periodo entre los años 1986 y 2020 se han quemado un total de 40.000 hectáreas de esta especie, de las cuales se estima que más de la mitad (unas 28.000) tienen un regenerado de pino sobre el que ya se podrían aplicar tratamientos silvícolas. La densidad del regenerado natural de pino carrasco después de un incendio suele ser alta, aunque, si la recurrencia de incendios es elevada, la regeneración del arbolado puede verse comprometida.

El periodo que va desde el reclutamiento de plantones hasta el establecimiento de un bosque adulto (fase de regeneración) es el periodo con mayor riesgo ambiental y socioeconómico. Es durante este periodo cuando la baja rentabilidad y los elevados costes de inversión, junto con la falta de ingresos, llevan al abandono de la gestión forestal, lo que supone una amenaza para la conservación del bosque, su biodiversidad y su cadena de valor asociada.



Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas

La regulación rápida de la elevada densidad de pies disminuye a medio plazo la vulnerabilidad al fuego, permite el desarrollo de los árboles sin limitaciones en cuanto a los recursos debido a la competencia, evita el estancamiento en el desarrollo de los árboles y acelera la aparición de piñas que aseguren la continuidad de la masa si vuelve a producirse un incendio. Las actuaciones recomendadas son:

- **Clara de repoblado.** Se reduce considerablemente la densidad de árboles dejando todos los pies a una distancia similar unos de otros y ajustando la densidad final a la óptima según el modelo de gestión elegido. Según el estadio de desarrollo, se puede hacer una clara baja (manual o mecanizada) o una clara selectiva eliminando la competencia directa de los árboles que ya se hayan diferenciado.

- **Tratamiento de los restos de corta**. Se trocea la abundante cantidad de pies enteros cortados y se reparte de forma uniforme para evitar la acumulación de biomasa seca y acelerar su descomposición. Esta práctica reduce también el riesgo de incendios, aporta nutrientes al suelo y mejora la retención de agua.

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería

En las claras de repoblado no hay un aprovechamiento forestal comercial: los pinos, de diámetros a menudo no inventariables (<7,5 cm) y hasta diámetros que no superan los 15 cm, se cortan y tratan como restos, se trocean y se dejan *in situ*.

En este proyecto, se propone la **extracción de los pinos cortados a ambos lados de las pistas principales** para su revalorización económica a través de su aprovechamiento en una biorrefinería. Se trata de **haces de pino carrasco joven** que se triturarán enteros, por lo que la astilla generada incluirá **biomasa de madera fina de pino con corteza, ramas y hojas**.

Para este tipo de tratamiento, acotado al margen de los caminos, en los rodales demostrativos del proyecto se ha estimado un rendimiento de unas 10 t/ha.

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa

Para el aprovechamiento de pinos de diámetro pequeño, se recomienda cortar los pinos en la base del pie y **extraer los árboles enteros para maximizar la cantidad de producto y facilitar la extracción mediante haces**. El desembosque de los haces es una tarea costosa. Por ello, se propone únicamente extraer haces junto a pista y aprovechar que, según la normativa vigente, se deben dejar 20 metros a ambos lados de las pistas libres de restos vegetales. Las operaciones y los costes de los trabajos recomendados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Coste unitario1 de cada operación o trabajo forestal (sin IVA) en la gestión posincendio

Operación	Coste unitario (€/ha)
Clara de repoblado manual con motosierra	1.250
Tratamiento de restos con motosierra	650
Desembosque manual de haces procedentes del margen de la pista (€/ha)	360
Astillado y apilado al borde del camino o a cargador con tractor con asti-lladora	150[2]

[1] Els valors s'han obtingut a partir de l'anàlisi de diferents tarifes publicades per l'Administració forestal (preus de referència en publicacions de Forestal Catalana i en la valoració dels costos en la redacció d'IOF i ajuts a la GFS 2024 del CPF), i d'altres segons estimacions i resultats dels treballs del projecte.

[2] Considerant un aprofitament de 10 t/ha i un cost d'estellat de 15 €/t.

Principales retos técnicos y logísticos

Los tratamientos típicos no incluyen la obtención de productos comerciales, por eso su extracción y transporte plantean nuevos aspectos técnicos que considerar:

- El aprovechamiento de pinos enteros de pequeño diámetro (menor de 15 cm) al borde de la pista altera la dinámica de ejecución de la clara de repoblado.
- La extracción manual de haces es inviable económicamente y dificultosa. En cuanto a la posible mecanización, un estudio anterior sobre el aprovechamiento potencial de este tipo de biomasa con fines energéticos (López, 2014; https://cris.ctfc.cat/docs/upload/28_175_Silvicultura-70_lopez.pdf) recomendaba el uso de una grapa acoplada al tractor más que el desembosque con cabrestante porque da mejores rendimientos con el mismo coste horario. Respecto a la corta, Alcoverro *et al* (2024; revista Silvicultura, 92: https://shorturl.at/sTKlm) en pruebas hechas con maquinaria pequeña en este tipo de regenerado no han encontrado mejores rendimientos que en la corta manual, pero apuntan al uso de cabezales-cizalla y a la aplicación de talas sistemáticas como posible alternativa.
- En cuanto al transporte, los haces de regenerado ocupan mucho espacio y tienen poco peso; por este motivo, el astillado *in situ* parece la opción más viable.
- La infraestructura debe estar acondicionada para el paso de camiones de transporte de los productos forestales y, en su caso, para la instalación de una astilladora a pie de pista o cargador.

Productos de biorrefinería obtenidos y rendimientos

El aprovechamiento de biomasa de pino carrasco procedente de claras de repoblado en una biorrefinería ha permitido obtener compuestos químicos como **antioxidantes** (con un 90 % de pureza), **resinas fenólicas** (mínimo de 30 % de sustitución del fenol), azúcares (mínimo de 40 % de pureza) y **ácidos** (70 % de pureza), además de **biochar**. También se ha testado la producción de **enmiendas húmicas** para la agricultura a partir de biomasa torrefacta (a 300 °C). La tabla 3.2 muestra los principales resultados obtenidos en los rodales demostrativos del proyecto.

Tabla 3.2. Rendimientos a 400 ºC (g producto/kg biomasa) y uso potencial de los productos obtenidos en el procesamiento de la biomasa de regenerado de pino carrasco en la microbiorrefinería del LIFE BIOREFFORMED.

Bioproductos extraídos		Cantidad de produc-to obtenido (g/kg de biomasa) Regenerado de pino carrasco	Aplicaciones
Fracció líquida	**Ácidos**	21,10	Productos químicos y farmacéuticos o aditivos alimentarios.
	Sucres	8,30	Compost d'alt valor econòmic amb aplicacions en la indústria química i alimentària
	Azúcares	8,30	Compuesto de alto valor económico con apli-caciones en la industria química y alimentaria.
	Aldehídos y ceto-nas	6,40	Diversidad de aplicaciones en la industria química y alimentaria.
	Antioxidantes	2,38	Adhesiu o additiu en pintures
	Resinas fenólicas	2,38	Adhesivo o aditivo en pinturas
	Lignina pirolítica	13,50	Combustible, precursor de materiales carbo-nosos y síntesis de adhesivos y aditivos
Fracció sòlida	**Ácidos húmicos (300 °C) (g/100 mL)**	1,37	Industria de los agronutrientes
	Biocarbón (450 °C) (MJ/kg)	25,80	Biocombustible Enmienda de suelo agrícola

De estos resultados, cabe destacar:

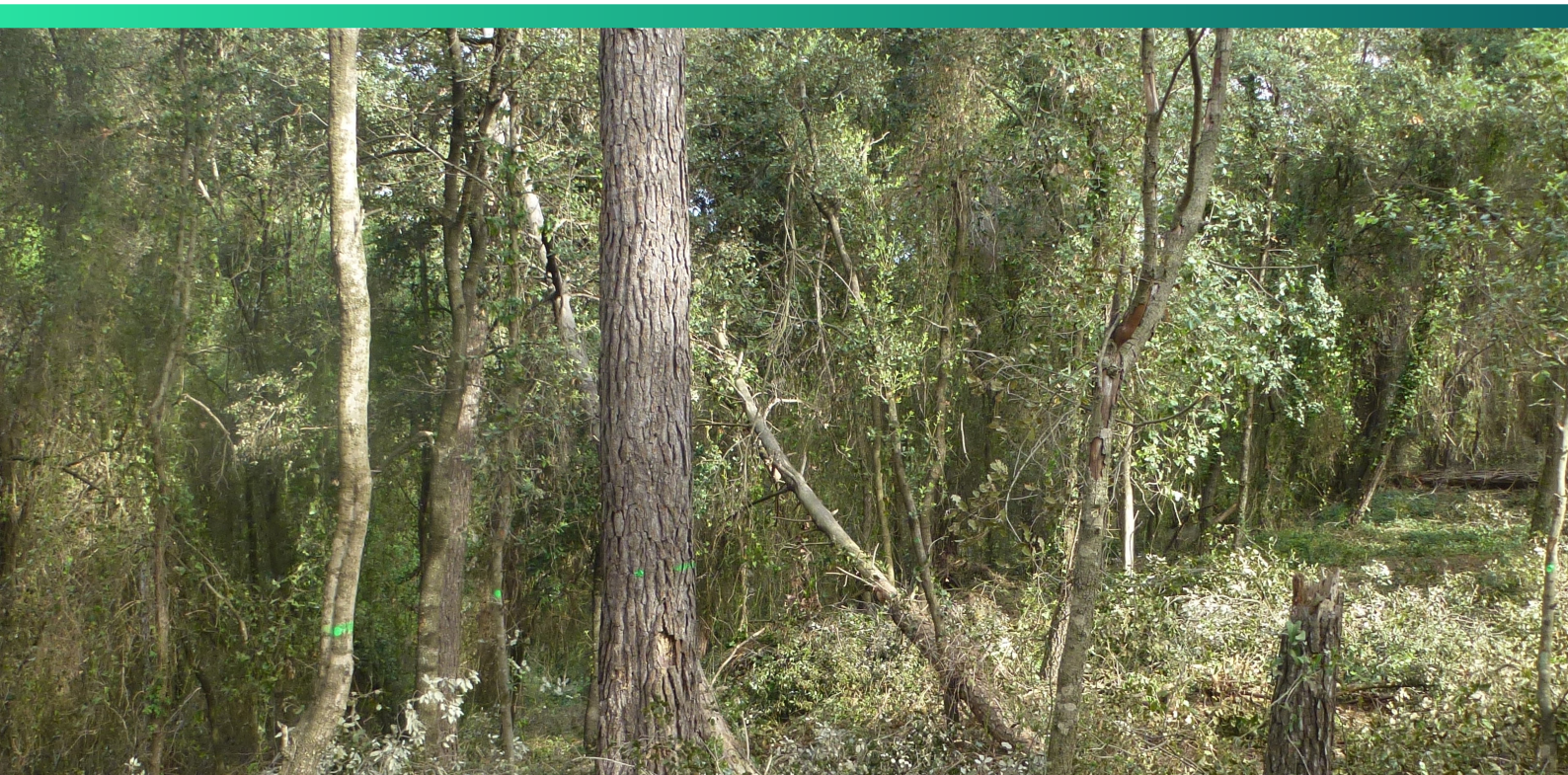
- ✓ **El pino carrasco ha sido la especie que ha mostrado un mejor rendimiento para la producción de compuestos antioxidantes** (como guayacol, catecol, fenol y vanilina, entre otros) de todas las especies testadas en este proyecto.
- ✓ **La biomasa compuesta por astilla de madera de árboles pequeños con corteza y hojas**, de difícil aprovechamiento alternativo, **no supone un problema para su uso en biorrefinería**, lo que abre una puerta al aprovechamiento de la biomasa generada en las claras de repoblado de pino carrasco posincendio.

4 Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de pinares afectados por perturbaciones naturales (bióticas o abióticas)

Los pinares mediterráneos (*Pinus halepensis*, *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*) están sometidos a los efectos de las perturbaciones. Además del fuego, que siempre ha sido un elemento propio de estos ecosistemas, en los últimos años estas masas se han visto afectadas por periodos de sequía recurrentes y más largos y (o, en combinación) por otras perturbaciones como tormentas de viento y ataques de plagas, que han reducido notablemente su superficie.

Algunos de los **episodios de ventoleras/nevadas** más relevantes de los últimos años en Cataluña han sido los de los años 2008-2009 o 2014, que afectaron a miles de hectáreas y dejaron algunas zonas totalmente arrasadas. En invierno de 2008-2009, los bosques catalanes sufrieron una perturbación de nieve que causó destrozos a más de 25.000 ha y otra de viento, en poco más de un mes de diferencia, que afectó de forma grave o muy grave más de 1.000 ha y generó entre 150.000 y 180.000 m^3 de madera. El invierno de 2014-2015, en las comarcas del Vallès Oriental y el Vallès Occidental, una tempestad de viento afectó a 650 hectáreas, de las que 520 eran masas de pino carrasco y encina.

En cuanto a los **daños bióticos**, la recurrencia y duración de los periodos de sequía facilitan la aparición de plagas de **escolítidos**, como el *Tomicus destruens*, que tuvo una fuerte afectación entre los años 2016 y 2018 en masas de pino piñonero del Maresme (un estudio de la DIBA y el ICGC estimó que unas 1500 hectáreas quedaron gravemente afectadas, el 11 % del total afectado); de **hongos**, como el *Thyriopsis halepensis*, que afecta principalmente al pino carrasco y al pino piñonero, o el *Diplodia sapinea* y el *Dothistroma* sp., que han experimentado un importante brote en el año 2022 después de una fuerte granizada en bosques de pino carrasco, pino silvestre y pino laricio, además de **otros patógenos** que generan grandes pérdidas económicas y ecológicas.



Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas

El resultado de estas perturbaciones son pinares desestructurados y poco capitalizados que requieren una serie de intervenciones si se quiere acelerar la restauración de sus funciones productivas y ecológicas. Justo después de la afectación, se retira parte de la madera afectada de valor comercial y en los años siguientes conviene hacer diferentes intervenciones de estructuración del bosque en las que los productos obtenidos serán pocos y de bajo valor económico.

Los tipos de actuaciones propuestas para mejorar el potencial productivo de una masa afectada por daños bióticos o abióticos son los siguientes:

- **Claras de mejora / cortas selectivas / cortadas sanitarias**: durante los años siguientes a la afectación, será necesario controlar la evolución de la masa y aplicar diferentes tratamientos de mejora según el tipo de afectación para estructurar la masa y hacerla más resistente y resiliente a los cambios.

- **Selección de rebrotes / desbroces selectivos**: como consecuencia de la apertura a luz después de una perturbación, es frecuente la proliferación del matorral o el rebrote de quercíneas y frondosas que ocupaban el subsuelo del pinar y que, a pesar de ser una oportunidad para avanzar hacia masas mixtas, es necesario tratar para reducir su vulnerabilidad al fuego y la competencia, o facilitar el regenerado de pino, si se quiere mantener la especie.

- **Plantaciones de enriquecimiento**: si la densidad de árboles es deficiente, se puede plantear introducir nuevos plantones para densificarla o, incluso, introducir otras especies para mejorar la biodiversidad del rodal y su resiliencia.

En bosques adultos, estas actuaciones pueden **integrar explícitamente criterios de protección y restauración de la biodiversidad** en los objetivos de gestión. Esto implica conservar los elementos que aportan capacidad de albergar biodiversidad: especies arbóreas esporádicas, árboles vivos con microhábitats o árboles de gran tamaño y, en su caso, conservar parte de la madera muerta de gran diámetro consecuencia de la perturbación.

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería

La biomasa generada en las actuaciones de restauración posperturbación está formada por pequeños volúmenes de madera de diferentes especies, de diámetros heterogéneos y de diferente destino en los mercados actuales (leña de encina y madera de pino para trituración, principalmente), lo que supone un alto coste de extracción y transporte por tonelada que, a menudo, hace inviable su comercialización. En el proyecto, se ha querido testar la viabilidad técnica y económica de aprovechar en procesos de biorrefinería parte de la madera generada en estas actuaciones. En concreto, se ha testado:

- **Madera de pino carrasco y pino piñonero con corteza, de tamaños diversos.**
- **Leña de roble o encina con corteza.**

En cuanto a volúmenes, en los tratamientos postolvanera y afectación biótica, pasados unos años desde la afectación, se estiman unos rendimientos de entre 15 y 20 t/ha.

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa

Los trabajos que deben ejecutarse para el aprovechamiento de esta biomasa y los principales costes asociados son:

- Extracción y desembosque de madera de baja calidad y en volúmenes reducidos.
- Troceo de las copas, que se mantienen en el rodal.
- Transporte a la industria.
- Plantaciones manuales de pocos ejemplares repartidos por el espacio

Los costes derivados de los tratamientos aplicados pueden verse en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Coste unitario1 de cada operación o trabajo forestal (sin IVA) en la gestión de masas de pino carrasco y encina afectadas por tolvaneras y de masas de pino piñonero y encina afectadas por escolítidos, a partir de tarifas existentes y resultados del proyecto.

Operación	Coste unitario (€/ha)
Clara/corta selectiva, selección de rebrotes y desembosque	1.300-1.400
Corta sanitaria y desembosque (afectaciones bióticas)	1.450
Desbroce selectivo manual	1.050
Tratamiento de restos con motosierra	650
Plantación de enriquecimiento con protectores	1.800
Astillado en el bosque	300[2]

[1] Los valores se han obtenido a partir del análisis de diferentes tarifas publicadas por la Administración forestal (precios de referencia en publicaciones de Forestal Catalana y en la valoración de los costes en la redacción de IOF y ayudas 2024 a la GFS del CPF) y otros según estimaciones y resultados de los trabajos del proyecto.

[2] Considerando un aprovechamiento de 20 t/ha y un coste de astillado de 15 €/t.

Principales retos técnicos y logísticos

En este tipo de masa, algunos de los elementos que dificultan las actuaciones y aumentan sus costes son:

- La presencia de restos de la ventolera o nevada que no se trataron en la actuación previa y, al estar enganchados, medio tumbados, etc., aportan un plus de peligrosidad tanto a la corta como al desembosque.
- La heterogeneidad en la distribución de pies. La masa presenta áreas más densas y zonas muy aclaradas (de mayor afectación). Esto hace que el peso de la corta y el desbroce cambie constantemente, y que el equipo que desempeña los trabajos tenga que adaptar el tipo y el peso de la actuación a medida que avanza. Igualmente, la extracción de pies aislados repartidos por el rodal ralentiza el proceso de desembosque y dificulta la mecanización.
- Los productos que se obtienen también son muy heterogéneos (leña, madera de trituración, madera de sierra) y en bajas cantidades, lo que encarece la manipulación y el transporte.
- La corta puntual de pies sanos en zonas afectadas por agentes bióticos puede ser necesaria tanto para regular la competencia y aumentar la vitalidad como para evitar la expansión de la plaga o enfermedad.
- En las masas afectadas por algún agente biótico, es necesario hacer un seguimiento constante de la posible aparición de nuevos pies decaídos para evitar rebrotes de la afectación. Si la aparición de pies secos es constante, es recomendable apostar por un cambio de especie.
- Si se opta por una plantación de enriquecimiento, debe ser manual.

Productos químicos obtenidos y rendimientos

El aprovechamiento en la biorrefinería del LIFE BIOREFFORMED de biomasa procedente de bosques gestionados posperturbación ha permitido obtener diferentes bioproductos a partir de la madera de pino piñonero, pino carrasco y encina, como, por ejemplo **antioxidantes** (con un 90 % de pureza), **resinas fenólicas** (mínimo del 30 % de sustitución del fenol), **azúcares** (mínimo del 40 % de pureza) y **ácidos** (70 % de pureza), además de **biochar**. También se ha testado la producción de **enmiendas húmicas** para la agricultura a partir de biomasa torrefacta (a 300 °C). La tabla 4.2 muestra los principales resultados de la biomasa obtenida en los rodales demostrativos del proyecto.

Tabla 4.2. Rendimientos a 400 ºC (g producto/kg biomasa) y uso potencial de los productos obtenidos en el procesado de la biomasa de pinares posperturbación en la microbiorrefineríadel LIFE BIOREFFORMED.

Fracción	Compuesto químico final	Cantidad de producto obtenido (g/kg de biomasa)			Aplicación
		Pino carrasco	Encina	Pino piñonero	
Fracción líquida	**Ácidos**	17,6	19,8	16	Productos químicos y farmacéuti-cos o aditivos alimentarios.
	Azúcares	9,5	5,9	6,9	Compuesto de alto valor económi-co con aplicaciones en la industria química y alimentaria.
	Aldehídos y cetonas	5,4	6,0	3,8	Diversidad de aplicaciones en la industria química y alimentaria (p. ej., aromatizantes)
	Antioxidantes	4,6	2,5	4,0	Industria cosmética, farmacéutica, nutracéutica, química y alimenta-ria, como antioxidantes, aromati-zantes y reactivos para la síntesis de las resinas fenólicas.
	Resinas fenólicas	1,43	2,01	3,33	Adhesivos o aditivos en pintura
	Lignina pirolítica	8,1	11,4	18,9	Combustible, precursor de mate-riales carbonosos y síntesis de adhesivos y aditivos
Fracción sólida	**Ácidos húmicos** (300° C) (g/100 mL)	1,19	1,55	1,46	Industria de los agronutrientes
	Biocarbón (450 °C) (MJ/kg)	26,2	24,2	29,9	Biocombustible Enmienda de suelo agrícola

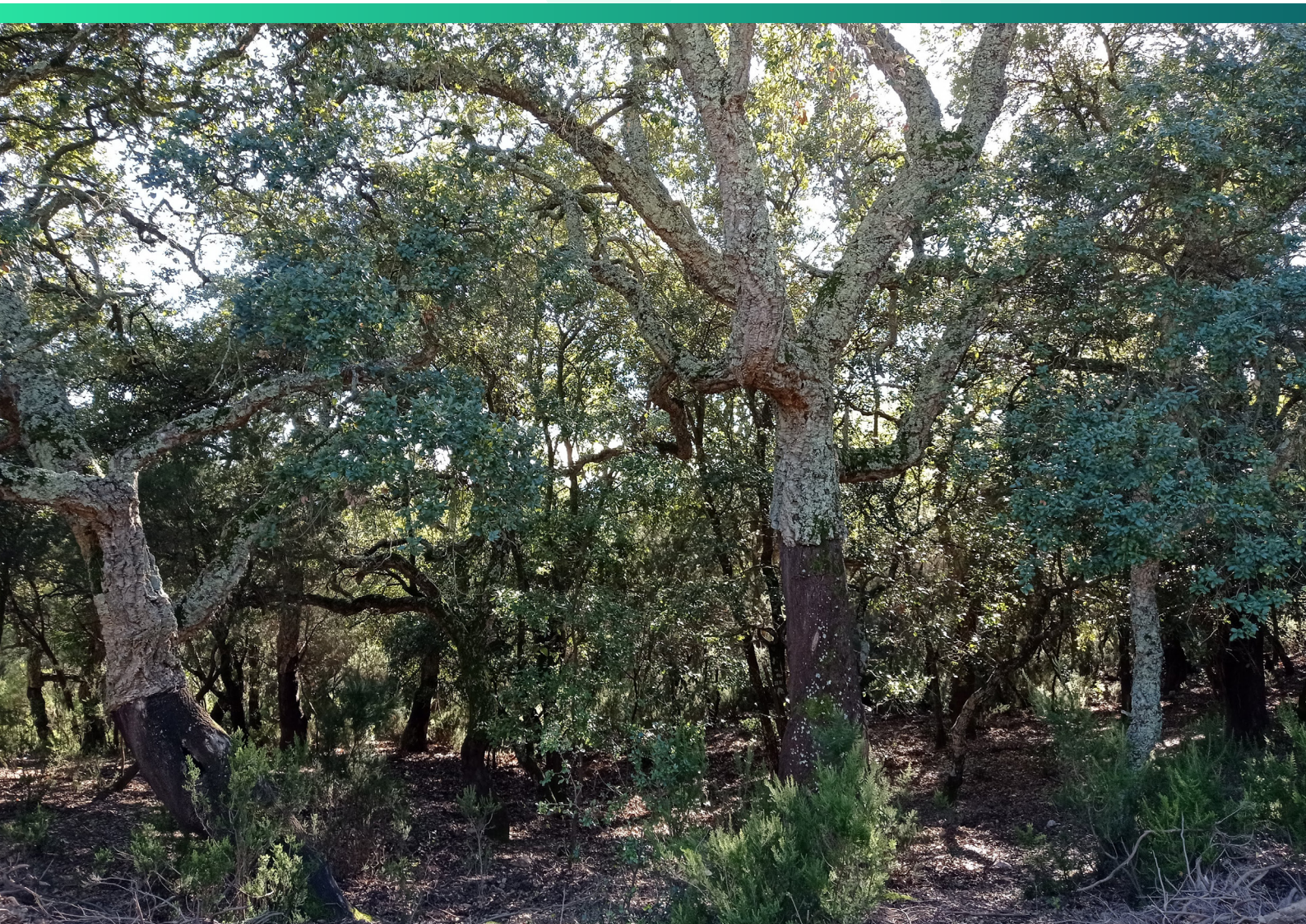
De estos resultados, cabe destacar:

- ✓ El uso en biorrefinería puede ser una opción para dar salida a la biomasa de difícil aprovechamiento alternativo procedente de la gestión adaptativa de pinares afectados por perturbaciones, al posibilitar el uso de **madera mezclada de diferentes especies y características**, sin que esto suponga una disminución de la calidad del producto final.
- ✓ **Los pinos** (el pino piñonero y, especialmente, el pino carrasco) **han mostrado un mejor rendimiento para la producción de compuestos antioxidantes** (como guayacol, catecol, fenol y vanilina, entre otros) **que la encina** y, en general, que el resto de especies testadas en el proyecto.

5 Aprovechamiento en biorrefinería de biomasa procedente de la gestión de adaptación de alcornocales al nuevo contexto climático

Los alcornocales de *Quercus suber* L. son un hábitat de interés comunitario (9330) con una larga historia económica y sociocultural, con el corcho como producto de mayor valor, que vuelve a crecer después de la extracción. En Cataluña, los bosques dominados por alcornoques ocupan 69.000 hectáreas, y el alcornoque aparece como especie secundaria en aproximadamente 55.000 hectáreas más, el 95 % de las cuales son de propiedad privada.

El cambio climático representa una grave amenaza para la conservación de los alcornocales, la producción sostenible de corcho a largo plazo y la cadena de valor asociada. Los tres grandes impactos del cambio climático sobre los alcornocales son: i) el incremento de la aridez, que conlleva una menor vitalidad y crecimiento y, finalmente, la sustitución del alcornoque por otras especies más competitivas; ii) las plagas, entre las que destaca la culebrilla del corcho (*Coraebus undatus*) que impide la producción de corcho de calidad, y iii) los incendios. En el marco del proyecto LIFE SUBER, se analizó la vulnerabilidad de los alcornocales a la restricción hídrica y se concluyó que aproximadamente dos terceras partes de los alcornocales (unas 30.000 hectáreas) se ubican actualmente en ubicaciones que en el año 2050 estarán fuera de su rango ecológico.



Desde el punto de vista biogeográfico, en Cataluña hay dos grandes tipos de alcornocales:

a) **Alcornocales mediterráneos húmedos (la Selva y el Alt Empordà)**: bosques bien conservados, densos y mayoritariamente puros. El corcho se extrae cada 12-16 años seguido de una clara suave. Esta gestión sostenida durante 150 años ha hecho que actualmente haya alcornocales muy densos y envejecidos, de productividad limitada y con una falta de regeneración viable. Es decir, con pocos árboles jóvenes y vitales disponibles para sustituir rodales envejecidos o recuperarse después de un incendio.

b) **Alcornocales mediterráneos secos (las Gavarres y el Montnegre)**: bosques generalmente mixtos con pinos (pino piñonero, pino resinero), encinas o madroños, todos con ventaja competitiva sobre los alcornoques y un sotobosque muy desarrollado. Las zonas mediterráneas secas son más propensas al ataque de *Coraebus undatus* y muestran una gestión limitada, especialmente en zonas posincendio, debido a la baja rentabilidad.

Actuaciones de adaptación y restauración forestal recomendadas

Per fer front a aquests diferents reptes, el projecte LIFE SUBER (2012-2018) va definir una sèrie de tractaments amb els objectius següents:

1. **Claras más intensas** para aumentar la vitalidad individual, al reducir la competencia en los alcornocales productores, **y desbroces selectivos** para aumentar la vitalidad colectiva, aprovechando la humedad ambiental como un recurso hídrico complementario.

2. **Fomentar la regeneración de los alcornoques en rodales envejecidos** para permitir la mejora forestal y la rápida renovación en caso de incendio.

3. **Promover la especie en los sitios más húmedos** en rodales mixtos o en rodales ocupados por especies más productivas, y acelerar la adaptación del alcornoque a las nuevas condiciones climáticas mediante plantación de densificación o reforestación.

4. **Reducir el volumen y la continuidad del combustible** para mejorar la resistencia a grandes incendios forestales sin comprometer la conservación de la humedad ambiental.

Tipo de biomasa disponible para la biorrefinería

La ejecución de las medidas para la adaptación de los alcornocales al cambio climático genera una serie de subproductos de difícil valorización en los mercados actuales. En el marco del proyecto, se han testado los siguientes para ser aprovechados en procesos de biorrefinería:

1. **Madera de alcornoque sin descorchar (madera y corcho).** Para utilizar la leña de alcornoque como combustible, es necesaria la extracción previa de su corteza (el corcho), que es un tratamiento costoso. En pruebas anteriores, se destacó que el corcho puede proporcionar resultados muy interesantes en biorrefinerías, pero que la producción de gas excesivo debe compensarse quemándolo junto con otro material, lo que abre una oportunidad para el uso en biorrefinerías de madera de alcornoque sin descorchar.

2. **Especies arbustivas (*Erica* arborea y *Arbutus unedo*)**: arbustos procedentes de la retirada selectiva de matorrales. Los restos de matorral a menudo se dejan troceados en el bosque para el reciclaje de nutrientes y la conservación de la humedad, pero se puede plantear su extracción a ambos lados de las pistas de desembosque para prevenir incendios.

3. **Madera de castaño muerto en un rodal productivo** donde se quiere instalar o promover alcornoque (favoreciendo el regenerado incipiente o plantando). En este caso, se suele llevar a cabo una corta a matarrasa con aprovechamiento posterior de todo el volumen de madera generado, que suele ser rentable, aunque el castaño afectado por chancro tiene poca salida comercial de valor.

De acuerdo con estos tratamientos y según el tipo de bosque, se pueden obtener unas 15 t/ha correspondientes a la parte arbórea y unas 10 t/ha de biomasa arbustiva en los márgenes de los caminos. En el caso del castañar posperturbación (corta a matarrasa), se han obtenido unas 85 t/ha.

Rendimientos y costes asociados a las operaciones de extracción de biomasa

Si el producto extraído es madera, puede ser viable hacer la trituración directamente en la biorrefinería, mientras que si es matorral es recomendable la trituración a pie de pista, una vez se ha dejado secar el material. Las operaciones requeridas y los costes se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Coste unitario1 de cada operación de mejora o trabajo forestal recomendado en los alcornocales (sin IVA) según tarifas existentes y resultados del proyecto.

Operación	Coste unitario
Corta selectiva de alcornoque y desembosque (€/ha)	650
Desbroce selectivo y manual del matorral y tratamiento de restos (€/ha)	1.470
Extracción manual de matorral de una franja a ambos lados de la pista (€/ha)	420
Apilado y astillado al borde del camino o cargador con tractor con astilla-dora (€/t)	150-1.275[2]
Plantación de densificación con protectores (€/ha)	250

[1] Los valores se han obtenido a partir del análisis de diferentes tarifas publicadas por la Administración forestal (precios de referencia en publicaciones de Forestal Catalana y en la valoración de los costes en la redacción de IOF y ayudas 2024 a la GFS del CPF) y otros según estimaciones y resultados de los trabajos del proyecto.

[2] Considerando un aprovechamiento de 10 t/ha en los alcornocales y de 85 t/ha en la corta a matarrasa del castañar afectado por chancro, con un coste de astillado de 15 €/t.

Principales retos técnicos y logísticos

- Una dirección de obra cuidadosa: la liberación de pies jóvenes, la corta de pies envejecidos pero que todavía producen y el desbroce selectivo (especialmente si se busca conservar la humedad en el rodal) requieren un cambio de criterio respecto a las actuaciones habituales y un cierto «sacrificio de corta» de alcornoques todavía productores en favor de la vitalidad de los árboles restantes.
- La posibilidad de mecanizar la extracción y desembosque de material arbustivo de los bordes de las pistas, que actualmente es un trabajo muy costoso: en uno de los rodales ubicado en un alcornocal seco en las Gavarres, la abundante presencia de zarzaparrilla ha duplicado la dureza y coste de los trabajos.
- Optimizar los costes de transporte: es necesario compensar los bajos rendimientos en toneladas con hectáreas, con proximidad a la planta o con uso combinado de biomasa procedente de otras actuaciones.
- En las plantaciones de corcho, se puede aprovechar la biomasa extraída para su uso en técnicas de adaptación a condiciones de sequía: uso de parte de la astilla forestal generada (si se tritura *in situ*) o del biochar subproducto de la biorrefinería como estructurantes de suelos. En la corta a matarrasa de sustitución, conservar especies secundarias aporta sombra inicial que favorece los plantones de alcornoque y la biodiversidad.

Productos químicos obtenidos y rendimientos

El uso en la biorrefinería del LIFE BIOREFFORMED de biomasa procedente de actuaciones de adaptación en alcornocales ha permitido obtener diferentes bioproductos, como, por ejemplo, **antioxidantes** (con un 90 % de pureza), **resinas fenólicas** (mínimo del 30 % de sustitución del fenol), **azúcares** (mínimo del 40 % de pureza) y **ácidos** (70 % de pureza), además de **biocarbón**. También se ha testado la producción de **enmiendas húmicas** para la agricultura a partir de biomasa torrefacta (a 300 °C). La tabla 5.2 muestra los principales resultados obtenidos en los rodales demostrativos del proyecto.

Tabla 5.2. Rendimientos a 400 ºC (g producto/kg biomasa) y uso potencial de los productos obtenidos en el procesamiento de la biomasa procedente de la gestión adaptativa de alcornocales en la microbiorrefinería del LIFE BIOREFFORMED.

	Bioproductos extraídos	Cantidad de producto obtenido (g producto / kg de biomasa)				Aplicaciones
		Alcornoque	Castaño	Madroño	Brezo	
Fracción líquida	**Ácidos**	17,6	11,5	11,9	25,6	Productos químicos y farmacéuticos o aditivos alimentarios.
	Azúcares	2,7	5,9	2,9	9,6	Compuesto de alto valor económico. Aplicaciones en la industria química y alimentaria.
	Aldehídos y cetonas	2,9	2,1	2,4	5,4	Diversidad de aplicaciones en la industria química y alimentaria (p. ej., aromatizantes)
	Antioxidantes	1,1	0,7	0,6	2,3	Industria cosmética, farmacéutica, nutracéutica, química y alimentaria, como antioxidantes, aromatizantes y reactivos para la síntesis de las resinas fenólicas.
	Resinas fenólicas	1,34	2,33	1,67	2,01	Adhesivo o aditivo en pinturas
	Lignina pirolítica	7,60	13,20	9,50	11,40	Combustible, precursor de materiales carbonosos y síntesis de adhesivos y aditivos
Fracción sólida	**Ácidos húmicos** a 300^0 C (g/100 mL)	2,31	2,37	1,63	1,43	Abonado de suelos agrícolas
	Biochar a 450^0 C (MJ/kg)	16,6	22,7	22,1	23,1	Enmienda de suelo agrícola o biocombustible

De estos resultados, cabe destacar:

- ✓ **El uso en biorrefinería permite dar salida a biomasa de difícil aprovechamiento alternativo en la gestión adaptativa de alcornocales**, como matorral con ramas y hojas procedente de desbroces junto a las pistas, leña (madera y corcho) procedente de cortas de selección, o madera mezclada de diferentes especies y características procedente de claras en alcornocales mixtos, así como el aprovechamiento mezclado de todas, sin que ello suponga una merma en la calidad del producto final.
- ✓ **Las especies arbustivas** más abundantes en alcornocales secos, como el brezo, **han dado muy buenos resultados** en la biorrefinería, **sobre todo en lo que se refiere a la producción de ácidos**, como el ácido acético, a partir del bio-oil obtenido a 450 °C.
- ✓ **El castaño y el alcornoque son las especies que han dado mejores resultados en la producción de extractos húmicos** a partir de biomasa torrefacta (a 300 °C) como estimulantes de la actividad microbiana del suelo y del crecimiento vegetal, pudiendo llegar a ser superiores a bioestimulantes comerciales de origen fósil, como la leonardita.

@biorefformed

https://lifebiorefformed.eu/

info@lifebiorefformed.eu

Más información