

MANUAL

RESULTADOS FINALES DEL PROYECTO GRUPO OPERATIVO BIOPOPTTECH

Promoción del cultivo del **chopo** y uso en cascada de su **madera** hacia productos **tecnológicos** de alto valor añadido.



BIOPOPTTECH
Grupo operativo

Grupo operativo

BIOPOPTTECH



SOCIOS



MIEMBROS SUBCONTRATADOS | COLABORADORES



El GO BIOPOPTTECH: Promoción del cultivo del chopo y uso en cascada de su madera hacia productos tecnológicos de alto valor añadido, busca el desarrollo de la cadena de valor asociada a la plantación y aprovechamiento de choperas.

Comisión Europea: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/rural-development_es.

El grupo operativo GO-BIOPOPTTECH ha recibido para su proyecto de innovación una subvención de 596.571,75 €. El importe del proyecto es cofinanciado al 100% con fondos procedentes del Instrumento de Recuperación Europea (EU Next Generation), tal como se establece en el Real Decreto 169/2018, de 23 de marzo.

El organismo responsable del contenido es el GO-BIOPOPTTECH

La Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) es la autoridad de gestión encargada de la aplicación de la ayuda del FEADER. «Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: Europa invierte en las zonas rurales»

Todos los derechos reservados. Bajo las sanciones establecidas en el ordenamiento jurídico, queda rigurosamente prohibida, sin autorización escrita de los titulares del copyright, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático.

BIOPOPTECH

El proyecto GO BIOPOPTECH surge como una apuesta estratégica para la promoción del cultivo del chopo y el aprovechamiento en cascada de su madera en productos tecnológicos de alto valor añadido. Esta iniciativa fue posible gracias al compromiso y colaboración de diversas entidades expertas en el sector, entre las que destacan, Bosques y Ríos SL, Grupo Garnica Plywood SA, Tabsal SCL, AEFCON, Madera Plus Calidad Forestal SL, PEFC España, Föra Forest Technologies SLL y Fundación Cesefor. Participaron también, la Universidad de Valladolid, la Universidad de Granada, la Universidad de Santiago de Compostela, Sorbus Bosques Multifuncionales SL, FAFCYLE, la Junta de Castilla y León y el Gobierno de Navarra.

Este manual tiene como objetivo servir de guía para todos los actores involucrados en la cadena de valor del chopo. Proporciona información detallada sobre la situación actual del sector, el impacto del clima y el suelo en la productividad de los clones más utilizados en la actualidad y de nuevos clones, las propiedades tecnológicas de la madera y las mejores prácticas de gestión. Además, se abordan aspectos clave como la certificación forestal con el fin de garantizar un aprovechamiento eficiente y sostenible del recurso y la iniciativa “Gracias Chopo”, una acción clave para fomentar la replantación de choperas y garantizar la sostenibilidad del recurso a largo plazo.

Con este trabajo, esperamos fortalecer el conocimiento sobre la populicultura y fomentar la integración de prácticas innovadoras que permitan la mejora continua del sector. La combinación de investigación aplicada, compromiso ambiental y cooperación entre entidades públicas y privadas nos permitirá avanzar hacia un modelo de producción forestal más sostenible y competitivo, alineado con los desafíos actuales del mercado y la transición ecológica.



Índice

1. SITUACIÓN ACTUAL DEL CHOPO EN ESPAÑA, SU MERCADO Y PERSPECTIVAS DE FUTURO5	9
Introducción	11
Superficie y distribución	12
Datos de producción anual	14
Industria del chopo en España y sus productos	15
Tendencias en la industria	16
Importaciones y exportaciones de madera en rollo de chopo	18
Oportunidades y puntos fuertes del chopo	18
Puntos débiles, cuellos de botella, necesidades y riesgos	20
Conclusiones y propuestas de acción	21
Estudios previos relevantes	22
2. ESTIMACIÓN DE VARIABLES DENDROMÉTRICAS DEL CHOPO A PARTIR DE VUELOS FOTOGRAMÉTRICOS.	23
Introducción	25
Objetivos	26
Metodología	26
1. Captura de datos remotos con dron	27
2. Análisis y procesado de los datos remotos	28
3. Fotointerpretación de los árboles	31
4. Asignación de mediciones a los árboles fotointerpretados	32
5. Entrenamiento de algoritmos de individualización	32
6. Revisión de los resultados	33
7. Delineación de copas, recorte y cálculo de métricas y alturas	33
8. Ajuste de modelos y estimación de variables dendrométricas	35
9. Predicción de las variables dendrométricas de todos los árboles	38
Conclusiones	39

3. EFECTO DEL CLIMA Y EL SUELO EN LA PRODUCTIVIDAD DE DIFERENTES CLONES DE CHOPO. 41

Introducción	43
Objetivos	44
Metodología	44
1. Ensayos clonales	44
2. Evaluación de la productividad	46
3. Análisis estadístico	48
Resultados	50
1. Variabilidad de la productividad y de los parámetros ecológicos.	50
2. Modelo mixto	52
3. Regresión del efecto ambiental según las variables ambientales.	53
Discusión	54
Conclusiones	56
Bibliografía	57

4. PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE CLONES DE CHOPO EN FUNCIÓN DE DIFERENTES VARIABLES. 59

Introducción	61
Metodología	62
1. Propiedades evaluadas sobre árboles en pie	62
2. Descripción de las parcelas de estudio	63
3. Metodología de captura de datos	65
4. Mapa de variación de las propiedades tecnológicas de la madera en el área de distribución del chopo	67
Resultados	68
1. Propiedades tecnológicas evaluadas sobre el árbol en pie	68
2. Porcentaje de variabilidad explicada por el clon y por la parcela	69
3. Clones de interés en cuanto a propiedades tecnológicas de la madera	70
4. Mapa de variación de las propiedades tecnológicas de la madera en el área de distribución del chopo	70

5. INFLUENCIA DEL CLON Y DE LA ALTURA EN EL ÁRBOL EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DEL PRODUCTO FINAL. 73

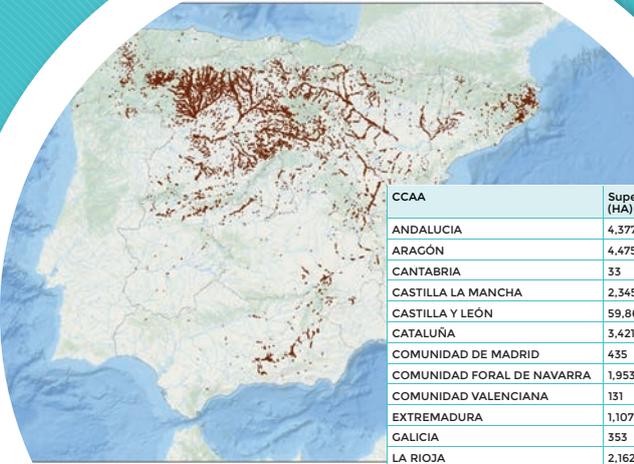
Introducción	75
Metodología	76
1. Caracterización no destructiva de calidad tecnológica de la madera	77
2. Control de la influencia de humedad en la toma de datos de velocidad en troza	79
3. Obtención de productos de cada troza y clon y caracterización de propiedades tecnológicas	79
4. Procesado de datos y análisis estadístico	80
Resultados	81
1. Efecto del clon en las variables medidas en trozas	81
2. Efecto de la altura en el árbol en las variables medidas en trozas	82
3. Análisis de la influencia del clon y de la altura en el árbol de la troza en las propiedades tecnológicas de los productos: tablero contrachapado y el LSL	83
4. Modelos de predicción del Módulo de elasticidad del tablero contrachapado a partir de las mediciones con métodos no destructivos en troza y chapa	85
Conclusión	86
Agradecimientos	87
Bibliografía	87

6. NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA CERTIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DEL CULTIVO DEL CHOPO. 89

Introducción	91
Certificación de choperas de pequeña superficie	92
Metodología	92
1. Marco de Gestión Forestal Sostenible de Castilla y León	93
2. Referente Selvícola de Choperas	94
3. Documento de Adhesión al Referente Selvícola de Choperas	98
“Gracias Chopo”, iniciativa para fomentar la replantación de choperas.	99

CAPÍTULO 1

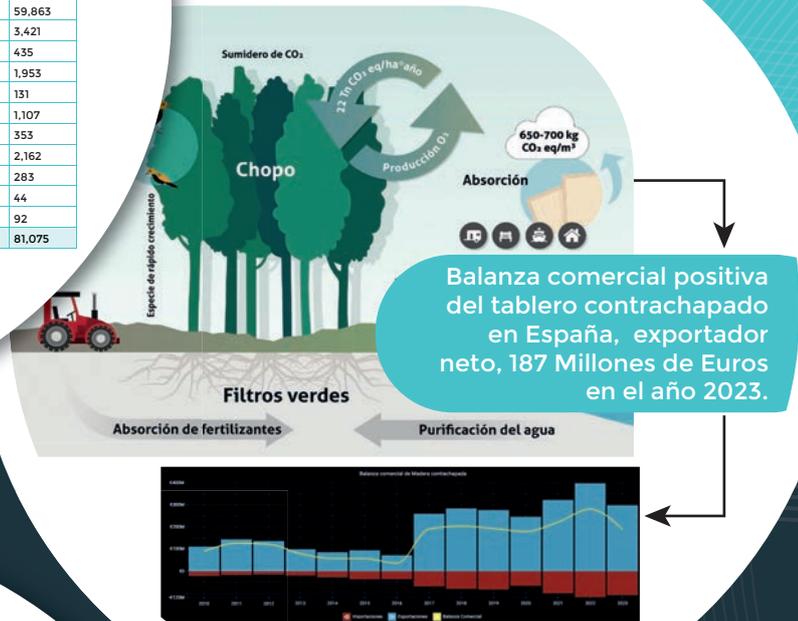
Situación actual del chopo en España, su mercado y perspectivas de futuro.



CCAA	Superficie (HA)
ANDALUCÍA	4,377
ARAGÓN	4,475
CANTABRIA	33
CASTILLA LA MANCHA	2,345
CASTILLA Y LEÓN	59,863
CATALUÑA	3,421
COMUNIDAD DE MADRID	435
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA	1,953
COMUNIDAD VALENCIANA	131
EXTREMADURA	1,107
GALICIA	353
LA RIOJA	2,162
PAIS VASCO	283
PRINCIPADO DE ASTURIAS	44
REGION DE MURCIA	92
TOTAL	81,075

Superficie de choperas por CCAA en España

Beneficios ambientales y económicos de la populicultura



Puntos débiles, cuellos de botella, necesidades y riesgos.

- Investigación en mejora genética y la diversidad varietal, esenciales para adaptarse a los efectos negativos del cambio climático.
- Pérdida de conocimiento en técnicas de populicultura o explotación forestal, especialmente entre pequeños propietarios y empresas. Es vital evitar su cambio a otros sectores y asegurar el relevo generacional.
- No hay un inventario forestal continuo de choperas en toda España

Oscar Crespo Pinillos
Sergio Souto Suárez
Grupo Garnica Plywood SA

1. SITUACIÓN ACTUAL DEL CHOPO EN ESPAÑA, SU MERCADO Y PERSPECTIVAS DE FUTURO.

Introducción

Las plantaciones de chopos o choperas son un ejemplo de gestión forestal sostenible que forma parte del paisaje de las vegas de numerosos ríos en España. Además de cumplir una función productiva proveen numerosos beneficios ambientales y sociales en las zonas donde se ubican.

El sector forestal-maderero genera aproximadamente el 1,7% del PIB en España y 300.000 empleos directos (FSC España, 2023). Este sector necesita de materia prima, siendo el chopo una materia prima básica e insustituible para este sector para industrias concretas y en regiones como las cuencas de los ríos Duero y Ebro donde esta especie es la principal materia prima para toda la industria forestal asentada en estos territorios.

El chopo en España se emplea fundamentalmente para la fabricación de tableros contrachapados pero también para otros productos como tableros de fibras o MDF, tablero aglomerado, pasta de papel, madera de sierra o LSL (Laminated Strand Lumber). En la actualidad, se están ensayando el desarrollo de nuevos productos en base al chopo como la madera microlaminada o la madera laminada (Universidad de Granada, sf). Su uso también ha sido validado para aplicaciones relacionadas con la generación de energía a través

de biomasa o biocombustibles lignocelulósicos.

El chopo, como materia prima fundamental para la fabricación de tablero contrachapado en España en las últimas décadas, ha ejercido un efecto sustitutivo frente a la madera de especies tropicales como el Okume, Fromager (Ceiba samauma) y la llomba (*Pycnanthus angolensis*), entre otras. A diferencia de la industria francesa que ha mantenido una importante conexión con las maderas tropicales, la industria del tablero contrachapado español ha basado su crecimiento en la madera de chopo. Actualmente la madera de chopo supone el 90% del abastecimiento de madera en rollo de la industria del tablero contrachapado en España, correspondiendo el resto al consumo de unas pocas fábricas que usan pino radiata y eucalipto.

A su vez España se ha convertido en un líder a nivel europeo en la exportación de estos tableros en Europa y otras geografías como Norte América, desplazando con su crecimiento la demanda de tableros tropicales. Este tablero es empleado en aplicaciones tan variadas como la movilidad terrestre, náutica, mobiliario o suelos. En aplicaciones como la construcción, la movilidad o el embalaje de frutas este producto es un sustitutivo de materiales no renovables como el plástico.

Superficie y distribución

En el año 2020 se completó el primer Mapa Forestal de Plantaciones de Chopo (MFE_CH2020) a nivel nacional a partir de la mejor información disponible, técnicas de teledetección y Lidar. En base a este inventario la superficie de plantaciones de chopo en España alcanza las 81.075 hectáreas distribuidas por toda la geografía nacional (Tabla 1, Fig. 1) pero particularmente concentradas en las cuencas hidrográficas de los ríos Duero (66%) y Ebro (12%).

Tabla 1. Superficie de choperas por CCAA (Fuente: MFE_CH2020).

CCAA	Superficie (HA)
ANDALUCIA	4.377
ARAGÓN	4.475
CANTABRIA	33
CASTILLA LA MANCHA	2.345
CASTILLA Y LEÓN	59.863
CATALUÑA	3.421
COMUNIDAD DE MADRID	435
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA	1.953
COMUNIDAD VALENCIANA	131
EXTREMADURA	1.107
GALICIA	353
LA RIOJA	2.162
PAIS VASCO	283
PRINCIPADO DE ASTURIAS	44
REGION DE MURCIA	92
TOTAL	81.075

A nivel mundial, la superficie de plantaciones de chopo ha aumentado notablemente en las últimas décadas en varias partes del mundo, destacando el crecimiento en zonas de Asia como China e India. En estos países, los chopos se han cultivado con fines productivos y/o ambientales. Los principales países con superficies dedicadas al cultivo del chopo son miembros de la Comisión

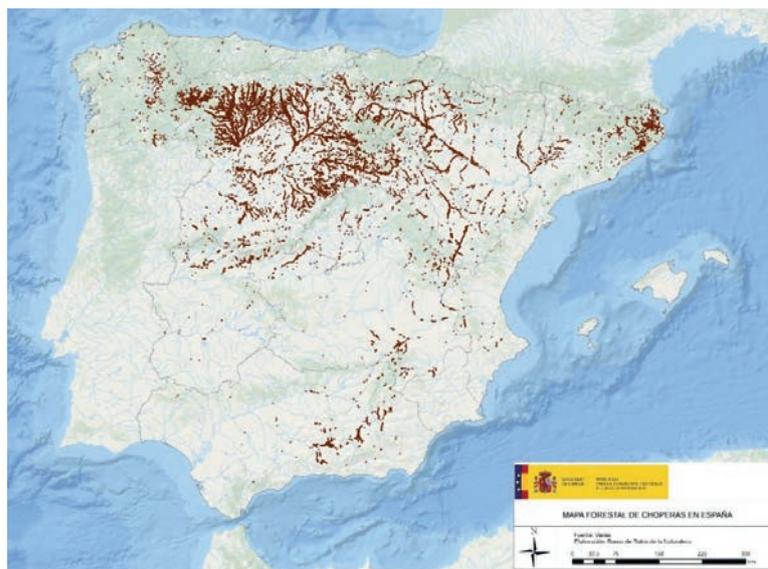


Figura 1. Distribución Plantaciones de chopo en España (Fuente: MITECO, sf).

Internacional de Álamos y Otros Árboles de Crecimiento Rápido, un órgano estatutario de la FAO (Tabla 2).

A nivel europeo, los países con las mayores superficies de plantaciones de chopo son Francia, España, Hungría e Italia (Tabla 3, Fig. 2). Italia es considerado el origen histórico de las plantaciones de chopo en Europa, ya que en este país se inició la investigación en mejora genética de variedades de chopo. No obstante, en las últimas décadas, la superficie dedicada a estas plantaciones ha disminuido significativamente en este país.

Tabla 2. Superficie de plantaciones de chopo en el mundo (Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021, 2024)).

País	Superficie total (Ha)	Producción madera industrial (Ha)	Leña (Ha)	Protección Ambiental (Ha)	Otros usos (Ha)
Asia					
China	7.570.700	2.271.210	757.070	4.542.420	
India	317.800	289.520	9.440	18.840	
Turquía	70.000	70.000			
Europa					
France	194.000	194.000			
Alemania	124.800	62.400			62.400
Italia	46.897	44.552	23.449		
España	81.075	73.778	4.054	3.243	
América, Oceanía					
Argentina	37.114	37.114			
Canadá	9.200	8.740			460
Chile	7.412	3.400		361	2.540
EEUU	142.394			31.327	139.261

Tabla 3. Superficie de plantaciones de chopo por país en la Unión Europea (Fuente: Recopilación Garnica).

País	Plantaciones de chopo orientadas a la producción (ha)
Francia	194.000
España	81.075
Alemania	62.400
Hungría	55.000
Italia	46.897
Bélgica	9.650
Bulgaria	20.000*
Rumanía	50.000*
Grecia	7.500
Polonia	7.500
Suecia	4.000
República Checa	2.500
Eslovaquia	10.500
Croacia	11.300

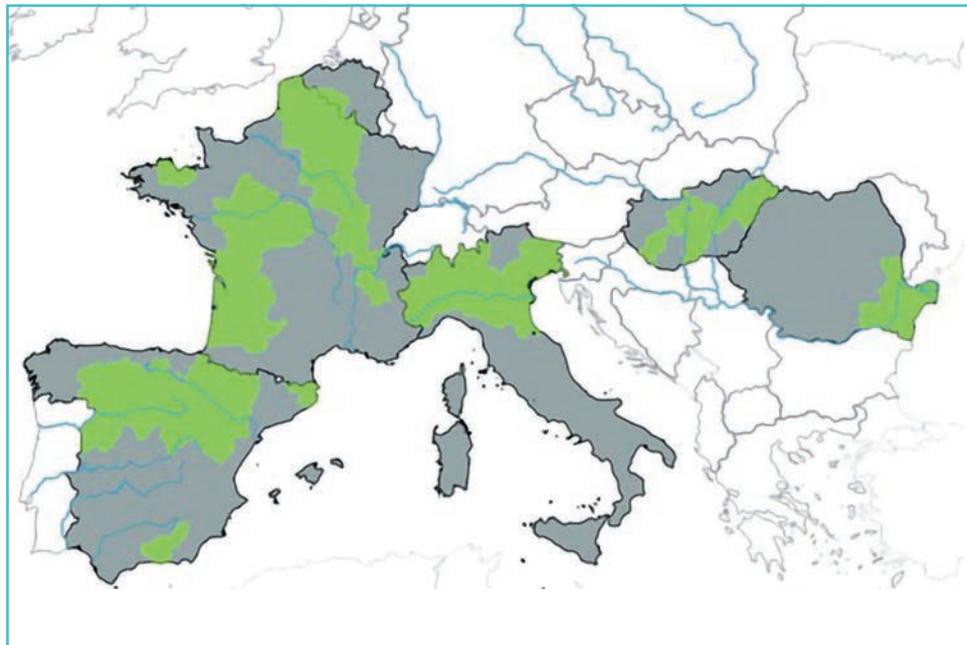


Figura 2. Principales áreas de cultivo del chopo en la Unión Europea (Fuente: Garnica).

Datos de producción anual

Las cortas de madera de chopo son de gran importancia a nivel nacional donde suponen el 4% de las cortas de madera pese a suponer un 0,6% de la superficie forestal arbolada. Esta influencia es muy superior a nivel regional en los territorios ocupados por las cuencas hidrográficas del Ebro y Duero y en concreto en las comunidades autónomas de La Rioja,

Aragón, Navarra o Castilla y León donde es una especie fundamental para el sector forestal en estas regiones (Fig. 3).

En Castilla y León, comunidad autónoma que concentra el 74% de la superficie a nivel nacional, el chopo es una especie fundamental para la industria forestal regional al ser la única especie de frondosa con volúmenes comerciales de corta, siendo la única especie forestal industrial en la meseta castellana (Fig. 4 y 5).

La Rioja	Navarra	Aragón
1,5% Superficie Forestal Arbolada	0,4% Superficie Forestal Arbolada	0,3% Superficie Forestal Arbolada
44% Volumen de Cortas	13% Volumen de Cortas	25% Volumen de Cortas
Total cortas madera: 84.000 m3 (Media 2007-2014)	Total cortas madera: 330.000 m3 (Media 2007-2014)	Total cortas madera: 187.000 m3 (Media 2007-2014)

Figura 3. Importancia de las cortas de chopo sobre el total de cortas en las principales comunidades autónomas con plantaciones de chopo en la cuenca del Ebro.

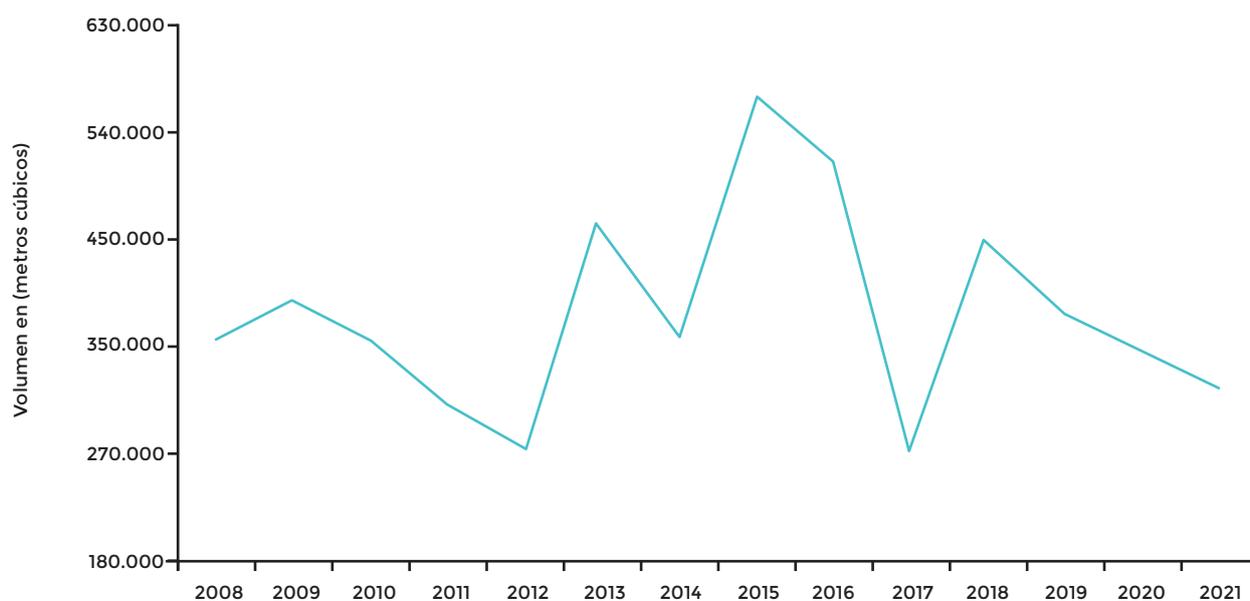


Figura 4. Evolución del volumen de cortas de chopo en Castilla y León (Fuente: Portal de datos forestales de Castilla y León).

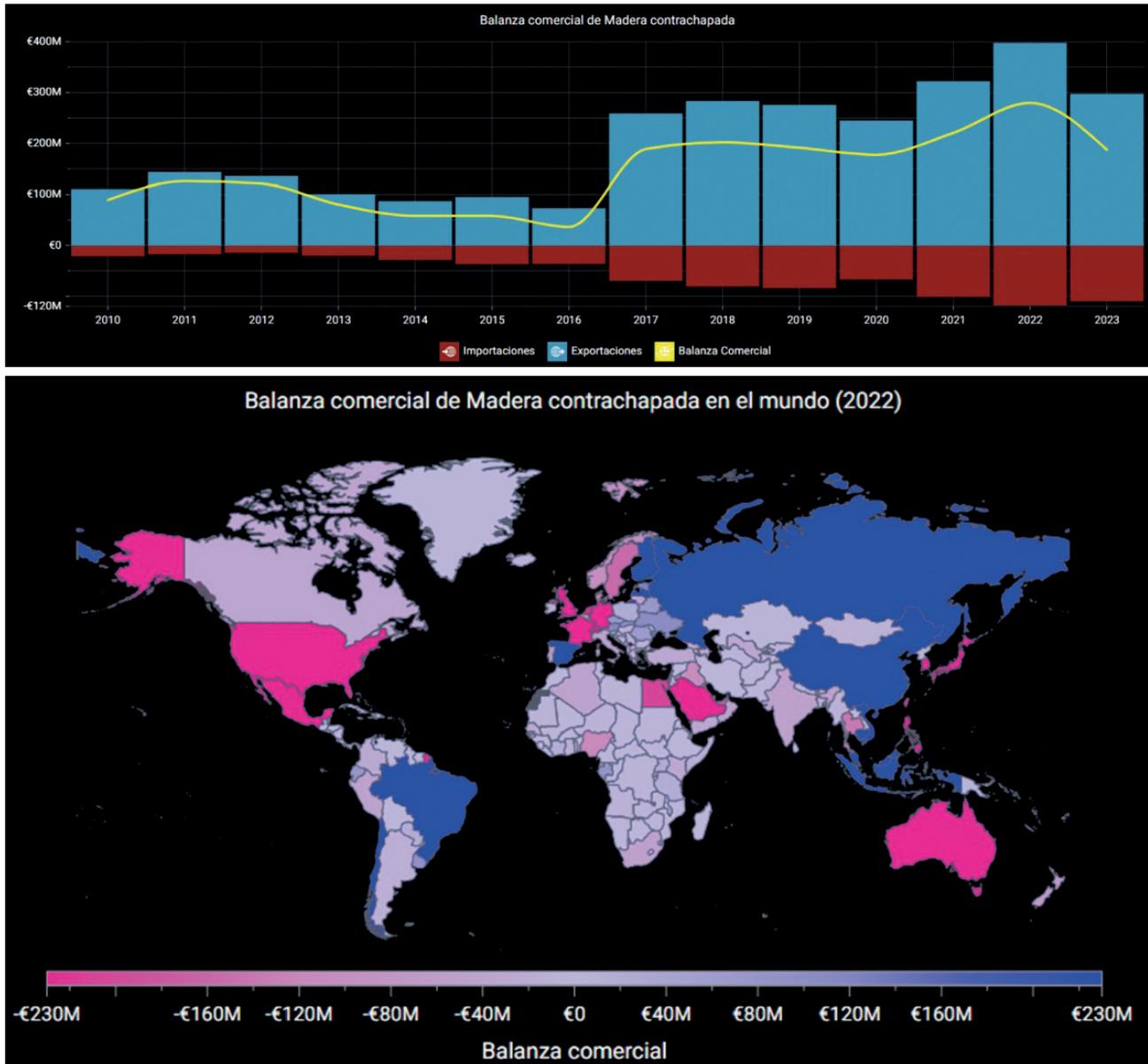


Figura 6. Balanza comercial tablero contrachapado en España y en el mundo (Fuente: Fundación Cotec para la Innovación, 2024).

La chopera proporciona varios productos asociados a cada una de las industrias mencionadas anteriormente. La industria del tablero contrachapado aprovecha los primeros metros del fuste, los de mayor calidad. Para la obtención de madera de calidad es fundamental que la masa haya sido gestionada con un adecuado régimen de podas. En los últimos metros de altura maderable del árbol pueden obtenerse trozas de menor volumen conocidas como tronquillo destinadas a sierra de pequeñas dimensiones. La última parte del fuste

es aprovechada tras un astillado previo para la fabricación tableros aglomerados, MDF, LSL y pasta de papel o biomasa.

Tendencias en la industria

La cadena de valor del chopo en España está formada por varios eslabones: propietarios, viveristas, empresas selvícolas, rematantes, investigadores e industrias que venden el producto final en mercados de todo el mundo. Un desequilibrio en cualquiera de estos

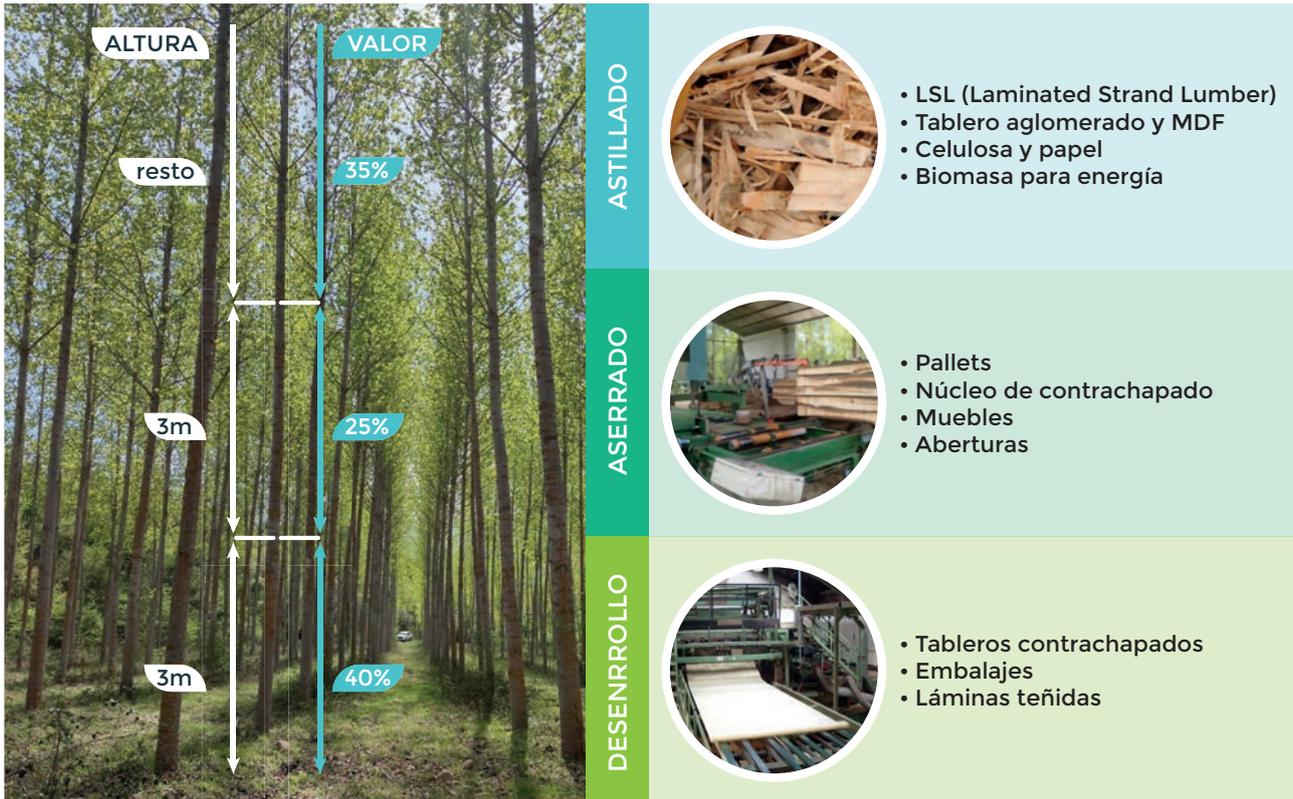


Figura 7. Aprovechamiento de un chopo (Fuente: Universidad de Granada, sf).

eslabones repercute en el resto y afecta a toda la cadena de valor. El desequilibrio entre la oferta de madera y la demanda industrial es el punto más sensible por el que puede romperse este equilibrio. En las últimas décadas la industria del chopo se ha podido desarrollar bajo unos nichos de mercado concretos y casi exclusivos gracias a las propiedades únicas de la madera de chopo en Europa como son el tablero contrachapado de baja densidad o el envase de productos agroalimentarios. Sin embargo, la tecnología y las técnicas para producción de chapas de madera y tableros contrachapados que durante el siglo pasado se desarrollaba en países europeos, ha sido exportado masivamente a otros continentes con mayor disponibilidad de recursos forestales.

Esto ha provocado el abaratamiento de los costes productivos en otras partes del mundo que, unido a un menor costo del transporte a nivel global, conlleva a que los productos forestales de proximidad compitan en los mercados europeos con material de otros continentes. Ante este

nuevo escenario, la industria europea ha focalizado sus esfuerzos en mejorar la eficiencia productiva, la orientación al cliente y la calidad del producto final para reducir costes acercándose al de los competidores extranjeros.

Además, buscando la diferenciación, los productores españoles han puesto el foco en la innovación y el desarrollo de nuevos productos con especial énfasis en la sostenibilidad y la economía circular (Fig. 8).



Figura 8. Productos innovadores Naturbind, tablero contrachapado de chopo encolado con bioadhesivos sin formaldehído añadido. Fireshield, tablero contrachapado de chopo resistente al fuego, clase Euroclase B-s1-d0, la más alta posible en un producto de madera. (Fuente: Garnica).

Importaciones y exportaciones de madera en rollo de chopo

Los movimientos de madera en rollo entre países sirven para equilibrar los déficits entre disponibilidad de madera y demanda de la industria. Dentro de Europa las mayores exportaciones han tenido su origen en Francia y en menor medida en Hungría debido a la alta disponibilidad del recurso por encima de la capacidad industrial instalada en estos países. Estos volúmenes han ido destinados a España y sobre todo a Italia. Italia ha sido tradicionalmente el mayor importador de madera de chopo en Europa debido a la notable reducción de la superficie de cultivo y a una importante industria doméstica especializada en el uso de la madera de chopo para todo tipo de productos desde tablero contrachapado a OSB o pulpa de papel. Además de los movimientos intraeuropeos existen exportaciones de madera en rollo de chopo con destinos extracomunitarios, fundamentalmente a Asia, desde el Norte de Francia y Bélgica.

España ha sido tradicionalmente un país importador en madera de chopo con origen casi exclusivamente desde Francia debido a la cercanía entre ambos países y la disponibilidad de madera por encima de la demanda. La proveniencia de estas maderas suele ser del Suroeste en las cuencas de los ríos Garona y Adour que son las cuencas más próximas a la frontera. Aunque las cifras oficiales sitúan en la última década un volumen anual en torno a los 15.000 m³, durante la década de los años 80 del pasado siglo los volúmenes se mantuvieron en torno a 150.000 m³ anuales. La única región española con exportaciones de madera en rollo de chopo sería la provincia de Gerona por su proximidad con Francia y su industria transformadora.

Oportunidades y puntos fuertes del chopo

El cultivo del chopo representa una excelente opción para los propietarios de terrenos ribereños. Esta actividad proporciona una materia prima sostenible, esencial para el mantenimiento de una industria orientada a la exportación y especializada. Además, promueve el desarrollo rural y contribuye a la fijación de población en las áreas menos habitadas del territorio español, la conocida como “España vaciada”.

La principal razón para que los propietarios y gestores de terrenos consideren plantar chopos es la alta rentabilidad en poco tiempo, comparado con otros usos del suelo o cultivos forestales. Con una gestión adecuada, las intervenciones selvícolas son mínimas y buscan maximizar el crecimiento y mantener el vigor de los árboles. Así, las plantaciones de chopos se presentan como una actividad económica rentable y sostenible, con un impacto positivo en el entorno rural.

La populicultura impacta positivamente en áreas rurales, tanto en la gestión forestal como en el sector industrial y sus servicios. La industria se ubica cerca de las principales cuencas productivas para reducir costos de aprovisionamiento.

Además de los beneficios socioeconómicos, las plantaciones de chopo tienen numerosos beneficios de carácter ambiental (Fig. 9) entre los cuales cabe destacar:

- **Uso adaptado a las zonas inundables:** La Populicultura es un uso adaptado a las zonas inundables que además provee notables beneficios durante las inundaciones mediante la laminación del flujo y la retención de materiales.

- **Filtro verde, fitorremediación:** las especies del género *Populus* están entre las preferidas a nivel mundial para la fitorremediación por su rápido crecimiento, profundas raíces y su capacidad de absorción de agua y nutrientes (Isebrands & Karnosky, 2001; Licht & Isebrands, 2005). La contaminación por nitratos es debida principalmente al lavado de suelos ricos en nitratos como consecuencia del uso de fertilizantes y abonos nitrogenados en las prácticas agrícolas, al ubicarse las choperas entre sistemas agrícolas y las masas de agua ejercen una función como filtros verdes, protegiendo a las masas de agua de la eutrofización.
- **Captura de CO₂:** Las plantaciones de especies forestales leñosas de corta rotación se ha demostrado como

un método efectivo para captar el CO₂ y mitigar el aumento de niveles de CO₂ atmosférico a través del aumento de almacenamiento de carbono a largo plazo en la biomasa leñosa, productos forestales, en el suelo y proporcionando bioenergía (Arevalo et al., 2011). Las choperas cuentan con un gran potencial de absorción de CO₂ ya que una hectárea captura unas 22 toneladas de CO₂ al año.

- **Corredores ecológicos:** La existencia de plantaciones de chopo en los alrededores de las riberas hace que sean utilizadas por la fauna como corredores ecológicos para su dispersión en una matriz de paisaje tan diversa (bosques de ribera y cultivos agrícolas), pudiendo actuar como red de comunicación.

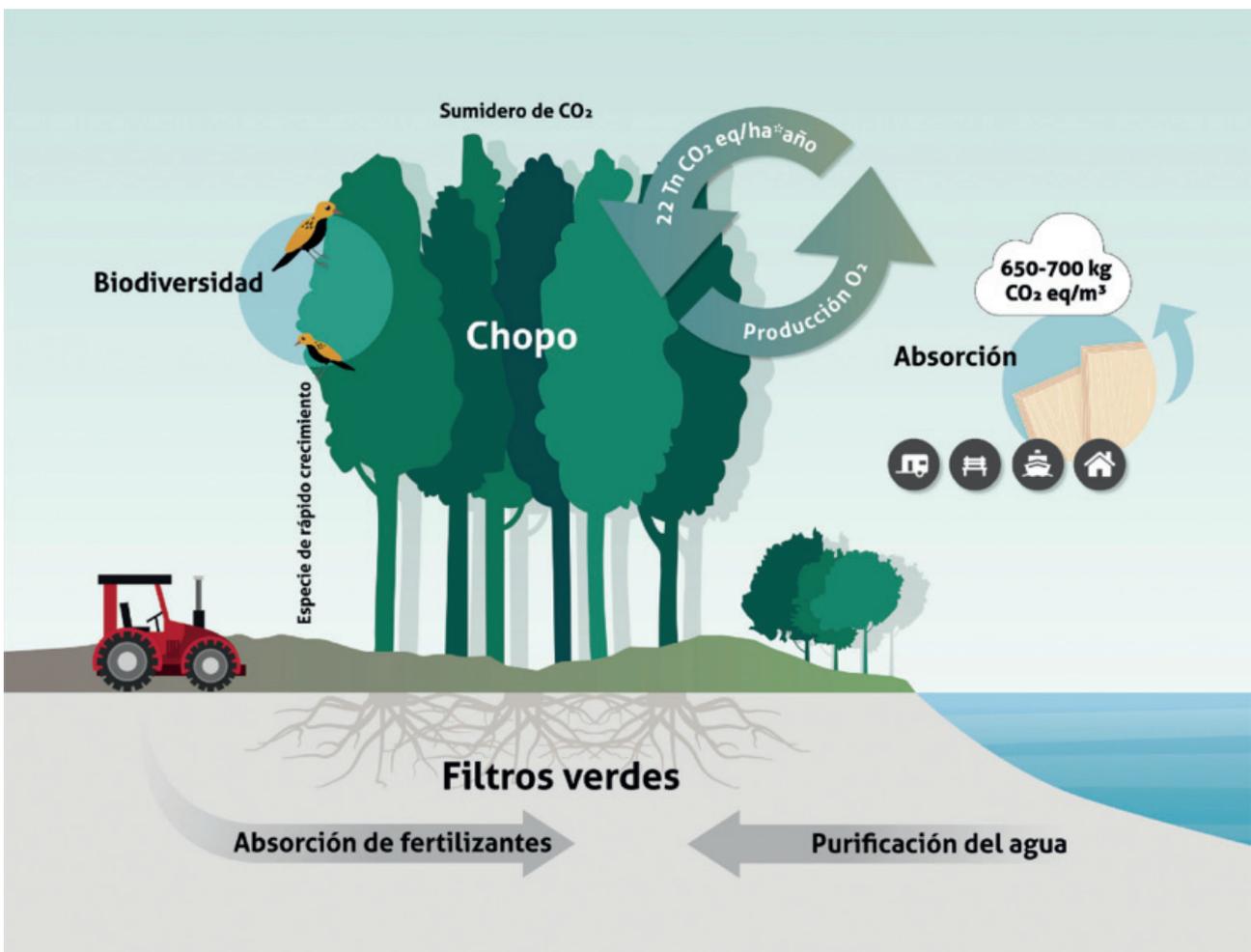


Figura 9. Beneficios ambientales de la populicultura (Fuente: Garnica).

La gestión de choperas está en un momento crucial que exige mejoras para optimizar las plantaciones. Es importante desarrollar nuevas variedades clonales que reduzcan el riesgo de plagas y enfermedades, como el pulgón lanígero (*Phloeomyzus passerinii*) en clones euroamericanos y las royas (*Melampsora* spp.) en clones interamericanos.

Las nuevas variedades clonales han sido desarrolladas con especial atención a su tolerancia frente a las principales plagas y enfermedades. En el proceso de selección, también se ha considerado su óptima adaptación a las condiciones edáficas y climáticas específicas de cada parcela. Esto amplía considerablemente las probabilidades de éxito de cada plantación mediante la mitigación de riesgos y el aumento del volumen de madera producido. En este sentido, uno de los objetivos principales del GO BIOPOPTECH, fue evaluar en términos productivos y tecnológicos nuevos clones implantados en una red de ensayos clonales a lo largo de las cuencas de los ríos Duero y Ebro

Tradicionalmente, la calidad de la madera se valora por parámetros como ausencia de nudos, diámetro, rectitud y estabilidad. Sin embargo, en la última década han surgido otros factores extrínsecos que aumentan su valor, como la trazabilidad y la sostenibilidad.

La trazabilidad al origen, legalidad, gestión y explotación de cada parcela de forma social y medioambientalmente sostenible son criterios fundamentales para el aprovisionamiento de la industria forestal. Los certificados de gestión forestal sostenible PEFC y FSC son un ejemplo al ser requisitos indispensables a la hora de comercializar el producto final en algunos mercados.

En este contexto, el Parlamento Europeo ha aprobado recientemente la entrada en vigor, el próximo 30 de diciembre de 2025, de la normativa EUDR contra la deforestación y el cambio climático. Esta normativa será de obligado

cumplimiento para la comercialización de cualquier producto procedente de las choperas, aumentando así el control administrativo en cumplimiento con la normativa medioambiental.

En relación con la Normativa EUDR, las plantaciones de chopo representan una alternativa con mayores garantías en comparación con la importación de materias primas o productos fabricados a partir de madera con origen en países de alto riesgo.

Por último, aunque la populicultura ha tenido como objetivo la producción de madera en rollo de calidad destinada al desenrollo, también permite obtener productos forestales de las partes con menor diámetro maderable para otras industrias como el aserrado de pequeñas dimensiones, pasta de papel, tablero aglomerado o en los últimos años tablero de fibras y biomasa. En estos sectores, el chopo compite con otras especies forestales y, en algunos casos, no tiene ventaja. Sin embargo, el desarrollo de productos de mayor valor añadido basados en el chopo podría mejorar la rentabilidad del cultivo de esta especie.

Puntos débiles, cuellos de botella, necesidades y riesgos

El cambio climático puede influir en las plantaciones de chopo al afectar factores como la disponibilidad de agua, la aparición de nuevas plagas o el aumento del impacto de las plagas existentes. Por ello, la investigación en mejora genética y la diversidad varietal son esenciales para adaptarse a los efectos negativos del cambio climático. Se requiere un impulso significativo en la investigación sobre la populicultura, especialmente desde el sector público, ya que actualmente hay una escasez de programas de investigación comparables a los de otras regiones europeas.

Otro riesgo es la pérdida de conocimiento de técnicas de populicultura o explotación forestal, especialmente entre pequeños propietarios y empresas. En tiempos difíciles, son el eslabón débil de la cadena de valor. Es vital evitar su cambio a otros sectores y asegurar el relevo generacional. Todos los agentes del sector deben trabajar para hacer la populicultura más atractiva.

No hay un inventario forestal continuo de choperas en toda España. En Italia, esta herramienta ha sido útil para anticipar dinámicas y mitigar riesgos en el sector. El actual MFE, actualizado en periodos largos, es insuficiente para estos fines. El Mapa Forestal de Plantaciones de Chopo es una iniciativa interesante, pero carece de un inventario asociado y seguimiento anual. Con la teledetección y la disponibilidad de imágenes satelitales, un mapa anual de choperas con clases de edad es técnicamente viable.

El sector debe fortalecer el asociacionismo y crear organizaciones sólidas que promuevan nuevos proyectos y defiendan los intereses de la populicultura, alcanzando niveles que las empresas y propietarios no pueden lograr por sí solos.

Conclusiones y propuestas de acción

La industria transformadora del chopo ejemplifica los principios de la economía circular y la bioeconomía, ya que se utiliza la totalidad de la materia prima en el proceso productivo para la fabricación de productos finales o como subproductos destinados a la producción de otros tableros o biomasa. Asimismo, casi la totalidad del consumo energético es renovable, debido al uso de residuos generados durante el propio proceso productivo para la generación de energía térmica, que constituye el

mayor requerimiento energético de estas industrias, especialmente en las etapas de secado y prensado de la chapa.

Además, el sector tiene un notable impacto sobre la fijación de empleo en las zonas rurales ya que es en estas donde se produce el recurso y numerosos puestos de trabajo tanto en la gestión de estas masas como en su transformación en productos de valor añadido. Se estima que por cada hectárea de chopos plantados existe de media 5 jornales anuales en trabajos forestales y para transformar su madera en productos de valor añadido se emplean al menos 110 jornales más (Observatorio Industrial de la Madera y el Mueble, 2010).

Las plantaciones de chopo se concentran en zonas rurales de provincias con poca densidad de población como Palencia, Zamora, León o Soria. En estas áreas, los ingresos económicos derivados de la populicultura son importantes para muchas entidades locales propietarias de terrenos plantados con chopos. Desde el punto de vista medioambiental, las choperas aportan un valor añadido al paisaje y a las actividades características de estos entornos rurales, contribuyendo además a mitigar algunas consecuencias del cambio climático.

Las plantaciones de chopos en las riberas de muchos ríos en España producen madera ligera y de rápido crecimiento desde hace más de un siglo. Esto ha permitido que la populicultura y su industria se desarrollen en mercados internacionales, sustituyendo a productos de especies tropicales o plásticos.

La continuidad de la actividad enfrenta riesgos como el cambio climático y los ciclos de mercado. La mejor solución es desarrollar nuevas variedades clonales adaptadas a la calidad de estación. Además, la industria debe seguir innovando en productos y eficiencia para mantenerse competitiva globalmente.

El desarrollo del chopo como producto de alto valor, cumpliendo

con los certificados de gestión forestal sostenible y la normativa EUDR contra la deforestación, es fundamental. A nivel sectorial, es crucial fomentar el asociacionismo y proyectos conjuntos. La creación de un inventario continuo de choperas en España permitirá evaluar, anticipar y establecer medidas correctoras de manera eficiente. Cada parte de la cadena de valor del chopo debe evolucionar para seguir aportando valor, rentabilidad y sostenibilidad, respondiendo a una sociedad cada vez más exigente con los productos y el medio ambiente.

Estudios previos relevantes

Arevalo, C. B. M., Bhatti, J. S., Chang, S. X., & Sidders, D. (2011). Land use change effects on ecosystem carbon balance: From agricultural to hybrid poplar plantation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3-4), 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.013>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *Synthesis of country progress reports: The International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment (IPC), Twenty-seventh Session, 22-25 October 2024*. Rome: FAO. Unpublished

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Synthesis of country progress reports: The International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment (IPC), Twenty-sixth Session, 5-8 October 2021*. Rome: FAO. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b2e5b7fa-8096-42e1-85da-ac65b5da7287/content>

FSC España. (2023, 5 de febrero). Firme compromiso del gobierno español en materia forestal. FSC España. <https://www.es.fsc.org/es-es/newsfeed/firme-compromiso-del-gobierno-espanol-en-materia-foresta>

Fundación Cotec para la Innovación. (2024). *Madera contrachapada*. La Complejidad Económica en España. Recuperado de <https://complejidadeconomica.cotec.es/informe/producto/madera-contrachapada>

Isebrands, J. G., & Karnosky, D. F. (2001). Poplar Culture in North America (D. I. Dickmann, J. G. Isebrands, J. E. Eckenwalder, & J. Richardson (eds.); Research C).

Junta de Castilla y León. (s.f.). Aprovechamiento de madera: Destino de la madera. Junta de Castilla y León. https://datos.pfcyl.es/indices/madera/aprovechamiento_madera/12#destino_madera&Grafico_8_new

Licht, L. A., & Isebrands, J. G. (2005). Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 28, 203-218.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (n.d.). **Choperas: Mapa de distribución**. Banco de Datos de la Naturaleza. Recuperado el 29 de enero de 2025, de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/choperas_mapa.html

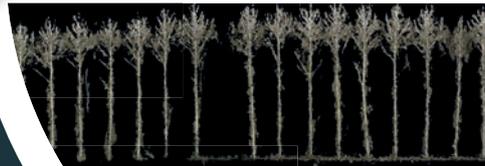
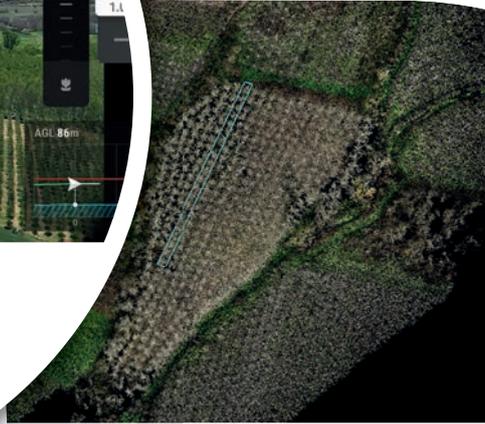
Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Choperas: Mapa de distribución. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/choperas_mapa.html

CAPÍTULO 2

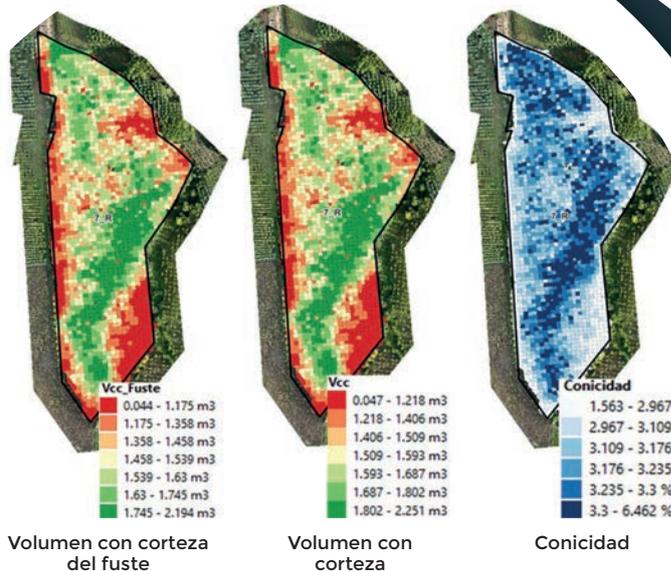
Estimación de variables dendrométricas del chopo a partir de vuelos fotogramétricos.



Obtención de datos remotos con dron y fotogrametría.



Delineación de copas, recorte y cálculo de métricas y alturas.



Ajuste y evaluación de los modelos, estimación de variables dendrométricas relevantes para la gestión forestal a nivel de parcela.



Mejora en: Eficiencia, precisión y reducción de costos en los inventarios de choperas

Aitor Arraiza Santillán
Föra Forest Technologies SLL

Rafael Alonso Ponce
Föra Forest Technologies SLL
Instituto Universitario de Investigación Gestión
Forestal Sostenible iuFOR

Esther Merlo Sánchez
Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL

2. ESTIMACIÓN DE VARIABLES DENDROMÉTRICAS DEL CHOPO A PARTIR DE VUELOS FOTOGRAMÉTRICOS.

Introducción

Las plantaciones de rápido crecimiento y ciclo corto del género *Populus* son una de las más importantes para la producción de madera en España y constituyen la fuente de materia prima para productos de muy alta calidad y valor añadido como son el tablero contrachapado y el *laminated strand lumber (LSL)*. Sin embargo, aún existen ciertas carencias en cuanto a la digitalización de toda la cadena de suministro, en particular en lo que se refiere a la evaluación del recurso en pie, antes del aprovechamiento.

A este respecto, la captura de datos mediante sensores remotos supone una radical mejora en cuanto a rendimientos y precisión para calcular numerosas variables como el volumen en pie, la longitud del fuste libre de ramas o la conicidad del fuste, todas ellas de gran trascendencia para una gestión óptima de las plantaciones de chopo.

La semi automatización de todo el proceso (planificación del vuelo, vuelo, procesado de datos, cálculo de variables) significaría además una reducción muy relevante tanto en tiempo como en recursos y por lo tanto un aumento de la rentabilidad de este tipo de plantaciones.



Objetivos

El objetivo de este trabajo fue analizar el potencial de los datos remotos adquiridos con drones mediante vuelos fotogramétricos para la estimación de variables dendrométricas de los árboles detectados mediante algoritmos de individualización a partir de nubes de puntos obtenidas tras el procesado de los datos remotos capturados.

La razón de focalizar el análisis en la información fotogramétrica es operativa y económica: este tipo de vuelos son mucho más rápidos y baratos comparados con la captura de datos con sensores LiDAR, por lo que conseguir obtener información sólida y útil para la evaluación cuantitativa de las existencias maderables en choperas en producción, incluso para calidad de la madera en pie, constituye un paso adelante muy significativo en la mejora de la eficiencia de la gestión de este tipo de plantaciones.

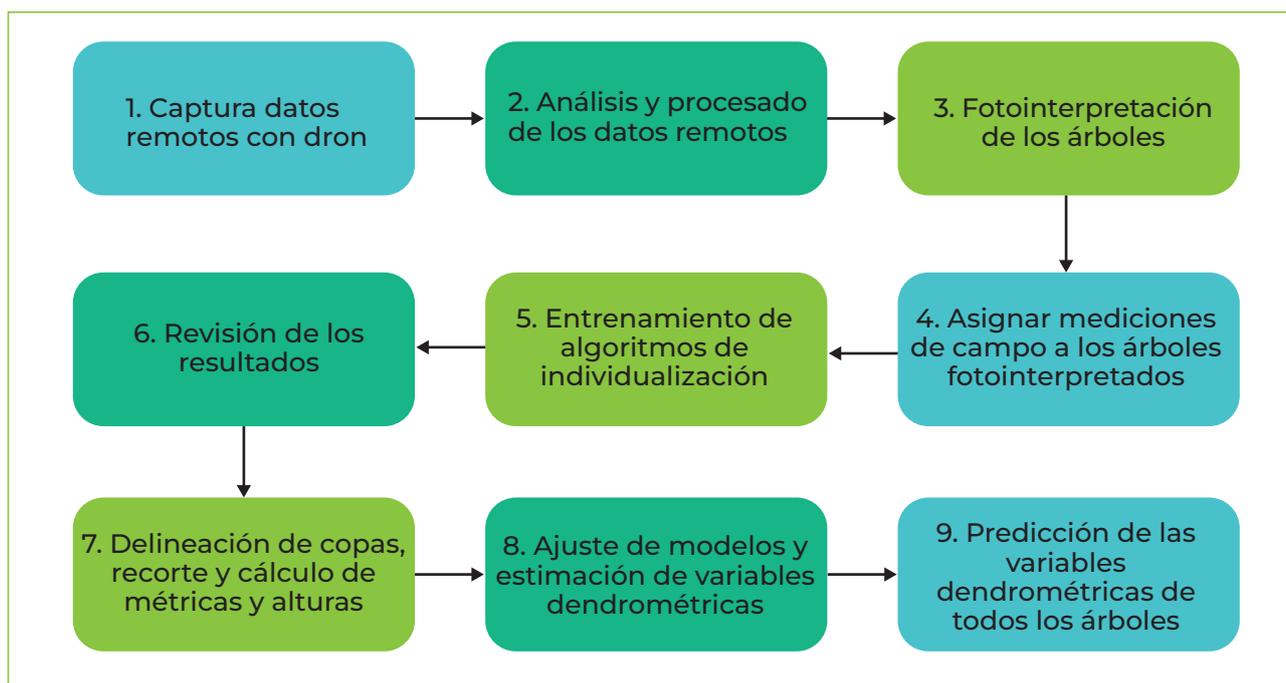
Las variables dendrométricas objetivo fueron cuatro: altura total, diámetro normal, diámetro de la base y altura de la base de la copa viva. A partir de ellas se pueden a su vez derivar directamente otras muy relevantes como pueden ser

la conicidad, la esbeltez, el volumen con corteza (total y por productos, a partir de ecuaciones de perfil ya publicadas) o la biomasa (y por tanto el stock de carbono, a partir de ecuaciones alométricas ya publicadas).

Metodología

A continuación, se describe la metodología llevada a cabo para la captura de los datos remotos, el procesado y la identificación de árboles de forma automática mediante algoritmos basados en máximos locales a partir de Modelos de la Altura de la Vegetación (MDAV). Los árboles identificados a partir del procesado de los datos remotos, junto con las mediciones tomadas en campo (diámetro normal y diámetro de la base) sobre una muestra de un total de 320 árboles de los diferentes clones objeto de estudio, han permitido ajustar unos modelos estadísticos para estimar las variables dendrométricas de todos los pies presentes en cada una de las plantaciones.

Imagen 1. Esquema de la metodología llevada a cabo.



1. Captura de datos remotos con dron

La captura de los datos remotos (mediante vuelos fotogramétricos) y en las plantaciones objeto de estudio se realizó con un dron Mavic 3 con cámara multiespectral.

Para planificar los vuelos se empleó el software DJI Pilot 2 y se evaluaron distintas alturas de vuelo (75, 90 y 100 m), con el fin de poder determinar el tamaño de píxel óptimo, tanto para generar ortomosaicos RGB y RGB-NiR, índices de vegetación como para generar nubes de puntos a partir de la técnica de SFM (*Structure From Motion*).

Para asegurar un solapamiento adecuado y capturar con precisión las copas de los árboles, que generalmente se encontraban entre 15 y 25 metros sobre el suelo, se configuró un solapamiento entre las diferentes pasadas del vuelo del 90% tanto en vertical como en horizontal. De esta forma podemos garantizar la generación de ortomosaicos continuos

y detallados, imprescindibles para los análisis posteriores.

Se realizaron vuelos en dos épocas distintas del año para evaluar las condiciones tanto en actividad vegetativa (primavera y verano) como en parada vegetativa (finales de otoño e invierno). Durante la actividad vegetativa, los datos permitieron calcular índices de vegetación y generar ortomosaicos que reflejan la altura de los chopos y la fracción de cabida cubierta. Aunque esta información no se ha empleado para estimar las variables dendrométricas, es capital para entender la densidad y la salud del bosque. En contraste, durante la parada vegetativa, los vuelos se centraron en caracterizar la altura de la vegetación y la forma de los troncos. La ausencia de hojas en esta época permite una mejor visibilidad de la estructura de los troncos y facilita la evaluación de su forma a partir de la nube de puntos 3D generada permitiendo medir variables como la altura de la base de la copa viva.



Imagen 2. Plan de vuelo (izquierda) y miembros de Föra y la UVA planificando un vuelo fotogramétrico en una de las plantaciones estudiadas.

En la Tabla 1, se muestra el tipo de datos capturados en cada una de las parcelas analizadas:

Tabla 1. Datos remotos capturados en las parcelas productivas identificadas según el clon.

PARCELA	CLON	DATOS CAPTURADOS
Hacinas	I-214	FOTOGAMETRÍA
Santa Cruz de Campezo	I-214	FOTOGAMETRÍA
	MC	FOTOGAMETRÍA
	BEAUPRE	FOTOGAMETRÍA
Aldea del Puente	I-214	FOTOGAMETRÍA
Vecilla de la Vega	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Baños del Río Tobía	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Santa Marina del Rey	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Bercianos del Páramo	BEAUPRE	FOTOGAMETRÍA

2. Análisis y procesado de los datos remotos

El procesado de los datos remotos capturados se puede dividir en dos partes, preprocesado con Pix4Dmapper y procesado con easyLAZ®.

2.1. Preprocesado de los datos remotos en Pix4Dmapper®

En primer lugar, se realizó un preprocesado empleando el software Pix4Dmapper. Este software permite obtener ortomosaicos RGB y RGB-Nir, índices de vegetación (NDVI, SAVI, etc) y nubes de puntos LiDAR y fotogramétricas clasificadas. Estas nubes de puntos permiten caracterizar mejor la estructura del dosel forestal y la vegetación subyacente. Además, la alta resolución de los ortomosaicos y la precisión de los índices de vegetación proporcionan información detallada sobre la salud y vigorosidad de las choperas.

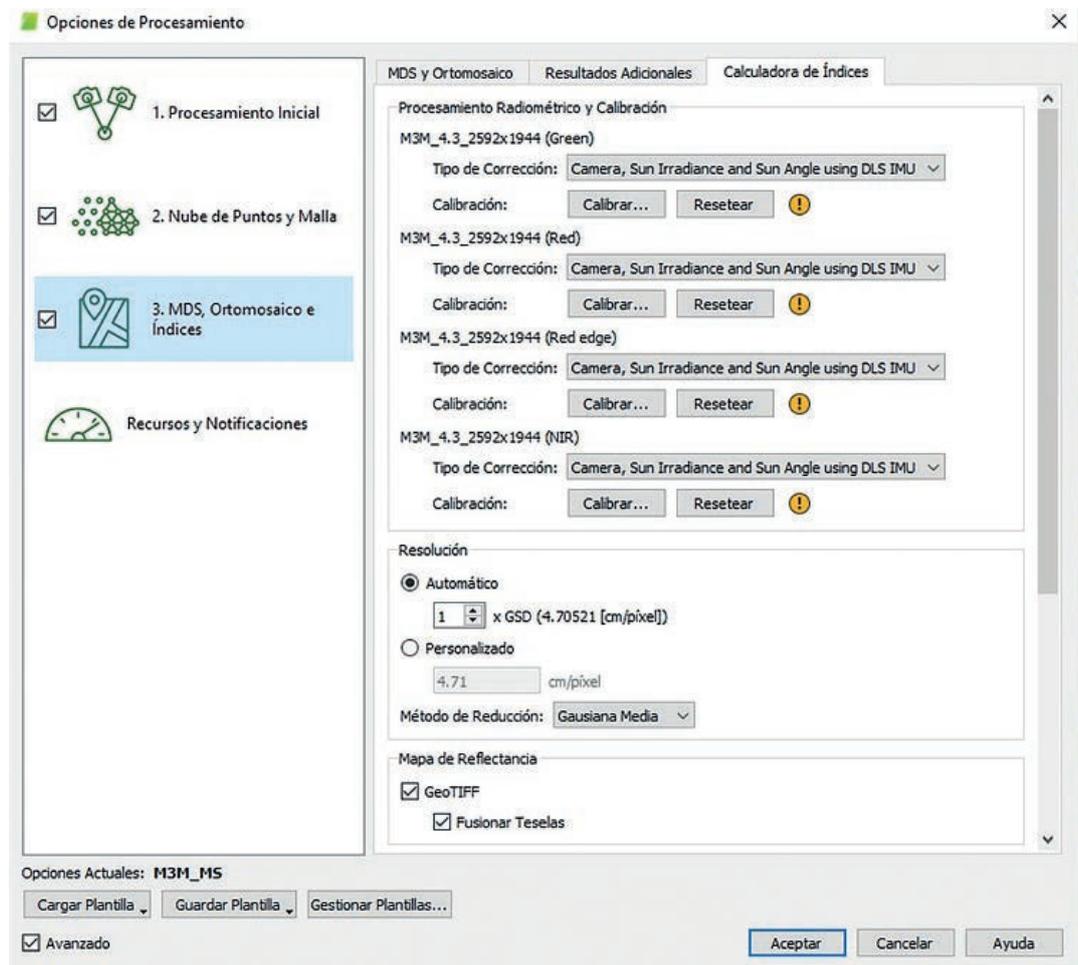


Imagen 3. Parámetros para el procesado del vuelo fotogramétrico con Pix4Dmapper.

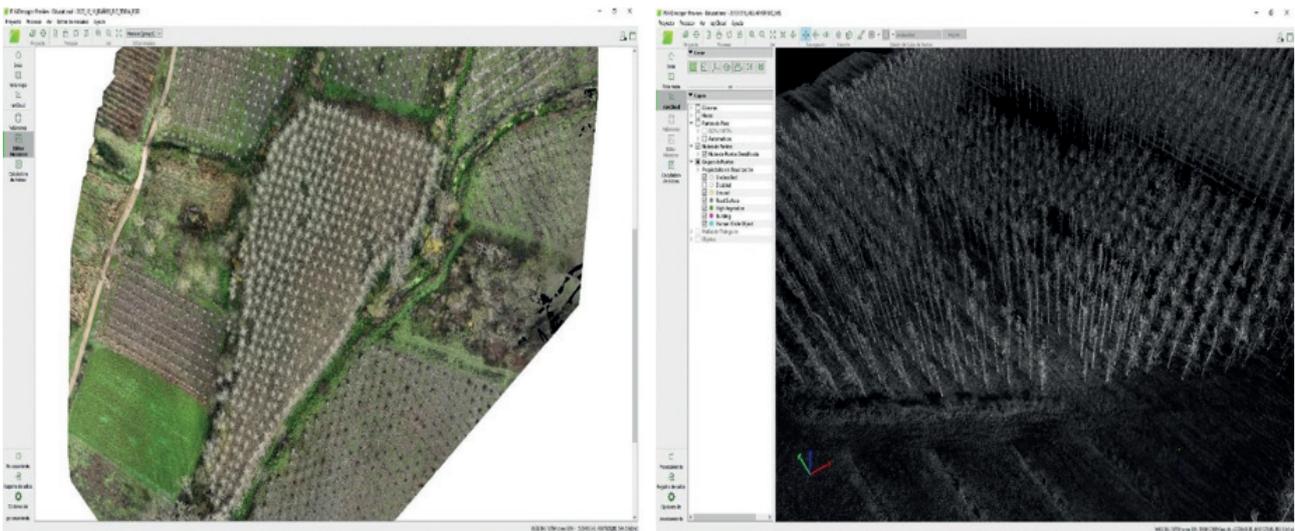


Imagen 4. Nubes de puntos fotogramétricas obtenidas en Pix4Dmapper.

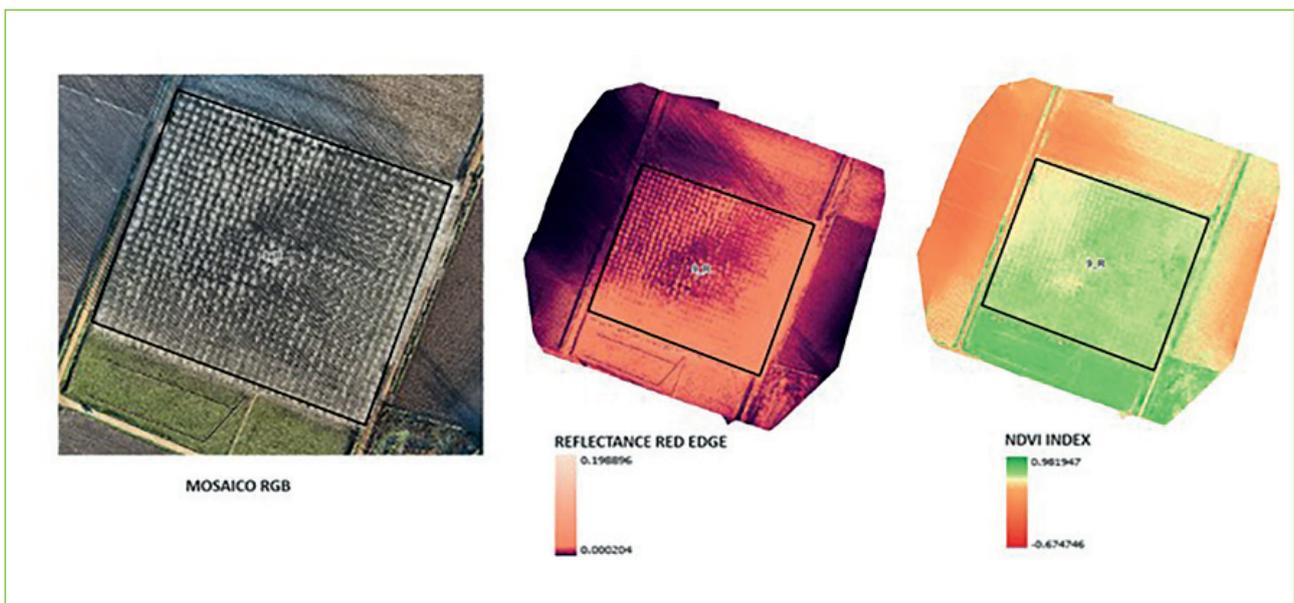


Imagen 5. Índices de vegetación y Ortomosaico RGB obtenidos en Pix4Dmapper.

2.2. Procesado de datos con easyLAZ®

Una vez obtenidas las nubes de puntos se procesaron con el software easyLAZ®, desarrollado por Föra. Este software permite el análisis y procesamiento masivo de datos LiDAR y/o fotogramétricos para la obtención de Modelos Digitales de Elevaciones,

estadísticos y otros productos de interés para la caracterización y evaluación de las parcelas objeto de estudio.

Antes de procesar los datos remotos en easyLAZ®, se realizó una revisión previa de las nubes de puntos generadas con Pix4Dmapper con el objetivo de buscar errores en la clasificación de los datos.

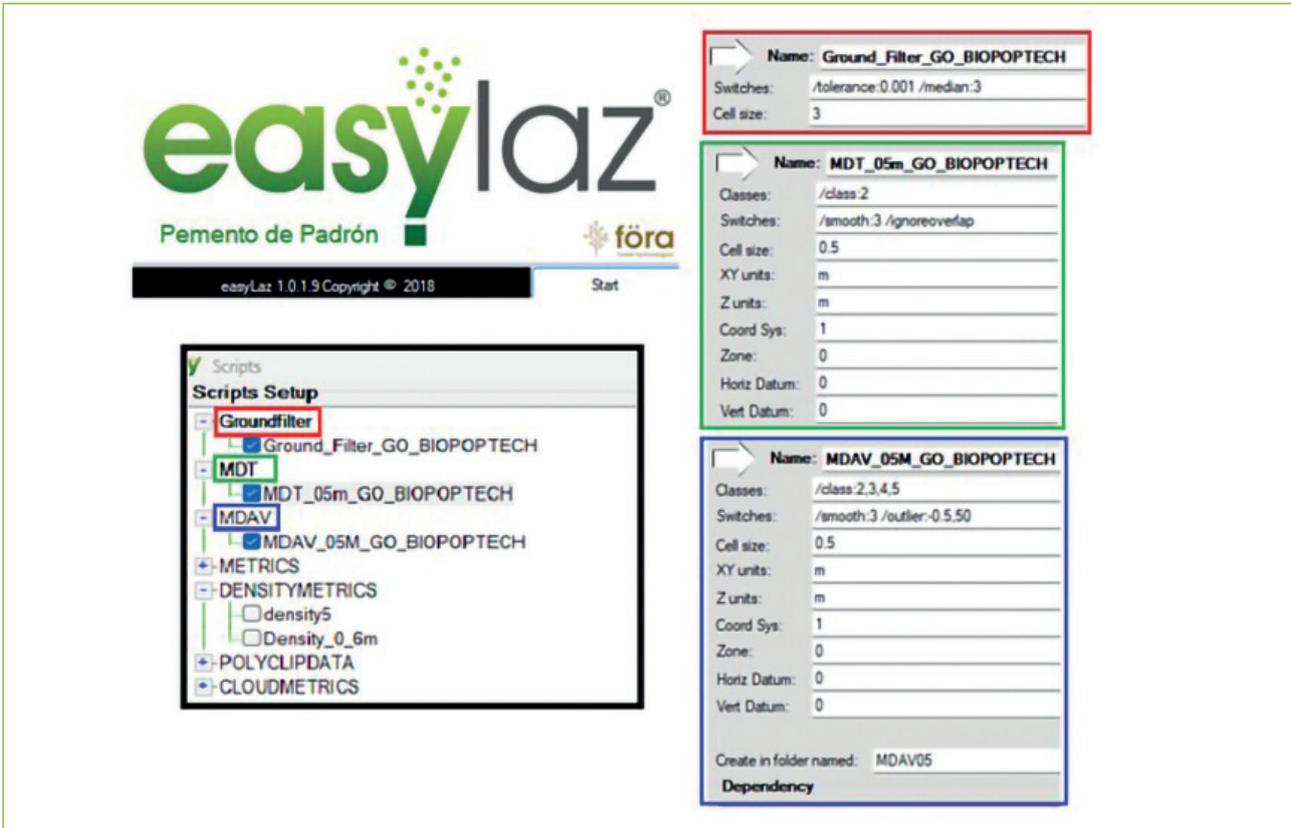


Imagen 6. Parámetros empleados en easyLAZ para el procesado de las nubes de puntos y generación de productos.

Revisión de las nubes de puntos

Este paso es vital para poder asegurarnos la calidad de los productos derivados del procesado de las nubes de puntos en easyLAZ.

Para poder obtener Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs) precisos, es imprescindible que los puntos correspon-

dientes al suelo y a la vegetación estén bien clasificados. En el caso de encontrar errores en la clasificación de los puntos automática del software Pix4Dmapper, es necesario realizar una reclasificación de las nubes de puntos para corregir aquellos retornos mal clasificados y así poder asegurar la calidad y precisión de los productos generados con easyLAZ.

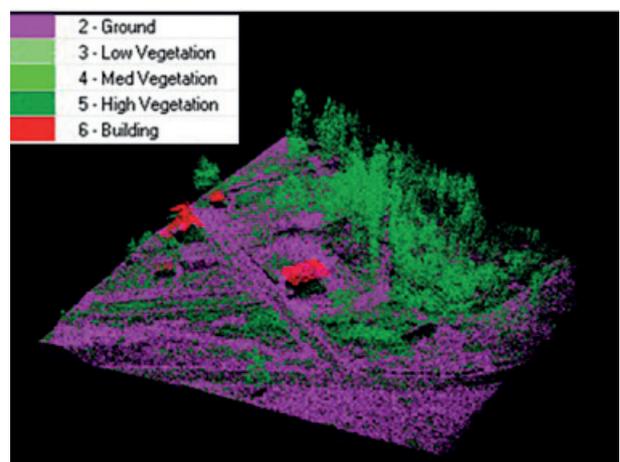
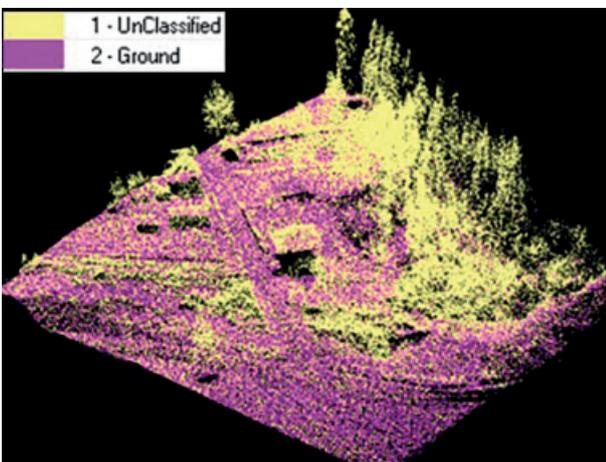


Imagen 7. Nube de puntos sin clasificar (izquierda) y nube de puntos clasificada (derecha).

Generación de Modelos Digitales de elevaciones (MDE)

A partir de las nubes de puntos clasificadas y empleando el software easyLAZ se han generado los siguientes productos:

- **Modelos Digitales del Terreno (MDT):** Representan digitalmente la topografía del suelo y del terreno y se obtienen de forma directa a partir de la interpolación de los puntos clasificados como suelo.

- **Modelos Digitales de la Altura de la Vegetación (MDAV):** Se trata de un modelo digital normalizado que representa la altura de la vegetación. Se obtiene de forma directa mediante easyLAZ a partir de los puntos clasificados como suelo y vegetación a los que se les ha asignado la altura con respecto al terreno (alturas normalizadas).

3. Fotointerpretación de los árboles

A partir de los ortomosaicos generados con Pix4Dmapper, ortofotografías aéreas del programa PNOA del IGN próximas a la fecha de plantación de las parcelas productivas y los MDAV generados con easyLAZ se ha realizado una fotointerpretación o, en otras palabras, una identificación “manual” de los pies presentes en cada una de las parcelas objeto de estudio a los que se les ha asignado a un identificador único.

El objetivo de este paso es poder registrar de forma inequívoca cada uno de los árboles fotointerpretados para posteriormente poder asignarles las mediciones tomadas en campo (diámetro normal y diámetro de la base) sobre una muestra de 320 árboles inventariados.

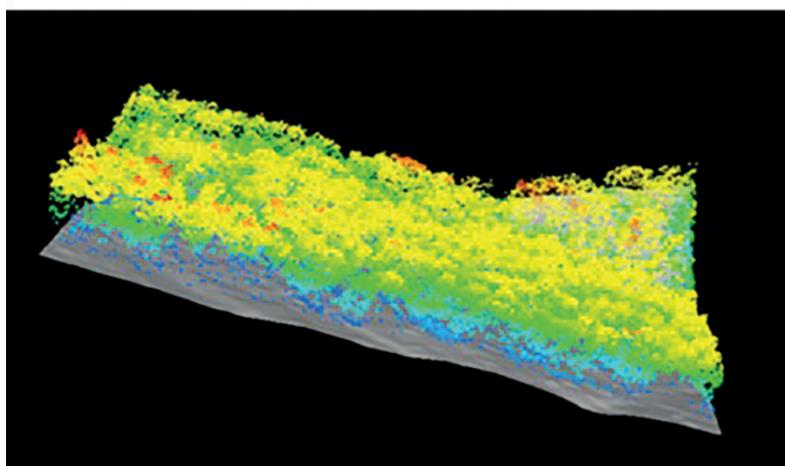
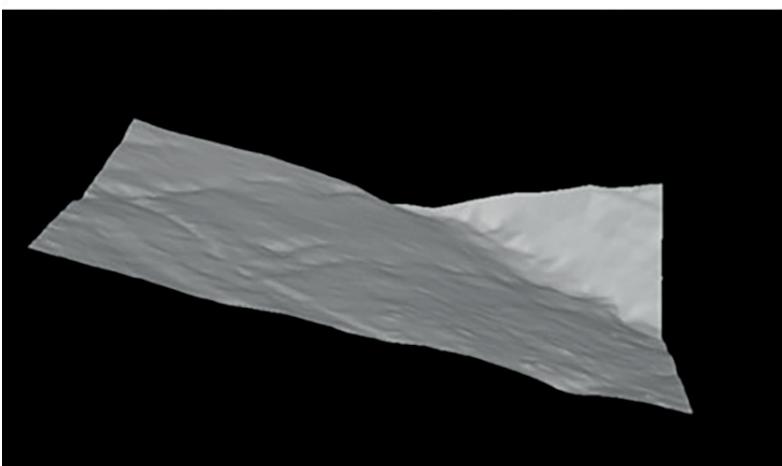
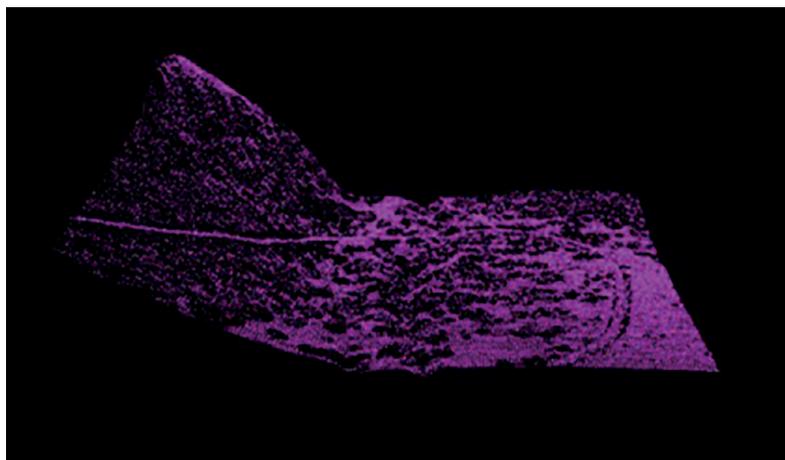
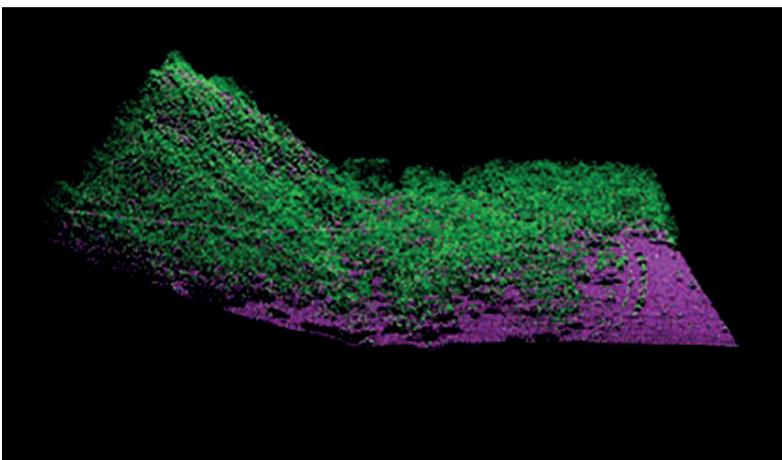


Imagen 8. Nube de puntos sin filtrar (arriba izquierda), puntos clasificados como suelo (arriba derecha), MDT (abajo izquierda) y superposición MDT con la nube de puntos normalizada (abajo derecha).

4. Asignación de mediciones de campo a los árboles fotointerpretados

El inventario de campo consistió en la medición del diámetro normal y el diámetro de la base de una muestra representativa en cada una de las parcelas objeto de estudio. Para ello, se identificó en campo un árbol de referencia fácilmente identificable en el ortomosaico de cada parcela denominado “árbol ancla”, y a cada uno de los árboles a los que se les midió el diámetro se le asignó un identificador correspondiente a su posición contando las filas y las columnas de las líneas de plantación donde se encontraba ubicado.

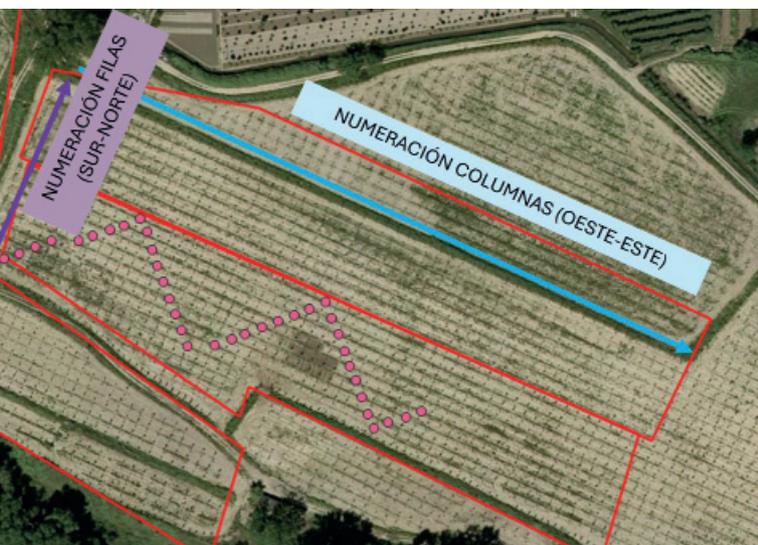


Imagen 9. Árbol ancla (punto amarillo), pies medidos en campo (puntos rosas) y dirección tomada para asignar la posición de cada árbol medido.

5. Entrenamiento de algoritmos de individualización

Los árboles fotointerpretados han servido como “verdad terreno” para entrenar los algoritmos de individualización de pies basados en máximos locales de los Modelos Digitales de la Altura de la Vegetación (MDAV).

A partir de los pies fotointerpretados en cada una de las parcelas se buscaron los parámetros óptimos de los algoritmos

de individualización (altura mínima, ancho de la ventana de búsqueda de máximos locales, etc.) con el objetivo de que el algoritmo detecte como mínimo aquellos pies fotointerpretados. Una vez definidos los parámetros óptimos para encontrar los árboles, se le asignó a cada pie de forma automática la siguiente información: identificador de árbol, posición (fila + columna) y los diámetros medidos en campo.

Como resultado se obtuvo un archivo vectorial en formato “shp” con la posición de cada uno de los árboles y su información.

En la Imagen 10, se pueden observar los resultados de la individualización de los árboles (puntos azules) y los árboles fotointerpretados (puntos naranjas). Las desviaciones que se observan entre unos puntos y otros pueden ser debidas a que las ortofotografías del PNOA empleadas para la fotointerpretación de los árboles pueden tener pequeñas desviaciones en la ortorectificación frente a los MDAV generados a partir del procesado de los datos fotogramétricos.

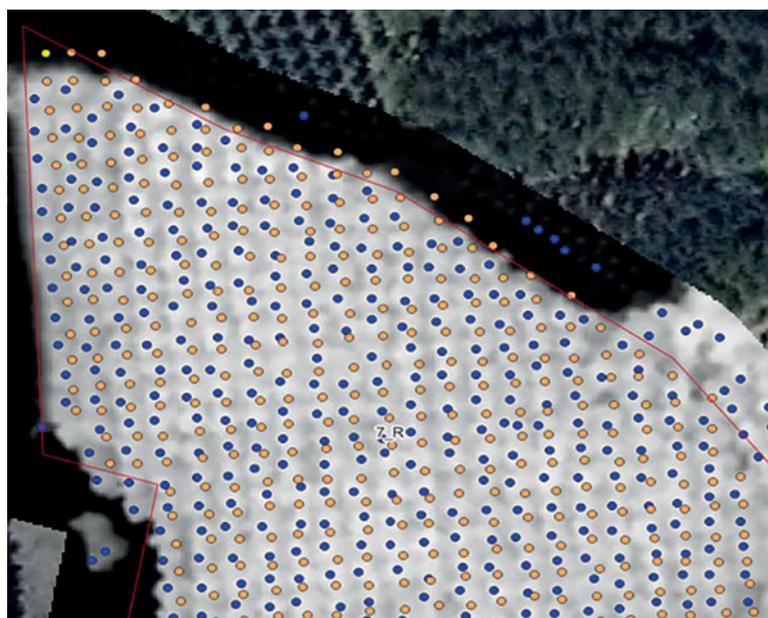


Imagen 10. Resultados de la individualización (puntos azules) vs árboles fotointerpretados (puntos naranjas).

6. Revisión de los resultados

Una vez seleccionados los parámetros óptimos para la detección de los árboles y asignada la información descrita en el paso 5, se ha realizado una validación de los resultados con el objetivo de detectar posibles errores en la identificación de los pies presentes en cada una de las parcelas. Los errores más comunes que podemos encontrarnos son errores de omisión, es decir, árboles que no han sido identificados por el algoritmo, denominados “falsos negativos” (FN), y errores de comisión en aquellos casos en los que el algoritmo haya detectado más de un árbol donde sólo había uno, denominados “falsos positivos” (FP).

Los pies identificados como FP se eliminaron de la base de datos, mientras que en el caso de los FN se procedió a añadir de forma manual los árboles empleando como referencia los ortomosaicos y los MDAV.

7. Delineación de copas, recorte y cálculo de métricas y alturas

Una vez revisados los resultados, el siguiente paso consistió en dibujar las copas de cada uno de los árboles de forma automática. Los algoritmos que se emplean están basados en métodos segmentación de cuencas a partir de los MDAV generados tras el procesado de las nubes de puntos.

Estos algoritmos implementan una función para segmentar, es decir, delinear

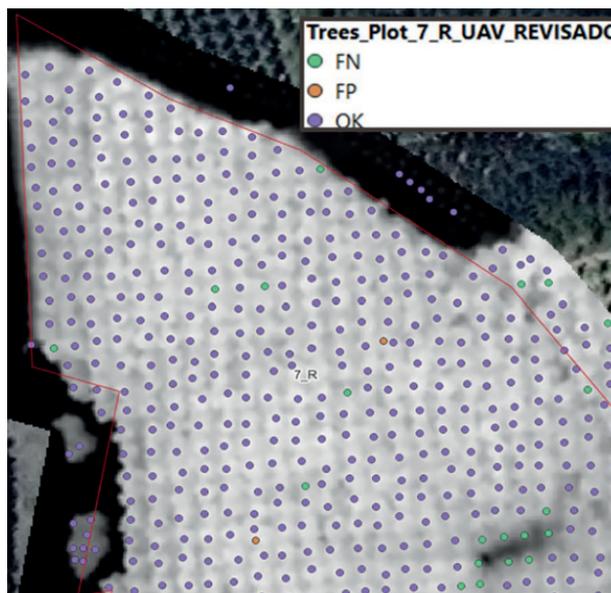


Imagen 11. Ejemplo de falsos negativos (puntos verdes) y falsos positivos (puntos naranjas) en una de las parcelas analizadas.

el perímetro de cada copa a partir de un MDAV calculando de forma automática tanto el área de cada copa como su diámetro a partir del archivo vectorial con la posición de cada uno de los árboles individualizados.

El resultado es un archivo vectorial en formato “shp” con los polígonos correspondientes a la copa de cada uno de los árboles detectados. Estos polígonos nos permitirán recortar las nubes de puntos contenidas en cada una de las copas delineadas para posteriormente poder calcular sus métricas.

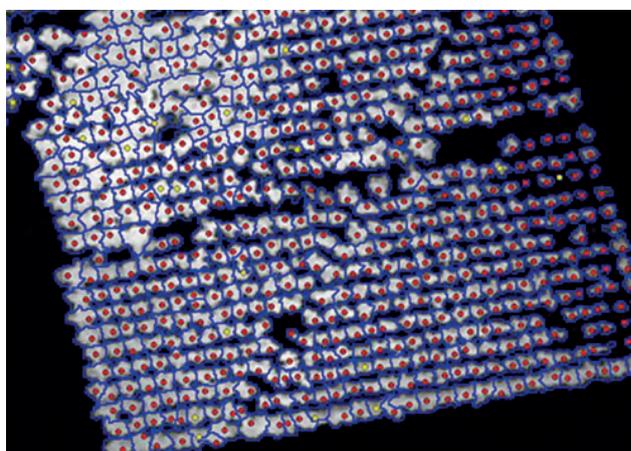


Imagen 12. Resultados de la delineación de copas.

7.1. Recorte de las nubes de puntos a partir de las copas delineadas

El recorte de las nubes de puntos de cada una de las copas se realizó con la herramienta *PolyClipdata* del software gratuito FUSION para el procesado de datos LiDAR y/o fotogramétricos.

En la Imagen 12 se pueden observar dos nubes de puntos fotogramétricas recortadas a partir de la delineación de las copas tanto en periodo de actividad vegetativa como en parada vegetativa. La adquisición de los datos remotos en parada vegetativa permite visualizar tanto el fuste como la copa del árbol. Esto nos permite poder tomar otra serie de mediciones analizando la nube de puntos como la altura de la base de la copa viva.

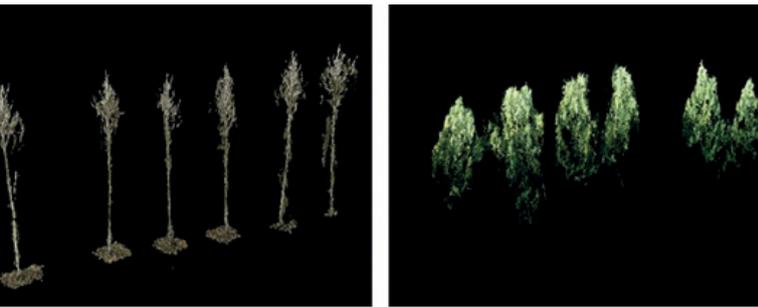


Imagen 13. Nubes de puntos fotogramétricas recortadas de las copas de los árboles en parada vegetativa (izquierda) vs nubes de puntos recortadas en actividad vegetativa (derecha).

7.2. Cálculo de métricas

Una vez recortadas las nubes de puntos correspondientes a cada una de las copas delineadas, se calcularon las estadísticas (métricas fotogramétricas) de cada una de las copas recortadas. Para ello se empleó la herramienta *CloudMetrics* del FUSION y como resultado se obtuvo un archivo en formato “CSV” con los estadísticos de cada una de las copas.

A partir de esta información y con las mediciones realizadas en campo se generó una base de datos que se empleó para ajustar los modelos estadísticos para la estimación de las principales variables dendrométricas de interés.

7.3. Cálculo de alturas

Por último, se visualizaron las nubes de puntos recortadas de aquellos árboles sobre los que se habían tomado mediciones en campo con el objetivo de poder medir sin necesidad de ir a campo la altura de la base de la copa como una variable adicional para tratar de modelizarla. Los resultados de las mediciones de la altura de la base de la copa se incluyeron en la base de datos con las métricas y las mediciones realizadas en campo. Es importante destacar que, en el caso de la altura total, esta variable no ha sido estimada mediante las ecuaciones ajustadas, sino directamente medida a partir de la nube de puntos fotogramétricas. La precisión de esta medición es mucho mayor que la que pueda ser obtenida desde el suelo con los aparatos tradicionales (hipsómetro, Vertex, etc.)

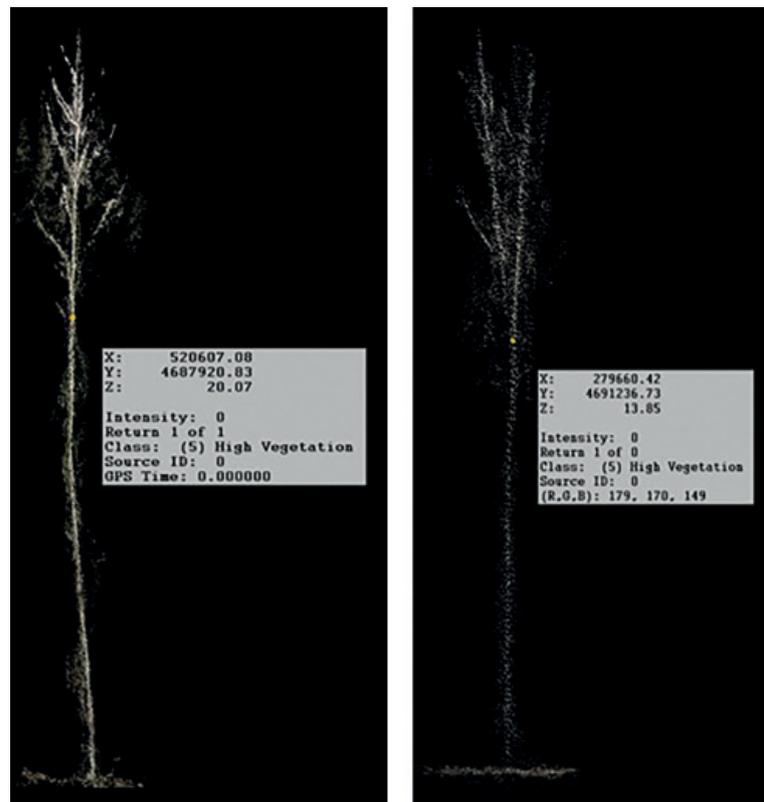


Imagen 14. Ejemplo de la medición de la Altura de la Base de la Copa a partir de la nube de puntos fotogramétrica recortada para un clon de Raspalje (izquierda) y un clon de Beaupre (derecha) en una de las parcelas de estudio.

Esta metodología que permite realizar mediciones sin la necesidad de ir al campo puede considerarse un gran avance en la estimación de variables dendrométricas a partir de vuelos fotogramétricos, pudiendo realizar inventarios pie a pie a partir de la captura y procesado de nubes de puntos fotogramétricas reduciendo considerablemente los costes, tanto de adquisición de otro tipo de datos remotos como por ejemplo con sensores LiDAR como de realizar mediciones pie a pie.

8. Ajuste de modelos y estimación de variables dendrométricas

En los siguientes apartados se describe el proceso de ajuste empleado y los resultados obtenidos.

8.1. Confección de la base de datos para el ajuste de los modelos

Como se ha explicado, para ajustar y validar los modelos matemáticos se ha dispuesto de una muestra de 320 árboles en las 9 plantaciones de los clones I-214, Beaupré, MC y Raspalje, ubicadas en las cuencas del Duero y del Ebro. Junto con las mediciones realizadas en campo y la altura de la base de la copa medida de forma manual a partir de las nubes de puntos de los árboles recortados se generó una base de datos en la que se incluyeron los siguientes grupos de variables:

- » Identificadores de parcela, clon y árbol junto con las coordenadas X e Y de cada uno de los árboles identificados mediante los algoritmos de individualización.
- » Variables explicativas dentro y dasométricas:
 - Densidad local mediante el método del sexto árbol (N6, pies/ha), es decir, calculada considerando una parcela circular con centro en el árbol objetivo y radio la distancia al sexto vecino más próximo.

- Altura “dominante local” a partir de la media de los cuatro árboles más altos de entre el árbol objetivo y los seis más próximos (HO, m)
 - Índice de Hart-Beaking local: Se calcula a partir de la densidad local y la altura dominante local (IH, %).
 - Altura total del árbol objetivo (ht, m)
 - Índice de competencia basado en las alturas, considerando los seis árboles vecinos más próximos (htl, adimensional).
 - Área de la proyección ortogonal de la copa del árbol objetivo (*crownArea*, m²)
- » Variables explicativas remotas: métricas fotogramétricas obtenidas a partir del procesado de las nubes de puntos para cada uno de los pies individualizados: Estas métricas, incluyen variables relacionadas con la distribución de las alturas (medias, percentiles, etc.), variables relacionadas con la variación (varianza, rangos intercuartílicos, etc.) y variables relacionadas con la cobertura (porcentaje de primeros retornos, número de total de retornos, etc.)
- » Variables a predecir:
- Diámetro normal (dn, cm)
 - Diámetro de la base del fuste (db, cm)
 - Altura de la base de la copa viva (hcb, m)
- » A partir de las tres anteriores es posible calcular, además, las siguientes variables dendrométricas de interés:
- Volumen total con corteza (vcc, m³)
 - Volumen con corteza del fuste (vcc_fuste, m³)
 - Conicidad (%)

8.2. Ajuste y evaluación de los modelos

La formulación matemática empleada para cada variable a predecir es un aspecto clave en cualquier procedimiento de modelización. Así, las propiedades matemáticas de cada función deben reflejar de la manera más fiel posible el comportamiento biológico del árbol en lo que a la variable modelizada se refiere.

En un principio se ajustaron ecuaciones comunes a todos los clones, pero, aunque la bondad del ajuste fue satisfactoria, su capacidad predictiva para cada clon individualmente resultó muy inferior a lo considerado razonable. Por ello se optó por ajustar ecuaciones de manera independiente para cada clon, obteniéndose resultados muy satisfactorios, con predicciones insesgadas y errores medios cuadráticos en el rango del 8- 15%.

Todo el proceso de ajuste y evaluación del modelo se ejecutó en el paquete estadístico R. En el caso de los diámetros normal y de la base se probaron formulaciones exponenciales y potenciales, en su versión linealizada, mientras que para la altura de la base de la copa viva se empleó una función logística con asíntota en la altura total.

La evaluación de los modelos obtenidos se realizó a través del análisis de la eficiencia del modelo (EF), que refleja la parte de la varianza total explicada por el modelo; el error medio cuadrático (RMSE) que analiza la precisión de las

estimaciones y el sesgo y su significancia, que evalúa la desviación sistemática de las predicciones.

8.3. Resultados de los modelos para la estimación de las variables dendrométricas

Los resultados de los ajustes, así como su diagnóstico, para cada clon y variables dependientes, se presentan a continuación. Todos los parámetros ajustados son significativos ($p < 0.05$) y la formulación obtenida (signo del parámetro de cada variable independiente) tiene sentido biológico en todos los casos.

Diámetro normal (dn):

Las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, y unos errores medios cuadráticos que oscilan entre 9-15%. Las eficiencias son moderadas o bajas, denotando que los modelos no explican una parte importante de la varianza. La variable predictora más frecuentemente seleccionada es la densidad local (N6, mediante el método del sexto árbol), seguida del percentil 95 de las alturas (LH_P95), en dos. La formulación de tres de los clones es análoga, siendo claramente distinta para el clon I-214.

La bondad del ajuste de los modelos muestra que no se observan divergencias graves de las asunciones de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

Tabla 2. Modelos ajustados para la estimación del diámetro normal para cada uno de los clones objeto de estudio.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$e^{2.926849 - 0.0003821 \cdot N6 + 0.0281504 \cdot LH_P95}$	9.6	0.02	55.9
I-214	$e^{3.616733 + 0.008374 \cdot crownArea - 0.0000111 \cdot ALL_COUNT}$	15.1	0.01	34.2
MC	$e^{2.623606 - 0.0004813 \cdot N6 + 0.0201403 \cdot LH_MEAN}$	12.5	0.02	48.0
RASPALJE	$e^{2.85875 - 0.0004074 \cdot N6 + 0.0286534 \cdot LH_P95}$	9.0	0.06	49.0

Diámetro de la base (db):

Al igual que en el caso del diámetro normal, las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, y unos errores medios cuadráticos que oscilan entre 9-15%. Las eficiencias son moderadas o bajas, denotando que los modelos no explican una parte importante de la varianza. Los parámetros seleccionados como óptimo para cada clon son los mismos que en el caso del diámetro normal.

Al igual que ocurre con el diámetro normal, la bondad de ajuste de los modelos muestra que no se observan divergencias graves de las asunciones de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

Por último, se comprobó además la compatibilidad entre el diámetro normal (dn) y diámetro de la base (db), confirmándose que se cumple siempre que $db > dn$.

Tabla 3. Modelos ajustados para la estimación del diámetro de la base para cada uno de los clones objeto de estudio.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$e^{3.122762-0.0003576 \cdot N6+0.0240429 \cdot LH_P95}$	9.7	0.02	48.3
I-214	$e^{3.722643+0.008581 \cdot crownArea-0.0000112 \cdot ALL_COUNT}$	14.8	0.02	34.6
MC	$e^{2.614158+0.0004115 \cdot N6+0.036234 \cdot LH_MEAN}$	12.0	0.02	55.3
RASPALJE	$e^{2.955588-0.0003093 \cdot N6+0.0279149 \cdot LH_P95}$	8.6	0.06	47.3

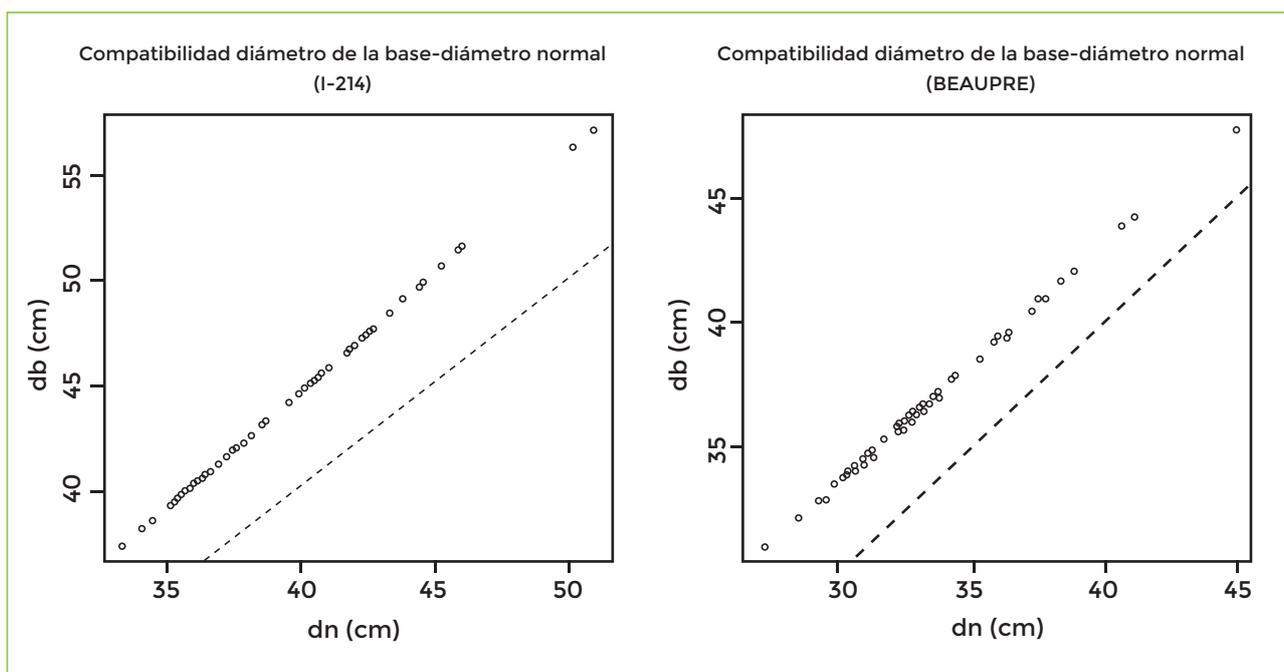


Imagen 15. Ejemplo del análisis de la compatibilidad entre los diámetros para los clones I-214 y Beaupre.

Altura de la base de la copa viva:

De nuevo las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, con unos errores medios cuadráticos que entre el 9-10%. Las eficiencias son moderadas, denotando que los modelos explican sólo en torno al 50% de la varianza. En el caso del clon Beaupré los parámetros seleccionados incluyen tanto variables fotogramétricas como locales (en concreto, la superficie de la proyección de la copa).

Analizando la bondad de ajuste de los modelos, no se observan divergencias graves de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

9. Predicción de las variables dendrométricas de todos los árboles

En la siguiente imagen se muestra el resultado de aplicar los modelos ajustados al conjunto de árboles no medidos en campo. Las copas de estos árboles fueron delineadas a partir del procesado de las nubes de puntos fotogramétricas, de manera idéntica a los árboles sí medidos en campo. Es importante recordar que, en el caso de la altura total, esta variable no ha sido estimada mediante las ecuaciones ajustadas, sino directamente medida a partir de la nube de puntos fotogramétricas puesto que la precisión de esta medición es mucho mayor que la que pueda ser obtenida desde el suelo con los aparatos tradicionales.

Tabla 4. Modelos ajustados para la estimación de la altura de la base de la copa viva para cada uno de los clones sobre los que se tomaron datos de la variable objeto a modelizar.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$\frac{ht}{1+e^{0.69731-0.081147 \cdot LH_MEAN+0.010054 \cdot crownArea}}$	9.7	0.02	48.3
RASPALJE	$\frac{ht}{1+e^{-0.73466+0.21663 \cdot LH_AAD+3.98732 \cdot LH_CV}}$	8.6	0.06	47.3

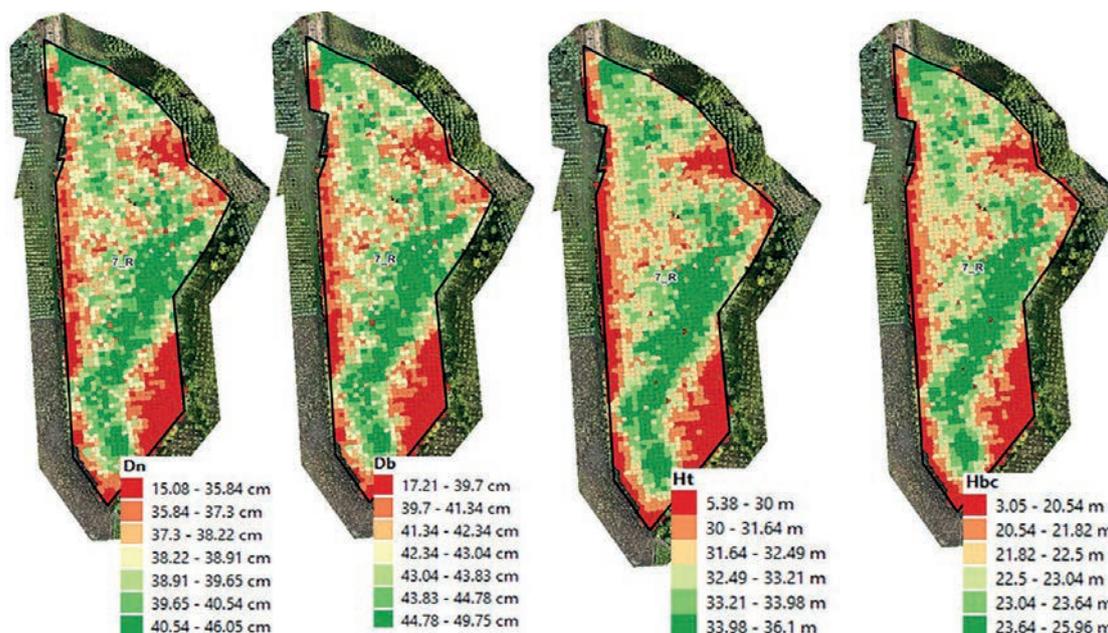


Imagen 16. Modelos aplicados a los resultados con la delineación de copas en una de las parcelas de estudio.

9.1. Estimación de otras variables de interés

Tal y como se describe en los objetivos del capítulo, a partir de las variables modelizadas, se pueden derivar directamente otras variables muy relevantes para la gestión forestal como pueden ser la conicidad, la esbeltez, el volumen con corteza (total y por productos).

A continuación, se muestran los resultados de los modelos ajustados para la estimación del volumen con corteza del fuste (Vcc_Fuste), volumen con corteza (Vcc) y conicidad.

Conclusiones

El uso de datos de teledetección representa una mejora significativa en términos de eficiencia y precisión para el cálculo de un gran número de variables, como la altura, el diámetro, la conicidad, el volumen en pie, la altura comercial o la profundidad de la copa, todas ellas cruciales para una gestión óptima de las plantaciones de chopo. Además, dado que los costes de un vuelo fotogramétrico frente a un vuelo con sensor LiDAR son significativamente más reducidos, se pueden obtener resultados precisos en la estimación de variables individuales del árbol a un coste muy competitivo.

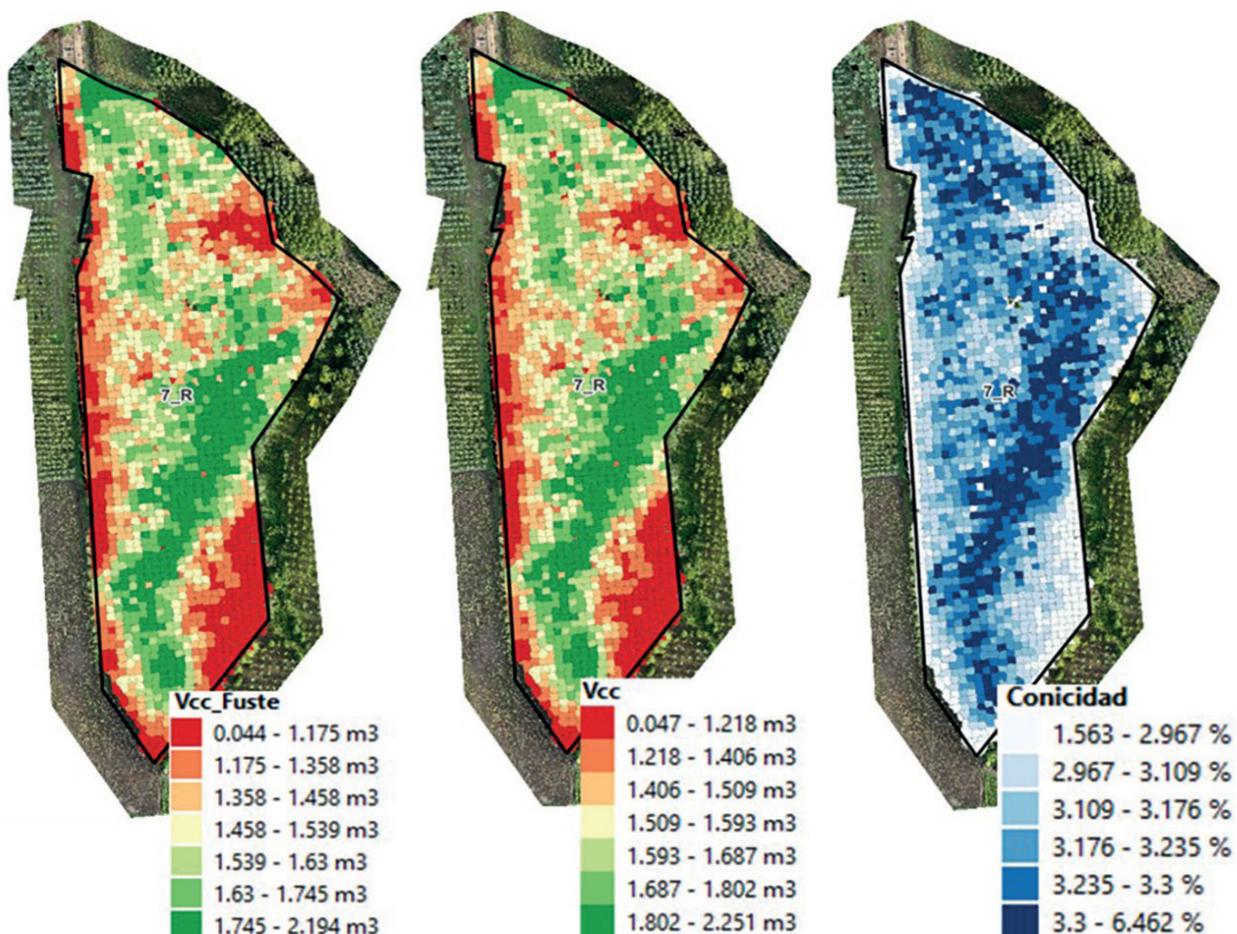
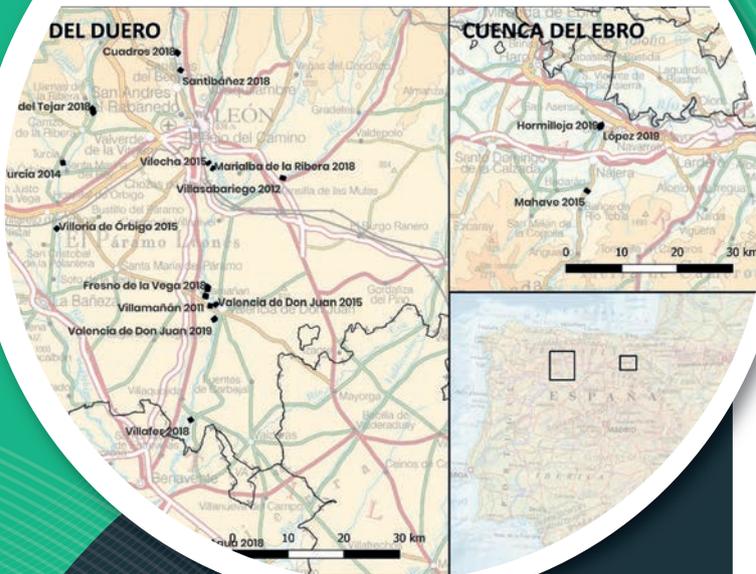


Imagen 17. Ejemplo de las otras variables de interés aplicados a los resultados de la delimitación de copas en una de las parcelas de estudio.

CAPÍTULO 3

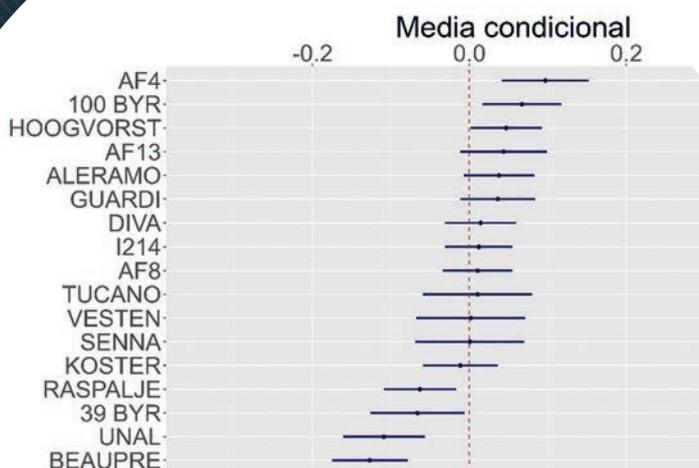
Efecto del clima y el suelo en la productividad de diferentes clones de chopo.

Red de 18 ensayo clonales en las cuencas del Duero y del Ebro.



Evaluación de productividad de 17 clones frente a los efectos del clima (33 variables) y el suelos (15 variables)

Clon	Clon
39 BYR	HOOGVORST
100 BYR	I-214
AF4	KOSTER
AF8	RASPALJE
AF13	SENNA
ALERAMO	TUCANO
BEAUPRE	UNAL
DIVA	VESTEN
GUARDI	



Efectos medios ($\pm 2\text{-sd}$) de la variable evaluadora de la productividad, área basimétrica (IGM, $\text{m}^2/\text{ha}\cdot\text{año}$) para cada clon. La línea roja vertical representa el efecto medio de todos los clones.

Rafael Alonso Ponce
Föra Forest Technologies SLL
 Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible iuFOR
 Oscar Cisneros González.
 Aitor Arraiza Santillán
Föra Forest Technologies SLL
 Joaquín Garnica López
Bosques y Ríos SL

José Carlos Santana Pérez
Sorbus Bosques Multifuncionales SL
 Esther Merlo Sánchez
 Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL
 Gonzalo Caballé
Fundación Cese for

3. EFECTO DEL CLIMA Y EL SUELO EN LA PRODUCTIVIDAD DE DIFERENTES CLONES DE CHOPO

Introducción

Las plantaciones de chopo están disminuyendo, y los factores que han propiciado esta situación son múltiples. Entre ellos se encuentran las trabas administrativas, la competencia con otros cultivos agrícolas menos rentables pero que disfrutaban de subvenciones en el marco de la PAC, la creciente vulnerabilidad de los clones más utilizados a plagas y enfermedades y a las cambiantes condiciones climáticas que están afectando tanto al crecimiento como a la calidad de la madera. Así, por ejemplo, el clon I-214, base de la populicultura española se ha visto afectado en los últimos años por ataques de pulgón lanígero (*Phloeomizus passerinii*). Lo mismo ocurre con el clon Beaupré, en este caso afectado por la roya (*Melampsora* spp.).

En general, los cinco clones prevalentes a día de hoy (MC, Raspalje y Unal, además de los dos ya mencionados) muestran en los últimos años signos evidentes de peor desempeño en términos generales. De acuerdo con los datos de plantas comercializadas de cada clon en los últimos cinco años por los viveros registrados en Castilla y León, estos cinco clones de chopos suponen el 94,3% de todas las plantaciones (Rueda, et al, 2019).

Si bien estos clones han demostrado una alta productividad en condiciones óptimas, su amplia utilización ha generado una homogenización genética que aumenta significativamente la

vulnerabilidad de las plantaciones frente a factores adversos como enfermedades, plagas y las nuevas condiciones climáticas derivadas del cambio global, tales como el incremento de temperaturas, la alteración en los regímenes hídricos y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos (IPCC, 2023).

La falta de diversidad genética implica que los ensayos de evaluación clonal desempeñen un papel crucial para probar nuevos clones más resistentes a enfermedades y a condiciones climáticas extremas como se hace en otros países. Estos ensayos, diseñados bajo principios estadísticos robustos, permiten analizar la respuesta productiva de distintos clones frente a una variedad de condiciones ambientales.

La variabilidad clonal del chopo en cuanto a crecimiento y propiedades tecnológicas de la madera es ampliamente reconocida y estudiada en otros países, con programas de selección clonal adaptados a las condiciones específicas del sitio y las condiciones medioambientales (Rueda et al. 2016). En España se realizó un trabajo muy importante de selección clonal de chopo pero que no se mantuvo en el tiempo. No obstante, es factible aprovechar el trabajo realizado en otros lugares y experimentar en su territorio los clones seleccionados y que ya están disponibles comercialmente o en avanzado estado de selección y éste es el caso de España.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar la capacidad productiva de 17 clones de chopo en función de las condiciones ecológicas (edáficas y climáticas) de la estación, en las cuencas del Duero y del Ebro. Los objetivos específicos derivados del anterior son:

- Evaluar el efecto de las 48 variables ecológicas (suelo y clima) en el crecimiento de los 17 clones de chopo en 18 ensayos clonales ya establecidos.
- Generar un modelo predictivo para estimar el crecimiento de cada clon en localizaciones donde no se ha testado.

Metodología

1. Ensayos clonales

Se ha contado con un total de 18 ensayos clonales repartidos por las cuencas del Duero (León y Zamora) y del Ebro (La Rioja) (Imagen 1), en los que se han analizado un total de 17 clones. Estos experimentos forman parte de un conjunto de ensayos clonales establecidos por Bosques y Ríos SL (socio del proyecto) desde hace años. La lista de ensayos y clones se muestran en las Tabla 1 y 2, respectivamente. El marco de plantación es siempre 6x6 salvo en el caso de del ensayo clonal de Turcia_2014, que es 5x5. En todos los casos se ha plantado a raíz profunda. En la Tabla 1 se detallan tanto los nombres de los ensayos como su edad en 2024 (tomada tras el periodo vegetativo de 2024), la cuenca hidrográfica en la que se ubican y el número de réplicas (bloques) existentes en el ensayo.

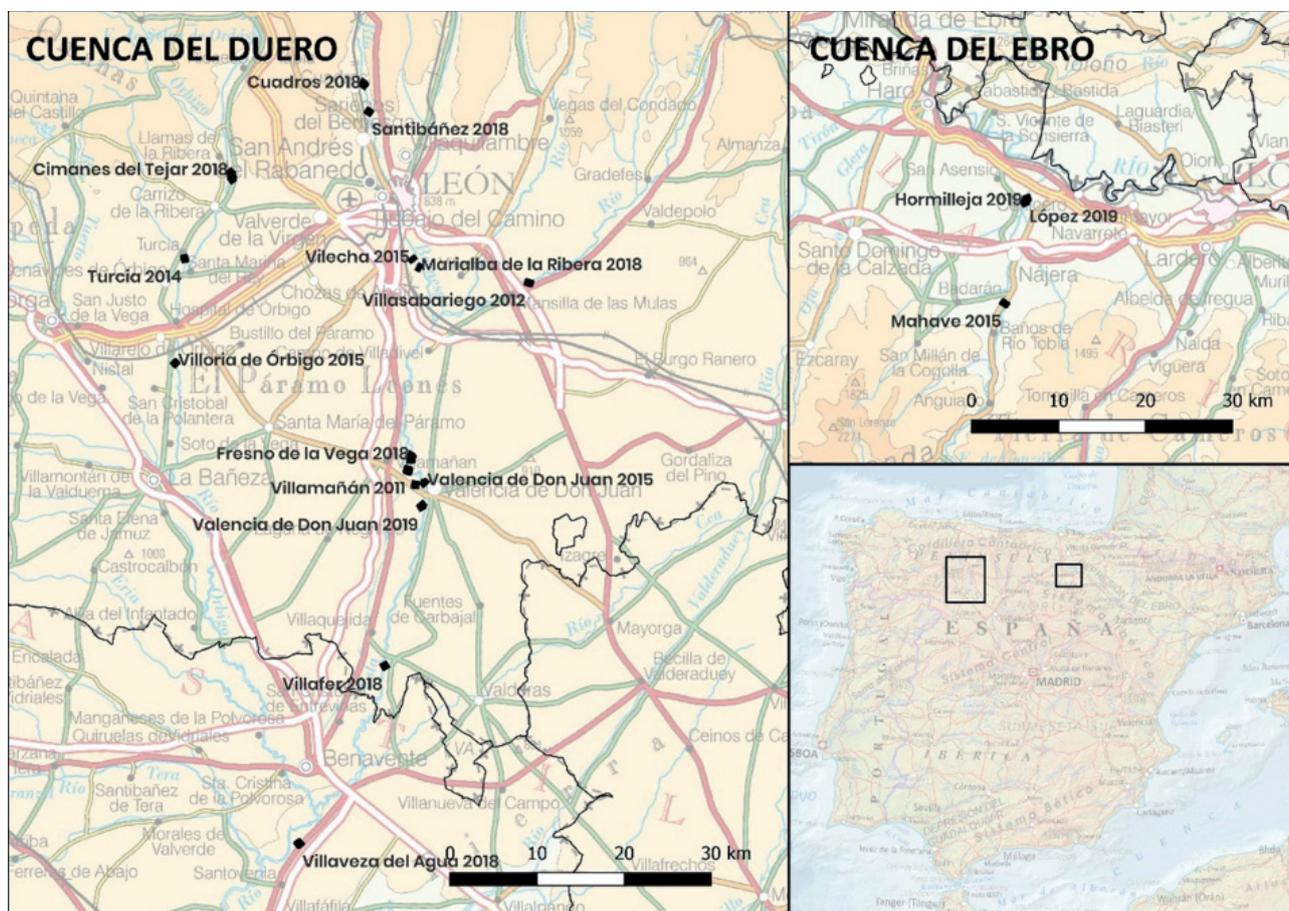


Imagen 1. Localización de los 18 ensayos clonales considerados.

Tabla 1. Lista de ensayos clonales evaluados en este trabajo.

Ensayo	Cuenca	Edad	Bloques
CIMANES DEL TEJAR 2018	DUERO	6	3
CUADROS 2018	DUERO	6	3
FRESNO DE LA VEGA 2018	DUERO	6	3
MARIALBA DE LA RIBERA 2018	DUERO	6	3
SANTIBÁÑEZ 2018	DUERO	6	3
TURCIA 2014	DUERO	10	1
VALENCIA DE DON JUAN 2010	DUERO	14	1
VALENCIA DE DON JUAN 2015	DUERO	9	1
VALENCIA DE DON JUAN 2019	DUERO	5	3
VILECHA 2015	DUERO	9	1
VILLAFER 2018	DUERO	6	3
VILLAMAÑÁN 2011	DUERO	13	3
VILLASABARIEGO 2012	DUERO	12	3
VILLAVEZA DEL AGUA 2018	DUERO	6	3
VILLORIA DE ÓRBIGO 2015	DUERO	9	1
HORMILLEJA 2019	EBRO	5	3
LÓPEZ 2019	EBRO	5	3
MAHAVE 2015	EBRO	9	3

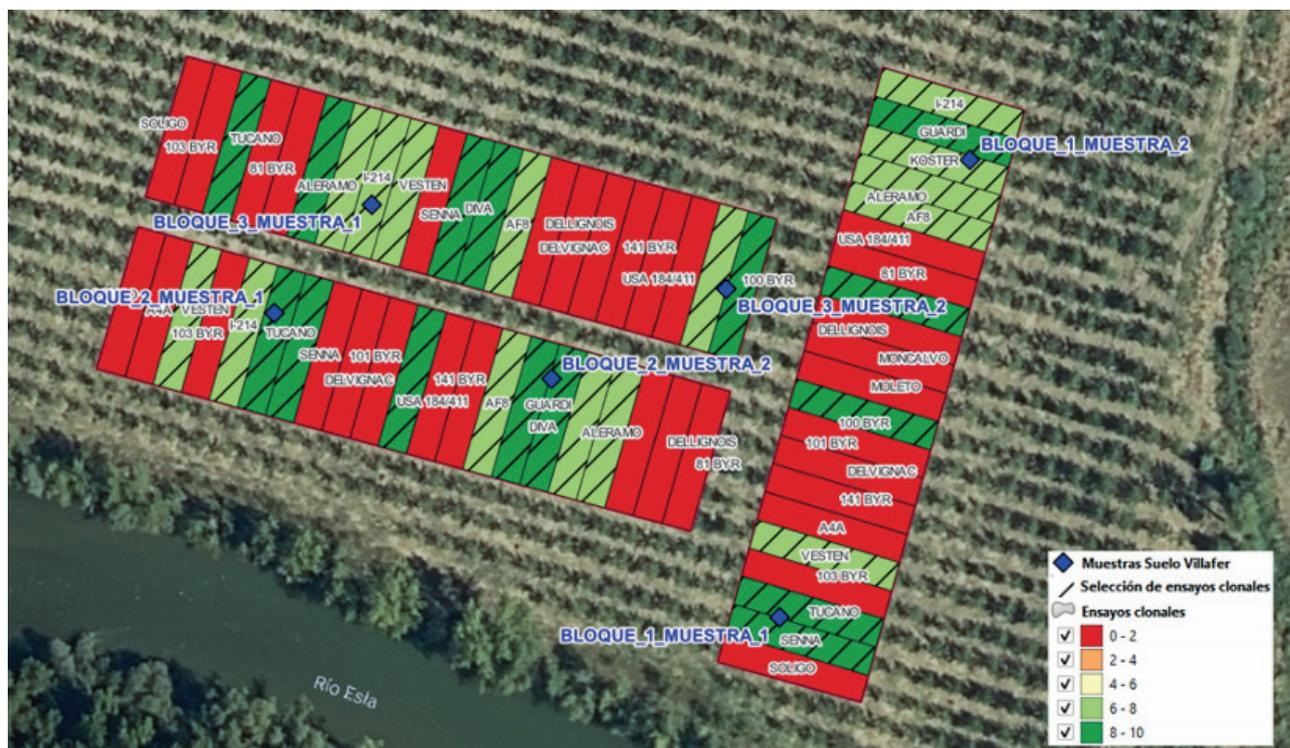


Imagen 2. Ejemplo de los clones seleccionados en una parcela de ensayos clonales con 3 bloques en la cuenca del Duero.

Los clones evaluados en este trabajo se exponen en la Tabla 2. Hay que destacar que no todos los clones están presentes en todos los ensayos.

Tabla 2. Lista de clones evaluados en este trabajo.

Clon	Origen	Clon	Origen
39 BYR		HOOGVORST	INBO
100 BYR		I214	CREA
AF4	ALASIA	KOSTER	3C2A
AF8	ALASIA	RASPALJE	INBO
AF13	ALASIA	SENNA	CREA
ALERAMO	CREA	TUCANO	CREA
BEAUPRE	INBO	UNAL	INBO
DIVA	CREA	VESTEN	INBO
GUARDI	CREA		

Los clones 39BYR y 100BYR son clones experimentales por lo que no se puede indicar su origen ni nombre verdadero.

2. Evaluación de la productividad

Para evaluar la productividad de cada uno de los clones se emplearon las mediciones de campo (diámetros normales de todos los árboles incluidos en los bloques de ensayo) tomadas por el personal de Bosques y Ríos como socio del del proyecto. Estas mediciones se realizaron anualmente a partir del séptimo año, aunque para este trabajo también se midieron los diámetros normales de los clones con 6 años. En el caso de los tres ensayos con sólo 5 años, los diámetros fueron medidos ad hoc por el personal de Madera Plus SL (socio del proyecto).

Con estos datos es factible calcular el crecimiento anual medio en área basimétrica a una edad de referencia dada (IGM, m²/ha/año), y utilizar esa variable como evaluadora de la productividad. No se utilizó el crecimiento diametral ya que no todos los ensayos presentaban el mismo marco de plantación, con lo que la diferente densidad introduciría ruido en el análisis. La edad de referencia escogida fue 7 años. Esta elección ha supuesto un

compromiso entre utilizar una edad lo más avanzada posible, y la disponibilidad de datos. Así, de los 18 ensayos, 8 superaban dicha edad (y por lo tanto su área basimétrica puede ser directamente calculada), mientras que otros 7 tenían 6 años y otros tres, 5. A estos ensayos se les simuló el crecimiento hasta los 7 años mediante la aplicación de las ecuaciones de índice de sitio de Castedo-Dorado (2023).

Variables edáficas

El suelo desempeña un rol determinante en la productividad de los clones. Así, factores como la textura, el drenaje, la profundidad y la disponibilidad de nutrientes, entre otros, afectan significativamente en el crecimiento de los árboles. Por ejemplo, los suelos profundos y fértiles, con buen acceso al agua, favorecen el desarrollo óptimo de las plantaciones, mientras que suelos compactos, pobres en nutrientes o con problemas de encharcamiento limitan su potencial. Además, la interacción entre el tipo de suelo y el clon pueden marcar diferencias significativas en el rendimiento. Por todo ello, es esencial realizar estudios edáficos previos a la plantación y optar por clones específicamente adaptados a las condiciones locales, optimizando así la productividad y garantizando la sostenibilidad de las plantaciones a largo plazo.

A continuación, se describe la metodología para la toma de muestras edáficas:

- Determinación de puntos de muestreo distribuidos por cada bloque de ensayo clonal. Normalmente se ubicaron 3 puntos de muestreo por bloque.
- Ejecución de catas de hasta 50cm de profundidad en los puntos aleatorios de muestreo. Una vez abierta y profundizada la cata, se extrajo tierra practicando un corte vertical entre los 25 y los 50 cm de

profundidad, procurando no tomar material de la zona superficial para evitar la influencia antrópica en las muestras tomadas. Una vez recogida la muestra se embolsó y se etiquetaron cada una de las submuestras.

- Mezcla de las submuestras de tierra de cada cata pertenecientes a un mismo bloque de ensayo clonal, conformando así la muestra de suelo definitiva. Si hubiera variaciones de calidad de terreno en esas unidades, se conformarán tantas muestras diferentes para esa unidad como rodales discriminados hubiera, anotándose a qué clones dentro del bloque correspondía la nueva muestra.
- Preparación de la muestra definitiva de acuerdo con las exigencias del laboratorio certificado. Se extrajeron aquellos elementos contaminantes que pudieran alterar los análisis, como piedras grandes, plásticos, restos vegetales, etc.
- Etiquetado y embolsado de la muestra final.

Las variables edáficas calculadas a partir de los datos de laboratorio, así como



Imagen 3. Ejemplo de una cata de 50 cm realizada (izquierda), etiquetado de la muestra (centro) y testigo de textura moldeado manualmente para estimar la textura aproximada del suelo de acuerdo con la clasificación USDA (dcha).

sus métodos de laboratorio, unidades y acrónimos se muestran en la Tabla 3. En el caso de la variable GRUESOS, se trata de una variable ordinal, estimada en campo con criterio experto, con tres niveles (bajo, intermedio y alto):

Clase 1: Muestras de suelo con un porcentaje bajo de elementos gruesos y una marcada dominancia de la fracción fina (partículas < 2mm)

Clase 2: Muestras de suelo con un porcentaje intermedio de elementos gruesos. No se puede asignar en ellas un predominio de la fracción fina menor de 2mm o mayor de 2mm.

Clase 3: Muestras de suelo con una evidente predominancia porcentual de elementos gruesos (partículas > 2mm)

Tabla 3. Variables evaluadoras de las propiedades edáficas empleadas en el análisis.

Variable	Acrónimo	Ud	Método
pH	PH	pH	Potenciometría
pH (extracto KCl)	PHKCL	pH	Potenciometría
Materia orgánica oxidable	MO	%	Potenciometría
Carbonato cálcico equivalente	CACO3	%	Potenciometría
Nitrógeno total	N	%	Conductividad térmica
Fósforo	P	mg/kg	Espectrofotometría UV-VIS
Potasio	K	mg/kg	Espectrometría ICP-OES
Calcio	CA	mg/kg	Espectrometría ICP-OES
Magnesio	MG	mg/kg	Espectrometría ICP-OES
Sodio	NA	mg/kg	Espectrometría ICP-OES
Arcilla < 0,002 mm	ARC	%	Sedimentación discontinua
Limo (0.002 - 0.05 mm)	LIM	%	Sedimentación discontinua
Arena (0,05 - 2 mm)	ARE	%	Sedimentación discontinua
Capacidad de intercambio catiónico efectiva	CIC	mEq/100 g	Espectrofotometría UV-VIS
Presencia de gruesos (>2 mm)	GRUESOS	ordinal	Pericial (alta, media, baja)

Variables climáticas

Al igual que el suelo, el clima también juega un rol determinante en la productividad de los diferentes clones, ya que factores como la temperatura, la precipitación y la duración del periodo vegetativo influyen directamente en su crecimiento. En regiones con climas templados y estaciones bien definidas, los chopos tienden a mostrar un desarrollo más uniforme, mientras que, en zonas con estrés hídrico o temperaturas extremas, el rendimiento puede verse considerablemente reducido. Por todo ello, la selección del clon adecuado, adecuado a las características climáticas de cada región, es fundamental para maximizar la productividad y garantizar una calidad de la madera óptima.

Para cada ensayo clonal se calcularon un total de 33 variables climáticas a partir de los datos termo-pluviométricos mensuales proporcionados por los modelos del Atlas Climático Ibérico (Aemet, 2011). Entre las variables climáticas empleadas se encuentra la precipitación total, la precipitación por estaciones, la temperatura media, mínima y máxima tanto anual como por estaciones, el número de meses fríos, el índice hídrico y el índice de aridez de Emberger entre otras.

3. Análisis estadístico

El objetivo de este análisis es poder predecir el crecimiento de cada clon en lugares donde aún no se ha testado, ajustando un modelo que tenga en cuenta la influencia del ambiente. Para poder analizar cómo el entorno influye en el crecimiento de los distintos clones, se emplea la regresión Finlay-Wilkinson. Este método parte de una idea sencilla: el efecto del ambiente en el crecimiento se mide tomando como referencia la media del efecto sobre todos los genotipos. Una vez definido este efecto, se pueden

buscar modelos que incorporen variables ecológicas para afinar la predicción.

La creciente disponibilidad de información temática ambiental está impulsando el desarrollo de modelos más precisos en los sectores forestal y agrícola. Investigaciones recientes han revisado las distintas metodologías para mejorar estas predicciones. En este sentido, algunos estudios proponen calcular los efectos genéticos de cada clon en distintos ensayos y después integrarlos con los efectos del ambiente mediante modelos de aprendizaje automático. Basándose en estos avances, este análisis incluye las siguientes etapas:

a) Emplear un modelo mixto para estimar el efecto del ambiente en la productividad de cada clon

Los clones evaluados no están disponibles en todos los ensayos analizados. Para manejar esta falta de uniformidad en los datos es necesario utilizar modelos mixtos, que permiten obtener estimaciones precisas incluso en situaciones donde existen desequilibrios en el diseño estadístico o en la cantidad de datos por clon.

Este tipo de modelos usan métodos estadísticos avanzados, como la estimación de las varianzas mediante máxima verosimilitud restringida (REML) y la predicción de efectos mediante BLUP (*Best Linear Unbiased Prediction*). Gracias a estas técnicas, es posible comparar la productividad de los clones en diferentes ensayos, incluso si las condiciones de cada ensayo varían o establecer comparaciones a lo largo del tiempo.

b) Emplear *gradient boosting* como modelo de regresión para predecir el efecto ambiental en función de las variables ecológicas

Para modelizar cómo influyen las variables ecológicas en el crecimiento de los clones, se emplea *gradient boosting*, una técnica de aprendizaje

automático especialmente adecuado cuando hay muchas variables ecológicas involucradas. En este caso, el crecimiento de los clones depende de múltiples factores ambientales que están correlacionados entre sí y que no tienen una relación lineal simple con la productividad. Por ello, el método *gradient boosting* es ideal para trabajar con este tipo de datos tan complejos. En la evaluación de este modelo se han seguido los siguientes pasos:

1. Selección y transformación de variables (*feature engineering*)

Para facilitar el proceso y mejorar los resultados, se ha aplicado un proceso habitual en aprendizaje automático, la creación de nuevas variables a partir de las variables originales. Es deseable que en el modelo se incluyan las variables que influyen en el crecimiento de los clones, eliminando aquellas que aportan poca información o que solo introducen ruido en el modelo.

Para ello, se utiliza un método estadístico conocido como MIC (*maximal information coefficient*) que permite detectar tanto relaciones lineales como no lineales entre variables. Una descripción de este método se puede encontrar en Reshef et al. (2016). Con este algoritmo, se identifican en una primera fase las variables ecológicas más relevantes y se repite el proceso incluyendo nuevas variables a partir de la combinación de las originales. El objetivo de este proceso es el de mejorar la capacidad del modelo para hacer predicciones más precisas.

2. Ajuste de parámetros del modelo de regresión por *gradient boosting*

El modelo de *gradient boosting* se construye mediante una serie de árboles de decisión que van mejorando progresivamente los errores del modelo anterior. El algoritmo elegido

es *Extreme Gradient boosting* (XGBoost), que es un sistema de clasificación y regresión rápido y eficaz para este tipo de análisis.

Para optimizar su rendimiento, es crucial ajustar ciertos hiperparámetros, que controlan el funcionamiento del algoritmo. Algunos de los más importantes son:

- *Eta*: Controla la tasa de aprendizaje del algoritmo
- *Max_depth*: Define la profundidad máxima de los árboles de decisión
- *Min_child_weight*: Regula el peso/tamaño mínimo de los subgrupos/ramas dentro de los árboles de decisión
- *Subsample*: Indica la proporción de la muestra empleada en el entrenamiento
- *Colsample_bytree*: Define el porcentaje de variables que se consideran en la construcción de cada árbol de decisión.

3. Calibración el efecto del posible sobreajuste en el entrenamiento de los modelos

Uno de los principales riesgos al entrenar modelos de aprendizaje automático es el sobreajuste, que ocurre cuando el modelo se ajusta demasiado bien a los datos empleados en el entrenamiento, pero pierde capacidad de generalización.

Para calibrar este efecto, se emplea la validación cruzada, que divide los datos en dos grupos: un 75% para entrenar el modelo y un 25% para validarlo. Este proceso de ajuste y validación se repite 100 veces para calcular el sesgo y el error medio cuadrático (RMSE) con el fin de asegurar que las predicciones sean realmente fiables.

Evaluar el ajuste del modelo final

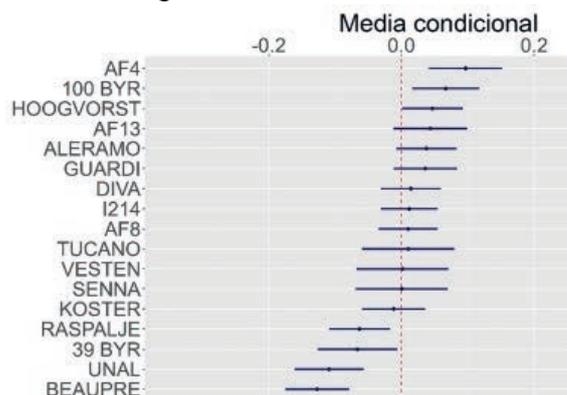
Se incluyen los términos intercepción y efecto genético del modelo mixto junto con la predicción del efecto ambiental del modelo de regresión *gradient boosting*.

Resultados

1. Variabilidad de la productividad y de los parámetros ecológicos.

En la Tabla 5 se muestran el número de observaciones (n) y los valores medios, mínimo, máximo y desviación típica en el incremento medio anual en área basimétrica a los 7 años (IGM, m²/ha/año), para cada clon en estudio. Así mismo, en la Imagen 6 se muestra el gráfico de los efectos medios para cada clon para esa misma variable (ver sección 2 modelo mixto).

Imagen 4. Efectos medios (± 2 -sd) de la



variable evaluadora de la productividad (IGM) para cada clon en estudio. La línea roja vertical representa el efecto medio de todos los clones.

Analizando el gráfico se observa que ningún clon sobresale sobre el resto. Es destacable que tres de los cuatro clones “clásicos” (Beaupré, Unal y Raspalje) testados, junto con el clon 39BYR, presentan peor productividad que el resto de los clones analizados. Únicamente el clon I214 muestra un comportamiento

Tabla 5. Estadísticas descriptivas básicas de la variable evaluadora de la productividad (IGM, m²/ha) para cada clon analizado.

Clon	n	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
39 BYR	24	0.89	0.25	2.22	0.49
100 BYR	14	1.21	0.57	2.19	0.36
AF4	18	1.23	0.52	1.69	0.34
AF8	18	1.07	0.40	2.01	0.42
AF13	36	1.24	0.63	2.10	0.42
ALERAMO	34	1.17	0.57	2.20	0.40
BEAUPRE	29	0.81	0.25	1.79	0.37
DIVA	34	1.12	0.48	2.26	0.41
GUARDI	29	1.24	0.43	2.58	0.55
HOOGVORST	34	1.14	0.51	2.32	0.41
I214	40	1.10	0.46	2.12	0.36
KOSTER	29	1.05	0.48	1.64	0.31
RASPALJE	32	0.94	0.44	1.74	0.40
SENNA	9	1.34	0.67	2.27	0.56
TUCANO	9	1.38	0.63	2.25	0.59
UNAL	22	0.86	0.39	1.41	0.34
VESTEN	9	1.00	0.71	1.63	0.28

parecido al del resto de los clones que podríamos considerar como “nuevos”.

Los clones 39BYR y 100BYR son clones experimentales por lo que no se puede indicar su origen ni nombre verdadero

En el caso de los clones AF4, 100BYR y Hoogvorst manifiestan unos crecimientos medios significativamente

mayores a la media. Por último, el clon Guardi presenta los valores máximos de crecimiento (2.58 m²/ha/año en el ensayo de Valencia de Don Juan 2019).

En cuanto a los resultados del análisis de las propiedades edáficas, en la Tabla 6 se detallan los valores medios y la desviación típica encontrados, para cada clon objeto de estudio.

Tabla 6. Valores medios y (desviación típica) de las variables evaluadoras de las propiedades edáficas para cada clon analizado.

CLON	PH	PHKCL	MO	CACO3	N	P	K	CA	MG	NA	ARC	LIM	ARE	CIC
39 BYR	8.01 (0.55)	7.49 (0.75)	1.3 (0.98)	2.5 (1.52)	0.13 (0.11)	2.28 (1.39)	33.8 (15.8)	2422.7 (1280)	115.6 (60)	12.9 (7.6)	8.5 (3.9)	24.9 (11.5)	66.6 (15.1)	5.81 (2.15)
100 BYR	8.15 (0.46)	7.39 (0.49)	1.81 (1.42)	2.55 (2.49)	0.17 (0.16)	3.99 (6.87)	41.8 (23.1)	2556.7 (1311)	122.3 (48.2)	14.7 (10)	7.3 (3.7)	24.1 (12.9)	68.6 (15.8)	6.71 (3.16)
AF4	8.09 (0.5)	7.41 (0.58)	1.6 (1.47)	2.63 (2.52)	0.13 (0.14)	3.19 (1.85)	36.4 (26.2)	2459.9 (1284.6)	121.7 (50.8)	11 (7.9)	8.2 (3.7)	24.6 (12.9)	67.1 (16.1)	6.29 (2.75)
AF8	8.22 (0.39)	7.59 (0.5)	1.75 (1.29)	2.88 (2.33)	0.16 (0.15)	2.73 (1.6)	36.8 (21.9)	2917.8 (1196.5)	118.4 (57.6)	17.8 (25.7)	7.4 (3.1)	25.6 (12)	67 (14.2)	6.32 (2.6)
AF13	8.09 (0.49)	7.41 (0.57)	1.94 (1.55)	1.66 (1.58)	0.2 (0.18)	2.4 (1.18)	31.2 (16.6)	2531 (1377.8)	137.1 (68.3)	23.2 (34.9)	7.4 (3.8)	24.1 (13.2)	68.5 (16)	6.43 (2.63)
ALERA-MO	8.18 (0.41)	7.48 (0.49)	1.77 (1.23)	2.73 (2.36)	0.17 (0.14)	3.62 (5.8)	42 (20.7)	2840.3 (1255.9)	122.9 (59.5)	17.7 (26.4)	7.6 (3.4)	25.5 (12.5)	66.9 (15)	6.71 (2.98)
BEAU-PRE	8.09 (0.45)	7.48 (0.61)	1.65 (1.39)	2.13 (1.2)	0.14 (0.13)	3.46 (6.21)	37.1 (23.4)	2362.8 (1044.2)	118.1 (56.2)	11.4 (6.8)	7.7 (3.3)	24.2 (12.6)	68.1 (15)	6.46 (3.46)
DIVA	8.18 (0.41)	7.48 (0.49)	1.77 (1.23)	2.73 (2.36)	0.17 (0.14)	3.62 (5.8)	42 (20.7)	2840.3 (1255.9)	122.9 (59.5)	17.7 (26.4)	7.6 (3.4)	25.5 (12.5)	66.9 (15)	6.71 (2.98)
GUARDI	8.17 (0.45)	7.51 (0.57)	1.7 (1.44)	2.56 (2.4)	0.16 (0.16)	2.76 (1.73)	35.3 (22.3)	2746.2 (1286.5)	128.7 (60)	20.2 (27.9)	7.6 (3.4)	25 (11.9)	67.3 (14.6)	6.34 (2.66)
HOOG-VORST	8.09 (0.41)	7.5 (0.56)	1.92 (1.34)	2.97 (2.34)	0.18 (0.14)	3.48 (5.85)	44 (24.4)	2722.1 (1272.4)	124.6 (53.5)	12.6 (8.6)	7.6 (3.4)	26.6 (13.5)	65.8 (15.7)	7.18 (3.48)
I214	8.19 (0.41)	7.55 (0.53)	1.59 (1.19)	2.67 (2.08)	0.13 (0.11)	3.47 (5.37)	39.5 (23.4)	2707.1 (1167.3)	117.5 (56.1)	15.6 (24.3)	7.8 (3.1)	25 (11.5)	67.2 (13.9)	6.26 (2.74)
KOSTER	8.1 (0.46)	7.42 (0.59)	1.81 (1.45)	2.21 (1.63)	0.17 (0.16)	2.18 (1.16)	36.3 (21.5)	2478.2 (1165.8)	124.6 (57.4)	14.8 (9.2)	7.5 (3.5)	25.4 (13.1)	67.1 (15.3)	6.64 (3.35)
RAS-PALJE	8.17 (0.41)	7.54 (0.5)	1.74 (1.25)	2.83 (2.4)	0.16 (0.15)	2.88 (1.63)	38.1 (21.9)	2969.5 (1240)	126.8 (60.4)	17 (27.1)	7.9 (3.4)	26.1 (12.2)	65.9 (14.6)	6.64 (2.69)
SENNA	8.04 (0.7)	7.16 (0.7)	1.18 (0.61)	1.29 (0.74)	0.08 (0.08)	2.93 (1.03)	29.7 (10)	2211.3 (1458.9)	110.7 (83.1)	31.6 (48.3)	6.3 (2.1)	19 (11.1)	74.7 (13.2)	4.47 (1.77)
TUCANO	8.04 (0.7)	7.16 (0.7)	1.18 (0.61)	1.29 (0.74)	0.08 (0.08)	2.93 (1.03)	29.7 (10)	2211.3 (1458.9)	110.7 (83.1)	31.6 (48.3)	6.3 (2.1)	19 (11.1)	74.7 (13.2)	4.47 (1.77)
UNAL	8.1 (0.47)	7.55 (0.64)	1.79 (1.13)	2.57 (1.73)	0.16 (0.15)	2.47 (1.27)	33.6 (23.5)	2705.4 (1180.5)	113.8 (54.2)	12 (8.8)	6.8 (2.6)	23.7 (12)	69.5 (13.4)	6.39 (3.51)
VESTEN	7.97 (0.67)	7.28 (0.85)	1.45 (1.24)	2.34 (1.52)	0.07 (0.1)	2.61 (1.22)	28.3 (15.1)	1942.8 (1198)	88.2 (32.2)	16.2 (9.9)	5.8 (1.8)	19.5 (11.3)	74.6 (12.9)	4.67 (2.21)

En lo que respecta a las variables climáticas, dado el elevado número de variables, solamente se presentan en la Tabla 7 los valores medios y la desviación típica de las cuatro variables climáticas que han tenido más influencia en el ajuste de los modelos (ver apartado *Regresión efecto ambiental~ Variables ambientales*). La suma de las precipitaciones de verano (PV) es la suma de la precipitación registrada en junio, julio y agosto. El índice de aridez de EMBERGER tiene en cuenta la precipitación media anual, la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío. Cuanto menor es el valor del índice, mayor es la aridez del clima. Valores inferiores a 10 indican climas áridos. TMI, es la media de las temperaturas medias de los meses de invierno y NMF es el número de meses fríos, es decir, meses con temperatura media mensual igual o menor a 6 °C.

2. Modelo mixto

En la Tabla 8 se resume la significación de los efectos aleatorios. Tanto el efecto del clon como el de la interacción bloque/ensayo son significativos comprobándose que el efecto ambiental es superior al genético.

Tabla 7. Valores medios y (desviación típica) de las variables climáticas evaluadas para cada clon.

CLON	PV	EMBERGER	TMI	NMF
39 BYR	87.3 (23.1)	5.12 (0.93)	4.6 (0.76)	2.70 (0.68)
100 BYR	83.4 (11.5)	5.47 (1.21)	4.57 (0.71)	2.71 (0.72)
AF4	83.9 (12.2)	5.48 (1.16)	4.56 (0.8)	2.71 (0.81)
AF8	86.8 (17.4)	5.23 (1.09)	4.78 (0.81)	2.51 (0.79)
AF13	81.4 (9.6)	5.73 (1.28)	4.24 (0.27)	3.04 (0.29)
ALERAMO	88.1 (17.2)	5.31 (1.06)	4.8 (0.83)	2.50 (0.82)
BEAUPRE	83.5 (16.7)	5.23 (1.04)	4.42 (0.56)	2.85 (0.52)
DIVA	88.1 (17.2)	5.32 (1.06)	4.8 (0.84)	2.5 (0.82)
GUARDI	81.2 (11.4)	5.25 (1.21)	4.53 (0.65)	2.74 (0.66)
HOOGVORST	88.7 (16.8)	5.37 (1.03)	4.73 (0.86)	2.56 (0.84)
I214	84.9 (16.9)	5.04 (0.95)	4.73 (0.79)	2.55 (0.76)
KOSTER	84.1 (17.2)	5.37 (1.17)	4.47 (0.58)	2.82 (0.54)
RASPALJE	88.9 (17.2)	5.4 (1.03)	4.77 (0.87)	2.52 (0.85)
SENNA	77.9 (8.6)	4.97 (1.1)	4.38 (0.46)	2.87 (0.47)
TUCANO	77.9 (8.6)	4.97 (1.1)	4.38 (0.46)	2.87 (0.47)
UNAL	86.1 (18.1)	5.28 (0.91)	4.45 (0.61)	2.83 (0.55)
VESTEN	77.1 (9.1)	4.89 (1.16)	4.36 (0.46)	2.89 (0.47)

Tabla 8. Significación de los efectos aleatorios mediante la comparación de la razón de verosimilitud (variable dependiente log(IGM+1)).

Efecto	npar	logLik	AIC	LRT	Df	Pr. Chisq.
	4	237.515	-467.03			
Clon	3	204.049	-402.10	66.931	1	2.812e-16
Bloque/Ensayo	3	90.005	-174.01	295.018	1	< 2.2e-16

Para evaluar el ajuste del modelo mixto se han analizado los residuos de la predicción. En la Imagen 5, los gráficos muestran que, tras aplicar una transformación logarítmica, la distribución de los datos mejora, lo que indica que el modelo puede estimar con precisión la productividad.

Además, se han calculado algunos indicadores estadísticos para evaluar la calidad del ajuste:

- Coeficiente de determinación (R2): el modelo mixto explica más del 72% de la variabilidad de los datos, lo que nos indica un buen nivel de ajuste.
- Error medio cuadrático (RMSE) de la predicción: el valor es menor al 15%, lo que nos indica que el modelo ajustado tiene una precisión satisfactoria en sus estimaciones.

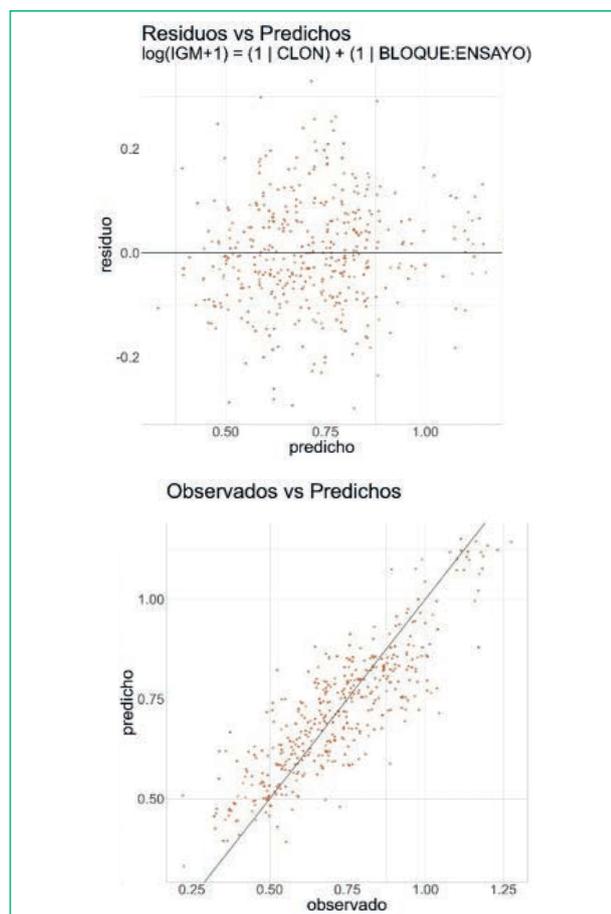


Imagen 5. Gráficos de residuos del modelo mixto ajustado.

Tabla 9. Estadísticos de ajuste del modelo mixto.

R2	RMSE	RMSE (%)
72.22	0.104	14.50%

3. Regresión del efecto ambiental en función de las variables ambientales.

Para poder entender cómo influyen las variables ambientales en la productividad de los clones, se llevó a cabo un proceso de selección de variables en dos fases:

- Primera selección: se eligieron 32 de las 48 variables ambientales con un coeficiente MIC ≥ 0.85 , lo que indica una relación fuerte con el efecto ambiental.
- Segunda selección: Se seleccionaron 75 de 496 variables de intersección con un coeficiente MIC ≥ 0.98 . Este valor indica que la combinación de algunas variables ambientales tiene un impacto aún más significativo que cada variable por separado.

Una vez seleccionadas las variables, se ajustaron los hiperparámetros del modelo *XGBoost* (*Extreme Gradient Boosting*). Los hiperparámetros que definen cómo se entrenan los distintos árboles de decisión se pueden ver en la Tabla 10.

El proceso de ajuste de hiperparámetros propone la combinación de parámetros expuesta en la Tabla 10.

Tabla 10. Hiperparámetros del modelo XGBoost.

Hiperparámetro	Valor
eta (tasa de aprendizaje)	0.05
max_depth (profundidad máxima del árbol)	7
min_child_weight (peso mínimo de las ramas)	7
subsample (proporción de la muestra empleada en entrenamiento)	0.8
colsample_bytree (porcentaje de las variables empleadas en la construcción del siguiente árbol)	0.9249

Para comprobar la fiabilidad del modelo, se realizaron 100 simulaciones con validación cruzada. Los resultados que se presentan en la Tabla 11 nos muestran que:

- El modelo no tiene sesgo significativo, aunque tiende a subestimar el efecto ambiental.
- El error medio cuadrático (RMSE) se mantiene por debajo del 8% en la mayoría de los casos, por lo que se considera que el resultado es satisfactorio.
- Los abultados valores mínimo y máximo del porcentaje del error medio cuadrático indican que se puede estar produciendo un sobreajuste en algunas de las simulaciones, previsiblemente en aquellas en las que impliquen modelizar con la mayoría de los valores en una cuenca hidrográfica y realizar la predicción en la otra.

Tabla 11. Distribución del sesgo y el %RMSE.

estadístico	sesgo	RMSE (%)
Min.	-0.00155058	-318.137424
1st Qu.	-3.49e-05	-7.87191212
Median	1.29e-06	-2.76900831
Mean	1.17e-05	-5.09963028
3rd Qu.	6.23e-05	-1.04715129
Max.	0.00272656	201.933327

El modelo final ajustado incorpora a los términos de intercepción y del efecto genético de cada clon del modelo mixto ajustado, el efecto ambiental previsto por el modelo de *gradient boosting*. Los resultados se resumen en la Tabla 12 y en la Imagen 6.

Analizando los resultados, se observa que el porcentaje de varianza del modelo es similar al del modelo mixto, lo que confirma su validez. Además, el

porcentaje de error de predicción (RMSE) aumenta cerca de seis puntos al incluir las variables ambientales directamente en la predicción, pero esto puede considerarse una ventaja dado que permite estimar la productividad esperable para los 17 clones analizados compensando esa pequeña pérdida de precisión.

Tabla 12. Estadísticos de ajuste del modelo final.

R2	sesgo	RMSE	RMSE (%)
72.96	0.015	0.220	20.18

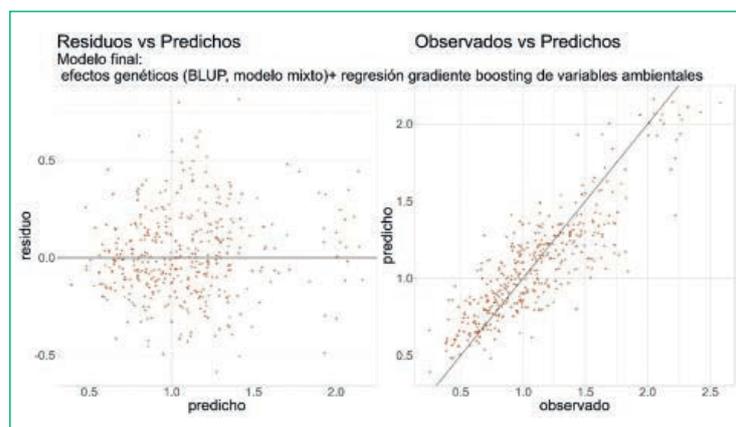


Imagen 6. Gráfico de residuos del modelo final ajustado.

Discusión

En este trabajo se ha examinado la capacidad productiva, evaluada mediante el crecimiento medio en área basimétrica a los 7 años, de 17 clones de chopo, distribuidos en 18 ensayos clonales en las cuencas del Duero y del Ebro, y se ha analizado la relación de dicha variable con variables edáficas y climáticas, con el objetivo de generar un modelo predictivo de la productividad que facilite la toma de decisiones sobre la idoneidad de utilizar uno u otro clon en nuevas plantaciones.

En este análisis no se detectó que ningún clon fuese claramente superior en cuanto a su productividad sobre el resto

de los clones analizados. Es destacable que 3 de los cuatro clones “clásicos” analizados presentaron crecimientos significativamente por debajo de la media del conjunto de clones. Esto contrasta con estudios previos realizados en Francia, donde el clon Raspalje presentó crecimientos similares al del resto de clones o en Castilla y León, donde los clones Raspalje y Unal presentaron crecimientos incluso superiores a la media de los clones testados.

El análisis del modelo mixto ajustado revela que los clones AF4, 100BYR y Hoogvorst presentan crecimientos medios significativamente superiores a la media. Además, se observa que la diferencia máxima de productividad media entre clones y ensayos alcanza los $0.57 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$, lo que implica que podemos encontrar diferencias de hasta $8.5 \text{ m}^2/\text{ha}$ a final del turno entre dos plantaciones distintas. Esto puede traducirse, aproximadamente, en un impacto en el volumen maderable superior a $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ y discrepancias en la rentabilidad que pueden superar los 8000 € . En los casos más extremos, estas discrepancias podrían incluso arruinar completamente la inversión al no alcanzar la chopera los diámetros mínimos para ser comercializable. Este hecho subraya la necesidad de identificar y promover nuevos clones con mayor productividad, que puedan reemplazar paulatinamente a los actualmente prevalentes.

Además, comprender la relación entre las condiciones abióticas de una estación y la productividad potencial de los distintos clones es fundamental para la toma de decisiones en plantaciones comerciales. Sin embargo, la literatura disponible presenta ciertas limitaciones debido a la escasez de estudios que incluyan datos edáficos exhaustivos y análisis estadísticos rigurosos que incluyan un número elevado de clones. En general, los estudios más frecuentes son parciales o de carácter cualitativo,

que, aunque puedan ser útiles, resultan insuficientes para realizar predicciones precisas de la productividad. El modelo predictivo entrenado en este trabajo permite calcular la productividad de los clones a partir de variables ambientales, mostrando que estas tienen una mayor influencia que el efecto genético, es decir, las condiciones edafoclimáticas son el principal factor determinante en el crecimiento y por lo tanto en su productividad que por el clon seleccionado.

No obstante, la interacción clon-ambiente sigue siendo un factor clave, ya que no todos los clones responden de la misma manera en todos los entornos. Por ello, una predicción precisa de la productividad esperada antes de la plantación es crucial para asegurar la rentabilidad económica de la plantación.

El modelo entrenado, ofrece predicciones insesgadas de IGM, con un error medio de $0.015 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ lo que indica una alta precisión en la estimación del crecimiento y el error medio cuadrático (RMSE) del 20% nos brinda la posibilidad de seleccionar el clon o los clones de mayor productividad prevista basándose en datos objetivos en lugar de intuiciones o tendencias del mercado.

Si bien el modelo desarrollado tiene un propósito únicamente predictivo y no explicativo, el análisis de las variables seleccionadas permite detectar algunos patrones de utilidad para futuros estudios interpretativos. Así, la combinación de variables con valores de MIC mayores indican una relación extremadamente fuerte entre esas variables y su productividad. Además, las variables relacionadas con la textura del suelo son las más influyentes entre las edáficas. En cuanto a las variables climáticas, la precipitación de verano (PV), la temperatura media invernal (TMI), el número de meses fríos (NMF) y el índice de aridez de Emberger son las más influyentes en la relación entre las variables combinadas. Sin embargo, no se observa un patrón que relacione

directamente estas variables con características climáticas específicas como la aridez, termicidad o precipitación.

Dado que la aplicación directa de estos modelos puede ser compleja, se ha desarrollado una aplicación web <https://visor.gobiopoptech.es/> que permite obtener predicciones de la productividad para los 17 clones introduciendo únicamente las coordenadas de la ubicación de la futura plantación y las variables edáficas medidas en campo. Para reducir la necesidad de realizar análisis edáficos detallados, se ha implementado una versión del modelo que usa un grupo mínimo de variables clave que producen resultados, que en el caso de las edáficas se incluyen el porcentaje de arena fina, el porcentaje de limo, el porcentaje de arcilla, el carbonato cálcico equivalente, el nitrógeno total, el calcio, el fósforo, el sodio y presencia de elementos gruesos como variable ordinal estimada en campo. Por último, las variables climáticas se obtienen de forma automática por la aplicación a partir de los modelos del Atlas Climático Ibérico (Aemet 2011).

El resultado que la aplicación devuelve al usuario es un ranking de los clones según su productividad esperada, permitiendo al usuario tener una predicción antes de realizar la plantación. Este modelo ha sido diseñado específicamente para las plantaciones ubicadas en las cuencas del Duero y del Ebro dentro del territorio español, asegurando así la validez de las predicciones dentro de esta región.

Conclusiones

Las conclusiones más relevantes que se pueden extraer de este trabajo son:

1. Diferencias en la productividad: se han detectado diferencias significativas en la productividad de los distintos clones, evaluada a través del crecimiento medio en

área basimétrica a los 7 años de la plantación, lo cual puede derivar a fin de turno en una gran disparidad de rentabilidad económica según el clon empleado.

2. Bajo rendimiento de algunos clones “clásicos”: tres de los cuatro clones “clásicos” testados (Beaupré, Raspalje y Unal) presentan productividades significativamente inferiores a la media lo que sugiere la necesidad de reconsiderar su uso en nuevas plantaciones.
3. Mejoras en rendimiento de clones nuevos: por el contrario, tres clones nuevos (AF4, 100BYR y Hoogvorst) manifiestan crecimientos significativamente superiores a la media, lo que los posiciona como opciones prometedoras para mejorar la producción forestal. Es necesario hacer notar, que el clon Hoogvorst muestra alta sensibilidad a la roya
4. Precisión del modelo predictivo: el modelo entrenado es capaz de estimar la productividad de manera insesgada y con un error medio cuadrático medio en torno al 20%, convirtiéndolo en una herramienta muy útil para la planificación de futuras plantaciones.
5. Impacto de las condiciones ambientales: se ha demostrado que las condiciones edafoclimáticas tienen más influencia en la productividad que el origen genético, lo que resalta la importancia de seleccionar clones adaptados a cada entorno específico.
6. Las variables edáficas más influyentes son las relacionadas con la textura del suelo.
7. Variables climáticas más influyentes: de entre las climáticas, PV, TMI, NMF y EMBERGER exhiben la mayor influencia en el modelo entrenado, si bien no se observa ningún patrón en cuanto a aridez, termicidad o precipitación.

Bibliografía

AEFCON; COSE; FAFCYL; JCYL; SOMACYL; 2020. Beneficios ambientales y socioeconómicos de la populicultura en la cuenca del Duero. Propuestas del sector para el III Ciclo de Planificación Hidrológica. 72 pp.

<https://www.chduero.es/documents/20126/1213596/N730.pdf>

AEMET, 2011. Atlas climático ibérico/Iberian climate atlas, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Agencia Estatal de Meteorología-Instituto de Meteorología de Portugal. 79 pp.

CASTEDO-DORADO, F.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; RAMOS-GONZÁLEZ, G.; ÁLVAREZ-ESTEBAN, R. Y ÁLVAREZ-TABOADA, F.; 2023. A user-driven, reduced whole-stand growth model for major hybrid poplar clones in Spain. Scand. J. For. Res. 38, 329-343.

GARCÍA HERNÁNDEZ, I. (2018). Consumo de chopo por la industria en España: evolución y necesidades futuras. Libro de Actas II Simposio del chopo: 231-233

<https://www.simposiodelchopo.es/sites/default/files/actas/actas.pdf>

IPCC; 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)].

IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

RESHEF, Y.A., RESHEF, D.N., FINUCANE, H.K., SABETI, P.C.,

MITZENMACHER, M., 2016. Measuring Dependence Powerfully and Equitably.

Journal of Machine Learning Research 17, 1-63

RUEDA J. ET AL., (2016). Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid.

Versión febrero de 2016. 72 pp.

RUEDA J.; GARCÍA CABALLERO J.L.; CUEVAS Y.; GARCÍA-JIMÉNEZ C.; VILLAR C.; 2019 Cultivo de chopos en Castilla y León. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. 116 pp.

VERNET, J.L.; VERNET, P.; 1966. Sur un indice bioclimatique applicable aux climats de la France. Nat. Monspel. Ser. Bot. 17, 253-261.

CAPÍTULO 4

Propiedades tecnológicas de clones de chopo en función de diferentes variables.

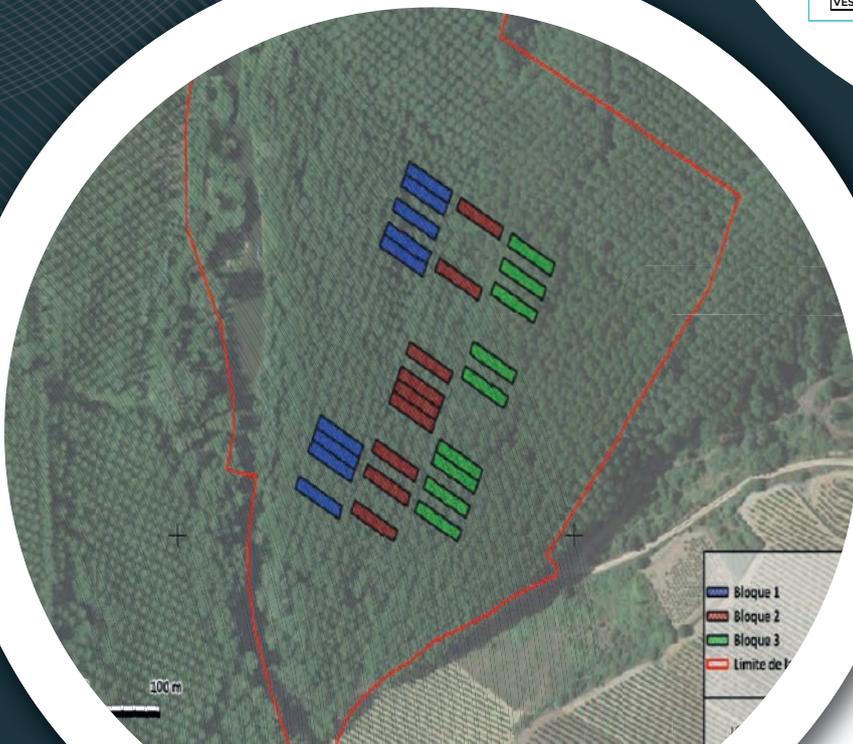


Mediciones en árbol en pie con métodos no destructivos: velocidad acústica y densidad

$$MOE_{dinámico} = V^2 \times Db$$

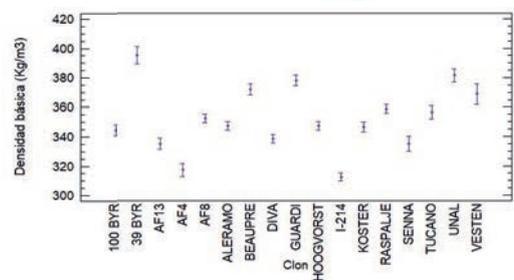
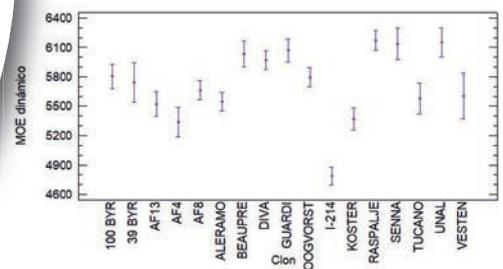
18 parcelas clonales y 17 clones

CLON/EDAD	DUERO									EBRO							
	Fresno de la Vega 2018	Valencia de Don Juan 2010	Valencia de Don Juan 2015	Valencia de Don Juan 2019	Villafra 2018	Villamañán 2011	Villaveza del Agua 2018	Villasabariego 2012	Cuadros 2018	Santibañez 2018	Cinames del Tejar 2018	Marjalba de la Ribera 2018	Villavieja 2019	Credifes 2019	Mahave 2015	López 2019	Hornilleja 2019
100BYR																	
39 BYR																	
AF13																	
AF4																	
AF8																	
ALERAMO																	
BEAUPRE																	
DIVA																	
GUARDI																	
HOOGVORST																	
I214																	
KOSTER																	
RASPALJE																	
SENN																	
TUCANO																	
UNAL																	
VESTEN																	



Parcelas de ensayos clonales con diseño.

Diferencias entre clones en propiedades tecnológicas de madera.



Esther Merlo Sánchez
Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL

4. PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE CLONES DE CHOPO EN FUNCIÓN DE DIFERENTES VARIABLES.

Introducción

Las propiedades tecnológicas de la madera son fundamentales para determinar su idoneidad en diferentes usos industriales, y en el caso del género *Populus*, la integración de métodos no destructivos en el proceso de selección representa un avance clave en su caracterización. Entre estas metodologías destaca el uso de tecnología sónica, que permite evaluar la calidad mecánica de la madera a través de la propagación de ondas acústicas. Este enfoque, empleado en España desde hace más de una década para la caracterización de ensayos genéticos, ofrece una herramienta eficiente para estimar parámetros de interés tecnológico de la madera como el módulo de elasticidad dinámico.

Por otro lado, la extracción de muestras de madera mediante barrena de Presler es una técnica complementaria que permite la evaluación de la densidad de la madera de forma no destructiva. La densidad, un parámetro crítico para la resistencia mecánica y otros usos industriales, se estima a partir de pequeñas muestras sin comprometer la integridad del árbol. Estas herramientas combinadas mejoran la precisión y rapidez en la selección de

clones o genotipos superiores de *Populus*, optimizando su aprovechamiento industrial y facilitando su selección para aplicaciones industriales específicas.

Este capítulo recoge los trabajos realizados por Madera Plus en las parcelas de estudio a lo largo del proyecto. En total, se han evaluado 17 ensayos clonales y 14 parcelas productivas. Sobre dichas parcelas se han recogido datos de crecimiento, forma de fuste y propiedades tecnológicas de la madera con tecnologías no destructivas. El análisis de estos datos en las parcelas clonales permite conocer la variabilidad dentro del área de distribución para diferentes clones y edades. Por otro lado, a partir de dicha información se podrá evaluar el control genético del clon, así como su relación con los parámetros de suelo, fisiográficos y climáticos, que han sido también evaluados en otras actividades en las diferentes parcelas. En el caso de parcelas productivas, los datos obtenidos se pueden relacionar con datos remotos y seguir a lo largo de la cadena de suministro buscando relaciones con las trozas a distintas alturas y las chapas extraídas por desenrollado de dichas trozas.

Metodología

1. Propiedades evaluadas sobre árboles en pie

Las propiedades tecnológicas evaluadas han sido Módulo de elasticidad dinámico y densidad básica, ambas de gran interés para el uso de madera estructural y productos de madera sólida. Dichas propiedades y la forma de evaluarlas se definen a continuación.

Módulo de elasticidad dinámico (MOEd)

El módulo de elasticidad dinámico es un estimador indirecto de la rigidez de la madera y se obtiene a partir de la velocidad de desplazamiento de una onda

de impacto a través de la madera y de la densidad de la misma en el momento de medición según la siguiente fórmula:

$$MOEd = \rho \cdot v^2$$

donde MOEd es el módulo de elasticidad dinámico (MPa), ρ es la densidad básica de la madera (kg/m^3) y v es la velocidad de propagación de la onda acústica (m/s).

Densidad básica (DB)

La densidad es una de las propiedades que mejor caracteriza la aptitud de la madera para diferentes productos y se define como la masa por unidad de volumen de madera húmeda. Está relacionada con muchas otras propiedades



Para cada individuo se extrajo una muestra de madera mediante barrena de Pressler a una altura del fuste de 1,30 m de 10cm de longitud (parte externa de la madera del fuste). Esta muestra fue identificada, etiquetada y conservada en nevera hasta su llegada a laboratorio para su posterior análisis gravimétrico. Una vez que las muestras de madera se encuentran en laboratorio, se tomaron medidas de peso en verde (sobre balanza de precisión en mg) y sus dimensiones (diámetro y longitud en mm) para determinar así su volumen y correspondiente densidad en verde. Posteriormente, para conocer la densidad básica se realiza un secado de las muestras en estufa durante 24 horas a 103 °C, y se pesan en balanza de precisión miligramétrica, obteniéndose los valores de masa en condiciones anhidro. El cociente del peso anhidro entre el volumen en verde permite calcular la densidad básica.

2. Descripción de las parcelas de estudio

Este estudio ha evaluado dos tipos de parcelas:

1) Parcelas clonales con diseño experimental y presencia de diferentes clones procedentes de distintos centros

de mejora genética europeos y con diferentes edades que van a permitir evaluar la influencia del clon en la calidad tecnológica e industrial de dichos clones en nuestra zona y la existencia de interacción genotipo ambiente.

2) Parcelas productivas de un mismo clon y a edad final de turno sobre aquellos clones que actualmente están llegando a la industria.

Parcelas clonales

Se han evaluado un total de 17 parcelas clonales donde están representados 17 clones diferentes (Imagen 1).

En cada una de las parcelas, con diseño experimental de 3 bloques, se evaluaron 3 árboles por bloque (9 árboles por parcela), tomando datos de crecimiento, forma y calidad de madera con el objetivo de caracterizar el comportamiento de cada uno de los clones en las diferentes condiciones ambientales.

Los clones están distribuidos de forma desequilibrada en las diferentes parcelas por lo que no todos los clones están representados en todos los sitios. Además, la edad de las parcelas de estudio varía entre 4 y 13 años. A continuación, se muestra la representación clonal en el global de las parcelas muestreadas.



Imagen 1. Localización de parcelas clonales.

Tabla 1. Distribución de los 17 clones de chopo en las diferentes parcelas identificadas por edad y ribera a la que pertenecen, Duero o Ebro.

CLON/EDAD	DUERO												EBRO				
	Fresno de la Vega 2018	Valencia de Don Juan 2010	Valencia de Don Juan 2015	Valencia de Don Juan 2019	Villafer 2018	Villamañán 2011	Villaveza del Agua 2018	Villasabariego 2012	Cuadros 2018	Santibañez 2018	Cimanes del Tejar 2018	Marialba de la Ribera 2018	Villavidel 2019	Gradefes 2019	Mahave 2015	López 2019	Hormilleja 2019
CLON/EDAD	6	14	9	5	6	13	6	12	6	6	6	6	5	5	9	5	5
100BYR																	
39 BYR																	
AF13																	
AF4																	
AF8																	
ALERAMO																	
BEAUPRE																	
DIVA																	
GUARDI																	
HOOGVORST																	
I214																	
KOSTER																	
RASPALJE																	
SENNA																	
TUCANO																	
UNAL																	
VESTEN																	

El número de árboles por parcela varió, asegurando un mínimo de 9 árboles por clon. La selección de los árboles se realizó de manera sistemática asegurando la máxima representatividad del clon y reduciendo en la medida de lo posible el efecto borde.

Parcelas productivas

En total se han evaluado 14 parcelas productivas, donde están representados los clones más utilizados actualmente por la industria (Beaupré, Raspalje, MC, I-214, Unal) habiendo asegurado un mínimo de 3 parcelas por clon en los cuatro clones más importantes. De estas 14 parcelas productivas, se encuentran 10 en la Ribera de Ebro y el resto en la ribera del Duero (Imagen 2). Estas mediciones permitirán modelizar

la calidad tecnológica de la madera de las masas adultas de estos clones y comprobar la relación de las variables evaluadas sobre el árbol en pie en la parcela con las propiedades tecnológicas



Imagen 2. Mapa de distribución de las parcelas productivas evaluadas.

finales del producto y así determinar el interés de conocer y caracterizar dichas propiedades en la cadena de suministro para obtener productos de mayor valor añadido.

Dentro de cada parcela se evalúan un total de 36 árboles midiendo diámetros de la base y diámetros normales, rectitud de fuste, altura comercial, así como la velocidad de transmisión de una onda de impacto y densidad básica, para estimación de MOE dinámico, y densidad en verde. Este muestreo consiste en elegir aleatoriamente un árbol en el interior de la masa y seguir una línea continua (recta o quebrada) o discontinua sobre la que se miden 36 árboles dominantes o codominantes que intersequen con ella evitando el efecto borde.

3. Metodología de captura de datos

Mediciones de crecimiento y forma

Se tomaron datos de diámetro normal y diámetro en la base (Imagen 3). Todos los diámetros fueron medidos en cruz mediante forcípula, y a partir de estos se estimó la conicidad de cada árbol medido empleando la siguiente relación:

$$\frac{D_b - D_n}{d}$$

Siendo: D_n el diámetro normal en cm, D_b el diámetro medido en la base del tronco en cm y d la distancia entre los dos diámetros en m.



Imagen 3. Mediciones de diámetro normal, diámetro en la base y altura.

Al menos sobre un árbol representativo por clon y parcela experimental se llevó a cabo la medición de altura total, la altura de copa mediante hipsómetro digital (Vertex IV, Haglof) y se estimó la rectitud de los primeros 5m de manera visual en campo distinguiendo entre 3 niveles de curvatura: recto, ligeramente curvada y muy curvada.

Metodología de evaluación con métodos no destructivos

Se han realizado mediciones de velocidad de desplazamiento de onda de impacto con el equipo sónico *Microsecond Timer*, tomando 8 medidas repetidas en cada árbol (Imagen 4).



Imagen 4. Detalle de la captura de velocidad de desplazamiento de onda con el equipo *Microsecond Timer* por Madera Plus.

Además, fueron extraídos testigos de madera con barrena de Pressler de 5 mm hasta la médula, y muestras de floema hasta el cambium extraídos con sacabocados de 15 mm. Ambas muestras fueron almacenados en frío para posteriormente determinar en laboratorio la densidad verde y densidad básica y evaluación con equipo de espectroscopía de infrarrojo cercano NIR, respectivamente (Imagen 5).



Imagen 5. Detalle de extracción de cores de madera y muestras de fluoema para estimar la densidad básica.

Corrección de humedad para las mediciones de velocidad obtenida sobre árbol en pie

El desplazamiento de una onda se puede ver afectado por la humedad del árbol en el momento de la medición. Esta relación está ampliamente estudiada por debajo de punto de saturación de la fibra (30% de humedad), de tal modo que una variación del 1% de humedad en este rango implica un incremento del 0,8% de la velocidad. Por encima de dicho umbral, la variación es mucho menor y la mayoría de los autores no lo consideran. Sin embargo, dada la alta variación de humedad observada sobre las muestras de madera en las parcelas de chopo, se

procedió a realizar una experiencia que no estaba inicialmente prevista de cara a poder controlarlo y en su caso corregir el efecto de la humedad en el valor de velocidad. Para ello se procedió a realizar el seguimiento en variación de humedad y de velocidad sobre árboles en pie que habían sido previamente anillados, con el objetivo de forzar dicha pérdida de humedad, y paralizando el crecimiento del árbol de cara a acotar la influencia de la humedad.



Imagen 6. Detalle en el momento de realizar el anillado de uno de los árboles incluidos en el estudio de variación de velocidad con la humedad.

Los árboles fueron evaluados durante 6 veces en semanas y meses consecutivos y en base a los resultados se desarrolló un modelo de corrección de velocidad que fue posteriormente aplicado a los valores de velocidad obtenidos en árbol de todos los árboles del estudio antes de llevar a cabo el análisis. En el mismo momento de evaluar la velocidad de desplazamiento se extrajeron muestras con barrena de Pressler para estimar la humedad a la que se encontraba el árbol. Con los datos así obtenidos se enfrentaron los valores uno a uno para cada árbol. En el proceso se eliminaron los valores atípicos, así como aquellos datos que careciesen de sentido. Se elaboró un modelo no lineal, empleando la función “nls” de Rstudio, con la siguiente forma:

$$V_2 = V_1 \cdot (1 + a \cdot (Hum_1 - Hum_2))$$

Dónde: V_2 , velocidad (m/s) en el instante 2; V_1 , velocidad (m/s) en el instante 1; a , coeficiente del modelo; Hum_1 , humedad en el instante 1 (%); Hum_2 , humedad en el instante 2 (%).

El Modelo obtenido permite corregir la velocidad evaluada en árbol con un coeficiente de determinación de 0.94 y un error de 74m/s.

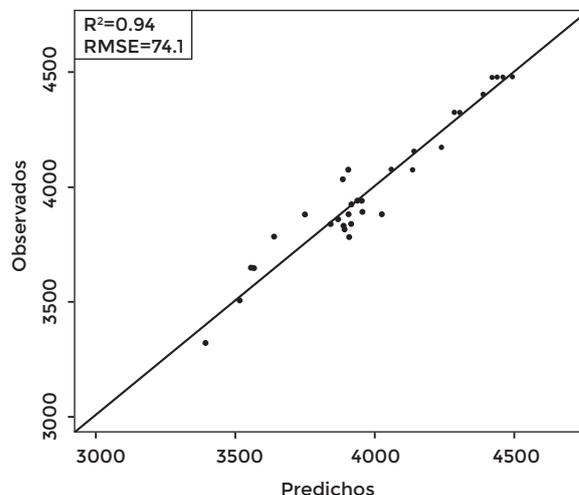


Imagen 7. Gráfico de observados vs predichos para el modelo de corrección de velocidad en función de la humedad en el árbol en pie en el momento de la medición.

4. Mapa de variación de las propiedades tecnológicas de la madera en el área de distribución del chopo

Se han analizado las relaciones de las propiedades tecnológicas medidas sobre los árboles en pie, con datos fisiográficos, climáticos y con diferentes índices extraídos de imágenes de satélite en las parcelas de estudio. El análisis estadístico ha permitido el desarrollo de algoritmos predictivos a partir de los cuales hemos elaborado un mapa de variación de módulo de elasticidad dinámico y densidad básica del chopo en su área de distribución y para los diferentes clones. Las propiedades tecnológicas modelizadas han sido: densidad básica (DB) y módulo de elasticidad dinámico (MOEdb). Además, dada la influencia del clon en dichas propiedades se desarrolló un modelo de identificación de clon a partir de imágenes de satélite que sirvió de filtro en la predicción de dichas propiedades.

Resultados

1. Propiedades tecnológicas evaluadas sobre el árbol en pie

Se ha observado una gran variación en las propiedades tecnológicas (Densidad básica, Módulo de elasticidad) evaluadas

mediante tecnología sónica y extracción de cores. Se muestra a continuación, un resumen de estadísticos descriptivos de las variables evaluadas para todas las parcelas clonales y productivas incluyendo además de las propiedades tecnológicas de la madera, las variables de crecimiento.

Tabla 2. Tabla resumen variables parcelas clonales.

Parcela	Diámetro en la base (cm)		Diámetro normal (cm)		Altura total (m)		Densidad básica (gr.cm ³)		Módulo de elasticidad dinámico (MOEd)	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
CIM_2018	19,0	17,7	15,2	18,7	13,5	14,7	356	10,0	5145	13,4
CUAD_2018	17,1	20,3	13,9	21,4	12,9	13,8	330	8,6	4721	12,2
FRES_2018	16,5	17,0	14,1	16,6	12,3	16,9	362	9,2	6259	11,8
GRAD_2019	15,2	16,4	12,3	17,9	11,2	13,6	343	6,5	4840	11,4
HORM_2019	10,6	17,2	8,2	15,9	8,2	10,2	364	7,8	5577	15,1
LOP_2019	13,3	21,4	10,6	22,9	9,8	15,5	365	8,2	6518	12,4
MAHA_2015	21,9	20,1	18,8	22,0	16,9	16,3	365	7,2	7084	9,7
MARI_2018	19,8	17,9	17,4	18,7	14,2	17,1	335	6,4	5767	13,4
SANTI_2018	21,3	14,1	17,2	14,4	15,5	7,3	332	7,4	5015	18,8
VAL_2010	36,4	11,6	31,5	11,4	28,9	4,0	362	6,5	7092	7,6
VAL_2015	24,3	16,3	20,7	17,9	18,8	13,5	357	8,8	6557	12,6
VAL_2019	18,2	15,7	15,0	16,1	15,6	15,9	327	6,1	4971	11,5
VILLA_2018	19,6	16,6	15,6	14,9	14,2	9,5	344	5,5	5453	9,2
VILLAM_2011	31,4	17,3	27,3	16,7	25,0	16,0	356	6,6	6982	10,5
VILLAS_2012	30,4	19,8	26,0	19,9	22,5	10,5	348	7,6	6791	12,7
VILLAV_2018	16,2	20,0	14,0	21,3	12,2	12,5	350	8,7	6124	13,7
VILLAV_2019	18,0	25,1	15,1	25,7	13,3	24,1	353	8,4	5777	13,9

Dónde: *D_b*, diámetro de la base (cm); *D_m*, diámetro normal (cm); *DB*, densidad básica (kg/m³); *h*, altura total de los árboles (m); *Vel*, velocidad de propagación de la onda de impacto (m/s); *MOEd*, módulo de elasticidad dinámico (MPa); *Med*, valor medio de la variable; *CV*, coeficiente de variación de la variable (%).

Tabla 3. Tabla resumen variables parcelas productivas.

Parcela	Diámetro en la base (cm)		Diámetro normal (cm)		Altura total (m)		Densidad básica (gr.cm ³)		Módulo de elasticidad dinámico (MOEd)	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1_L	33,4	10,9	30,3	11,2	303	3,4	4492	1,4	6122	6,3
2_U	33,3	11,8	28,9	11,7	352	0,8	4253	5,1	6363	9,5
3_B	36,8	9,4	33,8	9,8	333	4,5	4795	1,5	7665	7,4
3_L	41,2	8,5	36,9	9,3	320	3,5	4273	2,0	5849	4,2
3_M	40,5	11,4	36,1	13,4	344	3,3	4385	1,6	6610	3,8
4_B	38,6	22,5	35,3	23,2	346	4,0	4527	2,6	7088	4,0
4_L	49,7	18,3	45,0	18,9	312	7,9	4369	4,4	5954	9,6
4_M	43,4	23,5	39,1	22,5	345	9,0	4441	2,1	6799	10,9
6_L	39,2	9,9	35,0	9,5	313	3,0	4238	2,1	5626	3,0
7_R	43,1	7,2	39,2	7,6	322	3,8	4550	0,9	6667	4,2
8_M	32,9	7,4	30,6	7,7	335	1,1	4799	1,5	7711	4,2
8_R	39,7	8,8	35,4	8,3	328	2,8	4839	1,7	7674	4,7
9_R	37,0	20,3	32,8	20,5	336	3,7	4810	2,6	7769	4,9
10_B	36,1	9,2	32,5	10,4	356	1,4	4568	2,8	7423	6,0

Dónde: *D_b*, diámetro de la base (cm); *D_m*, diámetro normal (cm); *DB*, densidad básica (kg/m³); *Vel*, velocidad de propagación de la onda de impacto (m/s); *MOEd*, módulo de elasticidad dinámico (MPa); *Med*, valor medio de la variable; *CV*, coeficiente de variación de la variable (%).

Observamos que el coeficiente de variación de las variables de crecimiento tanto en las parcelas clonales como en las productivas es muy superior al de las variables descriptivas de propiedades tecnológicas de la madera lo que implica mayor estabilidad de las propiedades de madera.

2. Porcentaje de variabilidad explicada por el clon y por la parcela

Se ha observado que en la variable densidad básica, el clon explica el 45% de la variación, mientras que la parcela sólo explica el 12%. En el caso de Módulo de elasticidad, es la parcela la que explica el 45% de la variación y el clon explica el 28%.

Esto significaría que podríamos modular la densidad básica de la madera que entra en la industria mediante selección clonal y modular el módulo de elasticidad de dicha madera seleccionando bien dónde plantar.

3. Clones de interés en cuanto a propiedades tecnológicas de la madera

De todos los clones muestreados destaca Guardi como el que manteniendo un crecimiento anual superior a la media consigue altos valores de propiedades tecnológicas (Densidad básica y Módulo

de elasticidad superior a la media). Otros clones con buenas propiedades tecnológicas como Raspalje, Beaupré, Unal y 30BYR tienen crecimientos por debajo de la media. El Clon AF8 consigue valores de propiedades tecnológicas y crecimientos anuales ligeramente por encima de la media.

Tabla 4. Tabla con valores promedio de densidad básica (Db media) por clon.

Clon	n	Db media (Kg/m ³)	ES	min	max
39 BYR	18	395,2	4,331	386,7	403,7
UNAL	34	381,6	3,192	375,3	387,8
GUARDI	52	378,1	2,53	373,1	383
BEAUPRE	44	372,1	2,776	366,6	377,5
VESTEN	14	368,9	4,963	359,2	378,6
RASPALJE	68	358,7	2,207	354,4	363,1
TUCANO	30	356,5	3,378	349,9	363,1
AF8	76	352,1	2,08	348,1	356,2
HOOGVORST	70	347,2	2,158	343	351,5
ALERAMO	79	347,2	2,026	343,2	351,2
KOSTER	55	346,3	2,457	341,5	351,2
100 BYR	46	344,5	2,68	339,3	349,8
DIVA	79	338,3	2,03	334,3	342,2
SENNA	25	334,9	3,705	327,7	342,2
AF13	43	334,8	2,768	329,4	340,2
AF4	33	317,2	3,206	310,9	323,5
I-214	85	312,4	1,955	308,6	316,2

Tabla 5. Tabla con valores promedio de módulo de elasticidad dinámico (MOEd) por clon.

Clon	n	MOEd (N/mm ²)	ES	min	max
RASPALJE	69	6172	74	6027	6317
UNAL	35	6151	106	5942	6359
SENNA	29	6136	116	5909	6363
GUARDI	55	6069	83,4	5906	6233
BEAUPRE	44	6034	93,8	5850	6218
DIVA	80	5970	68,2	5837	6104
100 BYR	47	5805	90	5628	5981
HOOGVORST	73	5795	71,3	5655	5935
39 BYR	18	5743	146	5456	6030
AF8	77	5663	69,9	5526	5800
VESTEN	14	5606	168	5277	5934
TUCANO	30	5577	114	5353	5801
ALERAMO	82	5547	67,2	5415	5678
AF13	45	5522	91,6	5343	5702
KOSTER	58	5372	81,3	5213	5532
AF4	33	5339	108	5127	5552
I-214	86	4788	65,8	4659	4917

4. Mapa de variación de las propiedades tecnológicas de la madera en el área de distribución del chopo

La densidad básica, está influenciada fundamentalmente por el clon, la altitud y la densidad de plantación. En el caso del módulo de elasticidad dinámico se aprecia una elevada relación con

la actividad fotosintética al inicio del periodo vegetativo, representada por el Índice NDVI y GNDVI. Se muestran los estadísticos de bondad de ajuste de los modelos así como los gráficos de observados predichos, y de sus validaciones cruzadas.

Tabla 6. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos de predicción en base a datos remoto.

Variable	R ²	R ² _{CV}	RMSE	RMSE _{CV}	SWT	BPT	DWT	n
DB	0.94	0.82	3.81	6.52	0.51	-	-	13
MOEdb	0.75	0.62	360.5	437.3	0.53	0.48	0.09	14

Dónde: R², coeficiente de determinación del modelo; R²_{CV}, coeficiente de determinación de la validación cruzada del modelo; RMSE, raíz del error medio cuadrático del modelo; RMSE_{CV}, raíz del error medio cuadrático de la validación cruzada del modelo; SWT, test de Shapiro Wilk para la comprobación de la normalidad de los residuos; n, tamaño muestral; BPT, test de Breusch Pagan para la comprobación del supuesto de homocedasticidad de los residuos del modelo; DWT, Test de Durbin Watson para la detección de autocorrelación en los residuos.

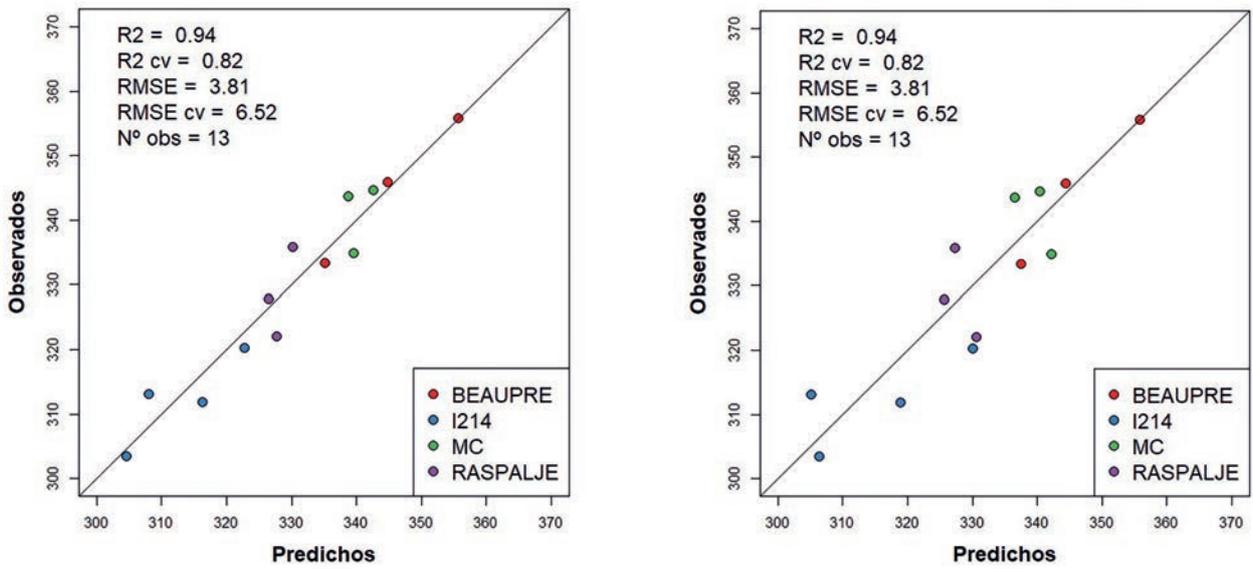
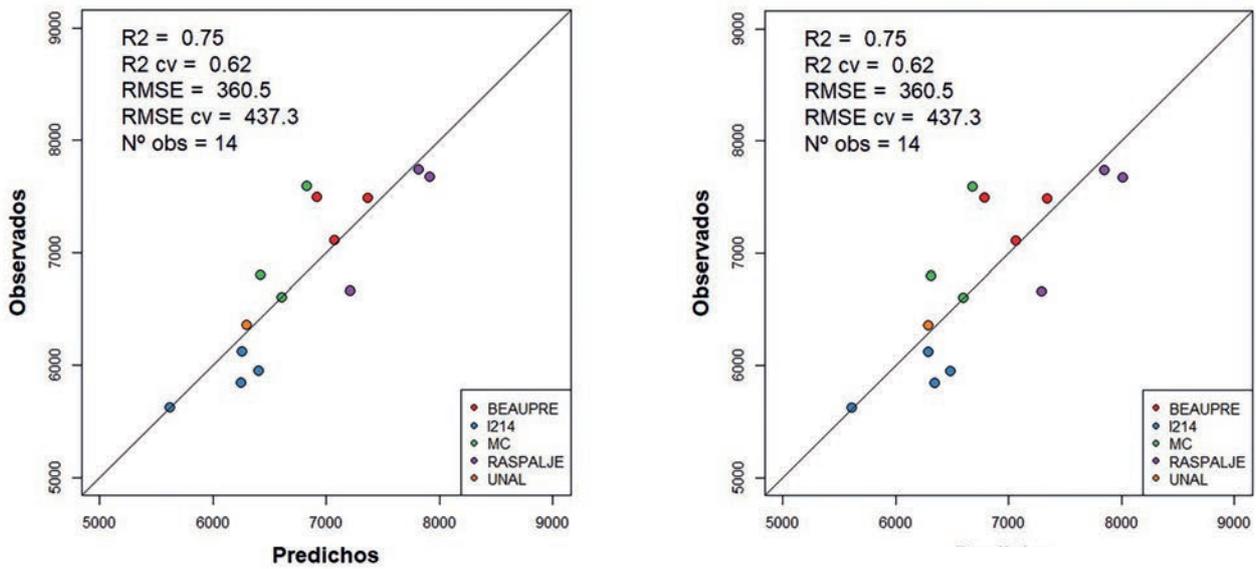


Figura 6. Gráficos de observados predichos del modelo de densidad básica (izquierda) y su validación cruzada (derecha).



En base a estos modelos, se pudo realizar una cartografía de predicción de propiedades tecnológicas basada en datos remotos. A continuación, se muestra un ejemplo de la cartografía de ambas variables (DB y MOEdb).



Imagen 1. Mapa de densidad básica de la madera de chopo.

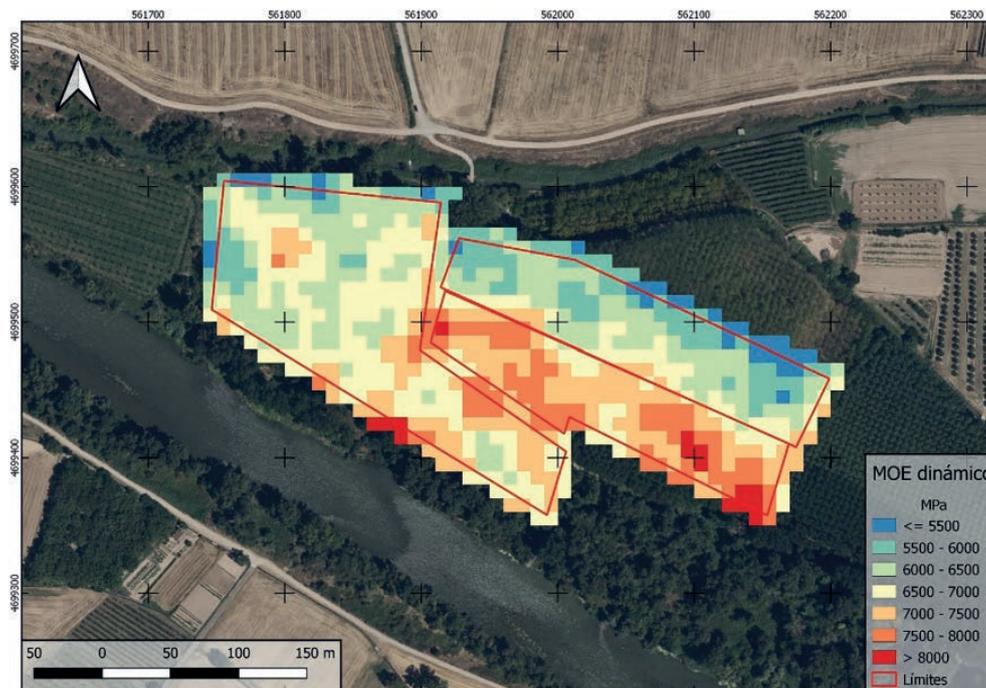


Imagen 2. Mapa de MOE dinámico de la madera de chopo.

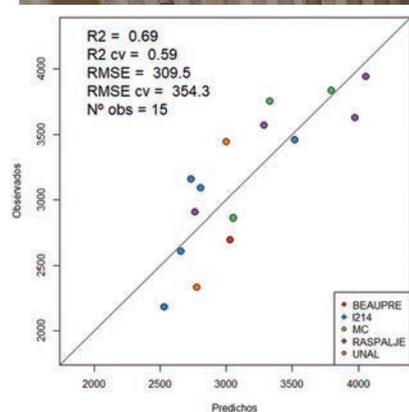
CAPÍTULO 5

Influencia del clon y de la altura en el árbol en las propiedades tecnológicas del producto final.



Troza	MOE _L	MOR _L	MOE _T	MOR _T
1	5568,5	34,3	2444,9	18,6
2	7452,3	40,9	3238,3	22,7
3	7560,7	42,7	3464,4	24,5

Clon	MOE _L	MOR _L	MOE _T	MOR _T
I-214	5988,6	33,1	2648,2	19,3
UNAL	6053,3	35,6	2698,3	19,4
RASPALJE	7241,4	41,3	3135,6	22,7
MC	7295,7	41,3	3220,4	24
BEAUPRE	7159,9	42,9	3288,4	22,6



CLON	MOE (N/mm ²)	MOR (kN/mm ²)	Densidad (kg/m ³)
UNAL	7770,2	25,6	657,5
BEAUPRE	9201,8	27,5	628,5
I-214	9849,2	31,4	639,9
MC	10168,5	29,0	628,2
RASPALJE	10774,5	33,1	649,5

Esther Merlo Sánchez
Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL
Gonzalo Caballé
Saúl Gutierrez García
Mario Azaña Galán
Laura Gómez Pérez
Fundación Cesefor

Oskia Saldise, Javier Saldeise
Tabsal SCL SL
Izaskun Garrido Fuertes
Grupo Garnica Plywood SA

5. INFLUENCIA DEL CLON Y DE LA ALTURA EN EL ÁRBOL EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DEL PRODUCTO FINAL

Introducción

La madera tiene unas propiedades tecnológicas muy variables que dependen de la genética, y de las condiciones de crecimiento tanto ambientales como selvícolas. En España el chopo es una especie de madera muy importante utilizada para la producción de tablero contrachapado y productos tecnológicos de madera como el LSL (Laminated Strand Lumber). Actualmente las plantaciones productivas se realizan con diferentes clones, siendo los más abundantes los clones I-214 (56.2%), Beaupré (13.5%), Raspalje (10.1%) Unal (8.8%) y MC (5.7%).

La madera de chopo es una madera de poro difuso, que muestra un mismo tamaño y proporción de fibras y vasos a lo largo del anillo durante todo periodo vegetativo. Estudios previos han demostrado que sus propiedades anatómicas y tecnológicas apenas varían a lo largo de los años y aunque pueda haber una ligera variación los primeros dos, tres años, pasa a tener propiedades y características relativamente estables a partir del año 5. Sin embargo, diversos estudios reflejan una influencia significativa del clon en las propiedades de la madera y resaltan la importancia

de considerar el clon de cara a asegurar su adecuación según las exigencias de la industria. En cuanto al efecto del sitio, los resultados son diversos y en algunos casos se ha observado una anatomía e incluso densidad de madera similar del mismo clon en sitios distintos (Zhao et al, Fig. 1) aunque existen ciertos patrones ligados sobre todo a la duración del periodo vegetativo y disponibilidad de agua.

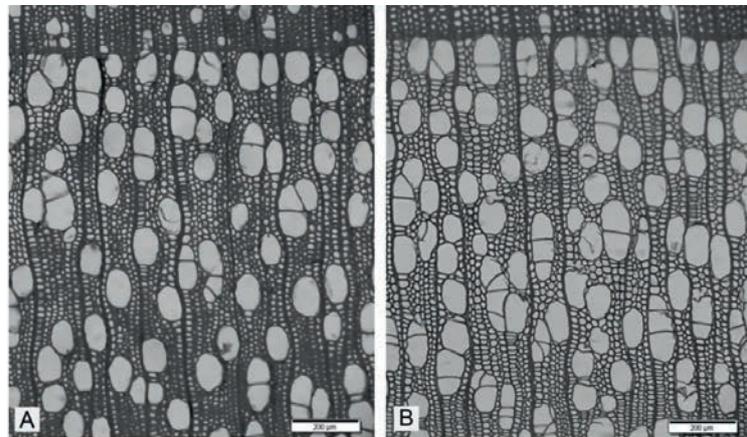


Figura 1. Imágenes de la sección transversal del cuarto anillo de crecimiento del clon *Populus x euroamericana* cv. 74/76 creciendo en dos sitios diferentes A y B (Fuente: Zhao et al. 2014).

Las propiedades tecnológicas de la madera tienen un impacto en el procesado, rendimiento y calidad final del producto. Las propiedades físicas y mecánicas como el módulo de elasticidad, módulo de ruptura y densidad son esenciales para optimizar la rigidez y el comportamiento mecánico del producto final y su idoneidad para su uso en diferentes aplicaciones.

La calidad de la madera se puede evaluar en la cadena de suministro. El uso de técnicas no destructivas (NDT) en las últimas décadas (Ross 2002; Schimleck et al, 2002), la técnica acústica se convierte en el método más factible y práctico (Chauhan y Walker 2006). Estas técnicas han evolucionado desde la aplicación para la evaluación del producto y el control de calidad hasta la evaluación de troncos. Entre los parámetros que se pueden medir por este método se encuentra el módulo de elasticidad dinámico (MOEdyn), donde MOE es el criterio más importante para evaluar las propiedades de la madera, especialmente para aplicaciones estructurales.

Estas propiedades varían según el clon, la edad de la plantación, la calidad del sitio, la densidad de la plantación e incluso entre árboles (Gallego et al, 2021, Rescalvo et al., 2020, Zobel y Buijtenen 1989; Zhang et al., 2002, Jiang et al., 2007)). La variación de las propiedades de la madera a lo largo del fuste, apenas ha sido estudiada en el chopo, aunque sí se conoce la importancia de la edad cambial en el proceso de formación de la madera siendo el ángulo de la microfibrilla y la longitud de la fibra las que se ven más influenciadas. En otras especies como el eucalipto estudios recientes muestran una variación significativa en densidad y módulo de elasticidad a distintas alturas dentro del árbol (Balasso et al 2021).

En el marco del GO BIOPOPTECH, estudiamos la variación en propiedades tecnológicas de la madera en función del clon y de la altura del fuste y su repercusión en la calidad del producto final. Este estudio se ha llevado a cabo

utilizando tecnologías no destructivas para caracterizar tanto la chapa como la madera en rollo obtenida de las plantaciones productivas evaluadas en pie y cuyos resultados ya han sido comentados en capítulos anteriores.

Se ha realizado el seguimiento en la cadena de procesado de diferentes lotes representativos de madera en rollo extraídas de parcelas clonales productivas guardando su trazabilidad respecto de la altura de la troza en el árbol y realizando posteriormente el análisis de la calidad final de la chapa, del tablero contrachapado y del laminated strand lumber (LSL) de los mismos lotes de trozas.

Metodología

El estudio se realizó con madera de 10 parcelas productivas de diferentes clones localizadas a en las cuencas del Duero y del Ebro (Fig. 2).

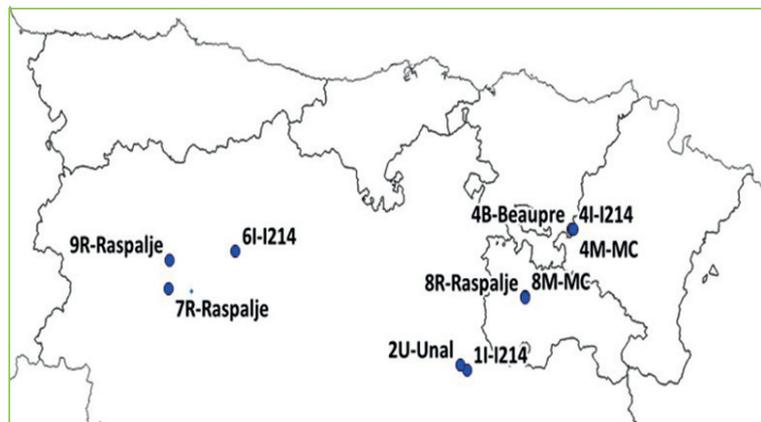


Figura 2. Mapa de distribución de las parcelas del estudio.

Las parcelas de donde proviene la madera tenían una edad entre los 14 y 19 años, una altura comercial similar y un diámetro entre 32 y 49 cm y estaban localizadas en un gradiente altitudinal entre 534 y 959 m según se expone en la tabla 2 donde se muestran también otras variables descriptivas de las masas.

Tabla 1. Variables descriptivas de las parcelas de donde se extrajo la madera del estudio. N: densidad (pies/ha), G: área basimétrica (m²/ha), Db: diámetro en la base (cm), Gg: diámetro normal (cm), Hcom: altura comercial (m).

Parcela	Clon	Altitud	N	G	Db	Dg	Hcom	Edad
1_I	I-214	959	353	25,8	33,4	30,5	14,0	16
2_U	Unal	943	283	18,8	33,3	29,1	14,0	16
4_B	Beaupre	543	388	39,8	38,6	36,2	17,0	19
4_I	I-214	541	365	59,9	49,7	45,8	16,0	19
4_M	MC	543	363	45,8	43,4	40,1	17,0	19
6_I	I-214	829	368	35,6	39,2	35,1	15,0	14
7_R	Raspalje	781	300	36,4	43,1	39,3	16,0	15
8_M	MC	534	368	27,2	32,9	30,7	16,0	15
8_R	Raspalje	538	358	35,6	39,7	35,6	16,0	18
9_R	Raspalje	831	401	35,3	37,0	33,5	15,0	16

1. Caracterización no destructiva de calidad tecnológica de la madera

Se ha realizado la caracterización de 1638 trozas procedentes de las parcelas productivas previamente caracterizados en pie, resultados presentados en capítulos anteriores. Durante las actividades de aprovechamiento, se han diferenciado y mantenido

separadas las trozas según su altura en el fuste (primeras, segundas, terceras y tronquillo). Las trozas se trasladaron identificadas por altura a la planta de Baños de Río Tobia del socio Garnica para la fabricación de tablero contrachapado. El tronquillo, parte superior del fuste con menos de 22 cm de diámetro, se trasladó a la planta del socio Tabsal para la fabricación de LSL (Fig. 3).



Figura 3. Esquema de seguimiento y caracterización de la madera en rollo al producto.

Se han evaluado una muestra de entre 30 y 50 trozas por cada altura dentro de cada parcela productiva de un clon concreto. La longitud de las trozas variaba de 5,15-5,30m en las primeras trozas, de 3.95 a 5,30m en las segundas trozas, de 2,60m a 5,30 las terceras troza y el tronquillo de 2.20m a 2.35m.

Sobre cada troza se ha estimado el Módulo dinámico utilizando un equipo sónico de resonancia Hitman HM200 (FiberGen, NZ) y se han extraído cores a 5 cm de las testas con ayuda de un taladro sobre el que se acopla la barrena de presler que fueron evaluados en laboratorio para estimar la densidad en verde, la densidad básica, y la humedad. Los diámetros de las testas y longitudes se han medido con cinta métrica, con precisión de 5mm (Imágenes 2,3, 4 y 5).

Tabla 2. Número de muestras por parcela productiva

Parcela	Nº trozas evaluadas con sónicos HM200	Nº de muestras de madera extraídas
4_B	130	15
4_I	178	20
4_M	154	20
6_I	113	20
7_R	163	20
8_M	156	20
8_R	141	22
9_R	145	20
10_B	146	15
1_I	179	18
2_U	130	17
Total	1638	207



Imagen 2. Medición por método de resonancia de la velocidad de propagación de onda acústica en trozas. Equipo Hitman HM200, FiberGen, NZ.



Imagen 3. Medición de diámetro de las testas de cada troza con cinta métrica.



Imagen 4. Medición por método de resonancia de la velocidad de propagación de onda acústica en tronquillo, porción superior del fuste. Equipo Hitman HM200, FiberGen, NZ.



Imagen 5. Obtención de cores en cada troza con barrena de pressler para estimación de densidad de la madera.

2. Control de la influencia de humedad en la toma de datos de velocidad en troza

Al igual que para los árboles en pie y de cara a evaluar la influencia de la humedad en las mediciones de las trozas y desarrollar un modelo para corregirla, se han llevado a cabo 6 medidas de velocidad y humedad sobre un lote de 41 trozas de chopo que han permanecido durante sucesivas semanas en el parque de la fábrica de Garnica de Valencia de Don Juan (Fig. 4).

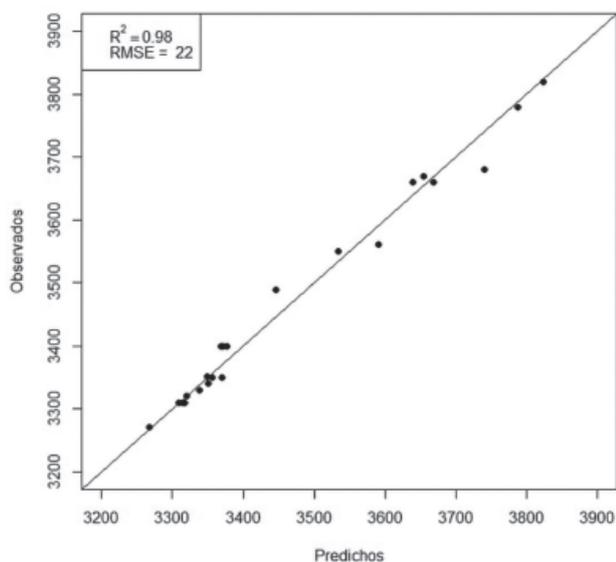


Figura 4. Observados Vs Predichos del modelo de troza con humedad superior al 80%.

3. Obtención de productos de cada troza y clon y caracterización de propiedades tecnológicas

En el parque de madera de Garnica, las trozas se mantuvieron separadas según parcela productiva de origen, clon y posición dentro del tronco, primera, segunda y tercera. De esta manera, al realizar el desenrollo se pudieron separar y obtener chapas de las diferentes partes del tronco (Imagen 6).

Para todas las parcelas, clones y trozas se han fabricado 8 tableros

contrachapados de 1220 x 1220 mm y 20 mm de espesor y se ha enviado una muestra de las chapas al socio Madera Plus para su caracterización con métodos no destructivos (Imagen 7).



Imagen 6. Proceso de obtención de chapa mediante desenrollo de las trozas en las instalaciones de Garnica



Imagen 7. Detalle de medición con ultrasonidos sobre una muestra de la chapa utilizada para realizar el tablero procedente del mismo grupo de trozas por altura y parcela.

Los tableros se enviaron al laboratorio del socio Cesefor para su caracterización siguiendo la norma UNE-EN 789:2006. Para cada combinación clon-troza, se obtuvo en la chapa el módulo de elasticidad dinámico obtenido tras la medición con ultrasonido y en los tableros se realizaron ensayos de flexión para

obtener el módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOE_L), el módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOE_T), el módulo de rotura longitudinal y transversal (MOR_L y MOR_T), la resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T) y la resistencia a tracción longitudinal (Ft).

El tronquillo, material que se astilla para fabricar el LSL, se obtiene de trozas con un diámetro inferior a 22 cm, diámetro mínimo con el que se puede realizar el desarrollo del chopo en la fabricación de tableros contrachapados. Realizadas las tareas de aprovechamiento, el tronquillo fue enviado a Tabsal. Se mantuvo debidamente identificado en función de su parcela de origen y clon. En total, se fabricaron 80 probetas (1000x100x40 mm), 8 por clon y parcela que se mantuvieron individualizadas con pintura de color asegurando su trazabilidad monte industria (Imagen 8).

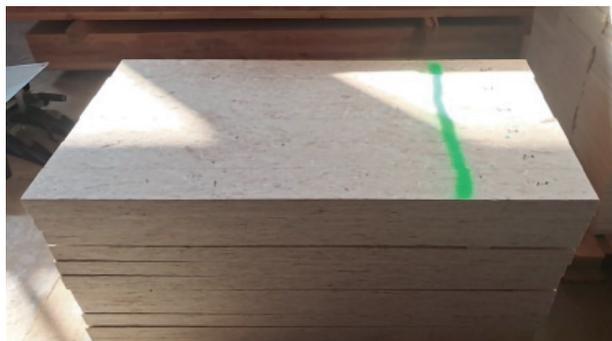


Imagen 8. Detalle de producto de LSL fabricado por Tabsal

Las probetas se enviaron al laboratorio de Cesefor, donde se realizaron los ensayos de caracterización físico-mecánica. Siguiendo la norma UNE-EN 408:2003 se obtuvo el módulo de elasticidad (MOE) y resistencia a flexión (MOR). La densidad se evaluó según norma UNE-EN 408:2004 para conocer el valor medio de toda la muestra.

4. Procesado de datos y análisis estadístico

Una vez preparada la base de datos, se examinaron las correlaciones entre los módulos de elasticidad a diferentes niveles (tronco, chapa y producto). Se compararon los valores promedio de las tres alturas de troncos y chapas así como con el promedio general por cada clon. Adicionalmente, se examinaron los cambios en las propiedades tecnológicas a lo largo del fuste y entre clones mediante análisis ANOVA. Una vez obtenidos los resultados, se han enfrentado los datos de MOE estático tras los ensayos a flexión en laboratorio y las evaluaciones de MOE dinámico realizadas con los equipos sónicos en troza y chapa por parcela y altura de troza, dentro de cada clon. Como resultados se presentan modelos de ajuste que permiten estimar el MOE estático del tablero contrachapado a partir de las mediciones desde troza o chapa que podrían ser de interés para promover un suministro más eficiente a lo largo de toda la cadena de producción. La evaluación del desempeño del modelo se basó en dos índices estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2), que refleja la parte de la varianza total que es explicada por el modelo.

Se evaluaron cuatro requisitos previos que debe cumplir un modelo de regresión lineal: ausencia de multicolinealidad entre variables, homocedasticidad de los residuos, normalidad de los residuos y ausencia de autocorrelación de los residuos. La multicolinealidad se evaluó utilizando el factor de inflación de la varianza (VIF), que debe ser menor a 5

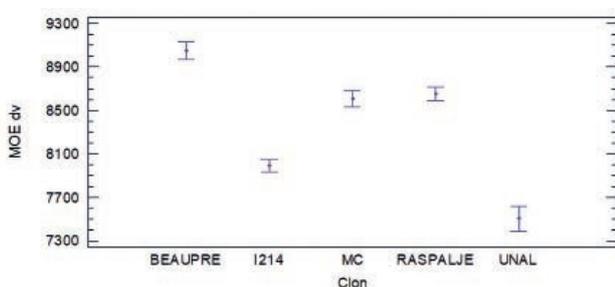
para todas las variables independientes. Respecto al análisis residual, se emplearon las pruebas de Breusch-Pagan, Shapiro-Wilk y Durbin-Watson para comprobar la homocedasticidad, la normalidad y la ausencia de autocorrelación, respectivamente. Finalmente, se mostraron gráficos observados vs. predichos para mostrar el rendimiento del modelo.

Resultados

1. Efecto del clon en las variables medidas en trozas

Se encontraron diferencias significativas entre clones en todas las variables analizadas en las trozas. En módulo de elasticidad dinámico (MOE din, Fig. 5) destaca el clon Beaupre, seguido de MC y Raspalje, mostrando los valores más bajos I-214 e Unal.

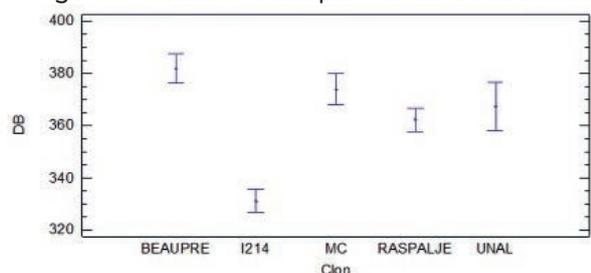
Figura 5. Resultados del test de medias por mínimos cuadrados del módulo de elasticidad



dinámico (MOE din) medido en trozas.

En relación a la densidad básica (DB, Fig. 6), los clones Beaupre y MC, presentaron valores superiores al clon Raspalje y Unla, siendo el clon I-214 el que mostró el menor valor.

Figura 6. Test de medias por mínimos cuadrados



de la densidad básica (DB) de las trozas por clon.

Sin embargo, en densidad en verde (Dv, Fig. 7) aunque el clon I-214 sigue teniendo la densidad más baja, el clon más pesado en el suministro a fábrica es Unal, seguido de MC y Raspalje por encima de Beaupre.

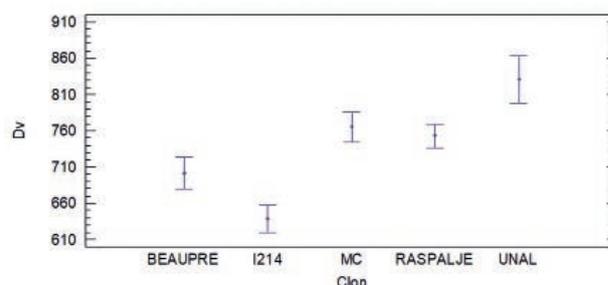


Figura 7. Test de medias por mínimos cuadrados de densidad en verde (Dv) en trozas de diferentes clones.

En el caso de la conicidad (Fig. 8), el clon MC es significativamente el más cilíndrico con un nivel de conicidad por debajo de 1cm por metro. Los clones Beaupre, y Raspalje tienen conicidades similares cercanas a 1,2cm por metro y algo superiores, aunque no significativamente, al clon I-214. En este caso, el clon Unal, fue el de mayor conicidad.

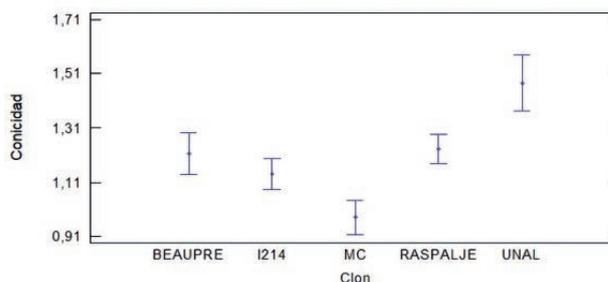


Figura 8. Resultados del test de medias por mínimos cuadrados de la conicidad de trozas por clon.

La influencia del clon es significativa como puede apreciarse en los gráficos. Los valores de todas las trozas de las diferentes parcelas han sido analizados en función del clon mediante un análisis de varianza. En la Tabla 3 se muestran las medias por clon y los errores estándar de las diferentes variables evaluadas en las trozas.

Tabla 3. Valores medios y errores estandar de las variables evaluadas en las trozas por clon.

Clon	N	MOEdin. N/mm2		Densidad básica Kg/m3		Densidad verde Kg/m3		Conicidad cm/m	
		Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar
BEAUPRE	266	9049,0	59,0	381,9	4,2	701,5	15,6	1,2	0,05
I214	451	7992,5	45,3	331,1	3,2	638,9	13,8	1,1	0,04
MC	301	8614,2	55,5	374,0	4,2	764,9	14,6	0,9	0,04
RASPALJE	408	8655,4	47,6	362,2	3,1	753,4	11,7	1,2	0,03
UNAL	130	7505,2	84,4	367,3	6,6	830,8	23,1	1,4	0,07

2. Efecto de la altura en el árbol en las variables medidas en trozas

Se ha encontrado una influencia significativa de la altura de la troza en el árbol en las propiedades tecnológicas de la madera, con un patrón que se mantiene independientemente del clon. Se presentan los resultados del Test de medias por mínimos cuadrados en la Tabla 4.

La representación gráfica de los resultados del ANOVA en este caso, muestra que la troza basal tiene un módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) significativamente menor que el resto, y dicho valor va aumentando según se sube en la altura en el fuste y con una tendencia a descender en la última parte definida como tronquillo (Fig. 9).

Respecto a la densidad básica, se observa que las dos primeras trozas (aproximadamente los 10 primeros metros) tienen valores semejantes subiendo significativamente en la tercera troza y aún más en el tronquillo (Fig. 10).

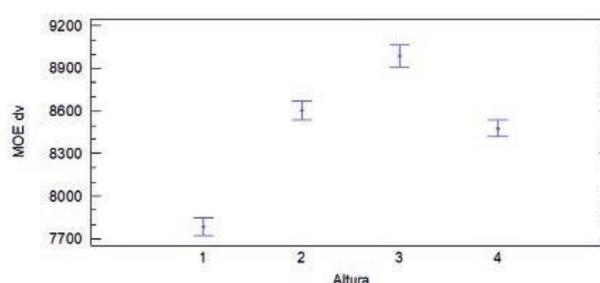


Figura 9. Test de medias por mínimos cuadrados de módulo de elasticidad dinámico (MOE din) en trozas de diferentes alturas, 1: troza basal (0,3 a 5,50m), 2: segunda troza (5,50 a 10,50m), 3: tercera troza (10,50 a 15,50m), 4: Tronquillo, porción superior del fuste con diámetro inferior a 22 cm.

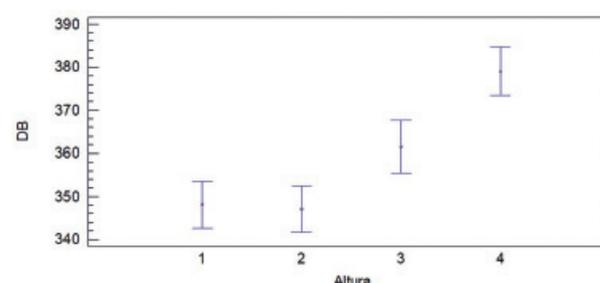


Figura 10. Test de medias por mínimos cuadrados de densidad básica (DB) de las trozas a diferentes alturas, independientemente del clon.

Tabla 4. Valores medios y errores estándar, de las variables evaluadas en las trozas por altura.

Altura en el árbol	N	MOEdin. N/mm2		Densidad básica Kg/m3		Densidad verde Kg/m3		Conicidad cm/m	
		Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar
Troza 1	422	7784,88	44,0	348,15	3,9	719,35	14,9	1,54	0,03
Troza 2	403	8601,89	46,6	347,05	3,8	700,55	14,5	0,95	0,03
Troza 3	301	8988,23	54,2	361,54	4,3	736,95	16,5	1,05	0,04
Troza4 Tronquillo	427	8476,08	43,6	379,02	3,9	753,76	14,9	1,07	0,03

En cuanto a la densidad verde, no hay diferencias significativas a lo largo del fuste (Fig. 11).

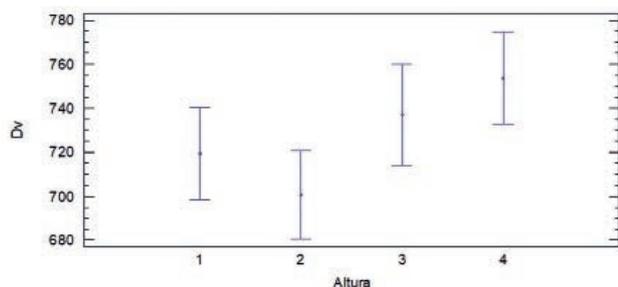


Figura 11. Valores medios de densidad verde (Dv) en trozas de diferentes alturas.

Respecto a la conicidad, la troza basal es la más cónica con mucha diferencia. Se observa que la pieza más cilíndrica en todos los clones es la segunda troza seguida de la 3ª y 4ª troza (Fig. 12).

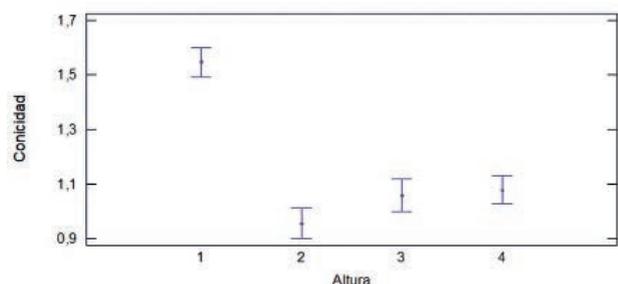


Figura 12. Resultado test de medias por mínimos cuadrados de la conicidad de las trozas a diferentes alturas independientemente del clon.

En la Tabla 5, se presentan los valores medios de módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) de las trozas agrupados por clon y altura dentro del árbol.

3. Análisis de la influencia del clon y de la altura en el árbol de la troza en las propiedades tecnológicas de los productos: tablero contrachapado y el LSL

La evaluaciones de los tableros contrachapados muestran diferencias entre los clones. Los resultados indican que tanto el MOE como el MOR son

Tabla 5. Valores medios de módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) para cada clon y altura dentro del árbol

Clon-Altura	N	Media N/mm ²	Error Std.	Mín.	Máx.
BEAUPRE 1	71	8005,7	102,0	7805,6	8205,7
BEAUPRE 2	75	9633,9	99,2	9439,3	9828,5
BEAUPRE 3	37	9523,1	141,3	9246,0	9800,2
BEAUPRE 4	83	9201,7	94,3	9016,7	9386,7
I-214 1	118	7444,5	79,1	7289,3	7599,6
I-214 2	109	8306,7	82,3	8145,3	8468,2
I-214 3	109	8118,0	82,3	7956,5	8279,4
I-214 4	115	8138,1	80,1	7980,9	8295,3
MC 1	72	8056,9	101,3	7858,2	8255,5
MC 2	87	8476,2	92,1	8295,5	8656,9
MC 3	58	9185,9	112,9	8964,6	9407,2
MC 4	84	8840,1	93,8	8656,2	9024,0
RASPALJE 1	111	8028,2	81,6	7868,2	8188,2
RASPALJE 2	98	8809,9	86,8	8639,6	8980,1
RASPALJE 3	97	8988,2	54,2	8881,8	9094,6
RASPALJE 4	99	8773,8	86,4	8604,4	8943,2
UNAL 1	50	7389,0	121,1	7150,6	7627,3
UNAL 2	34	7782,5	147,4	7493,5	8071,6
UNAL 4	46	7426,5	126,7	7178,0	7675,0

superiores en los clones Beaupre, Raspalje y MC respecto a los clones I-214 y Unal (Tabla 6).

En cuanto a la influencia de la altura en el árbol, en todos los casos, y especialmente para el MOE, los tableros fabricados con madera proveniente de la segunda y tercera troza presentan valores notablemente superiores (Tabla 7)

Para el producto LSL, los resultados de los ensayos también muestran

diferencias en MOE y MOR entre clones (Tabla 8). El clon Raspalje presentó los mayores valores de MOR (33 N/mm²) y MOE (10774 N/mm²) diferenciándose de manera significativa del clon Unal. Respecto a la densidad del producto apenas hay variación entre clones. La densidad media de toda la muestra fue de 637 kg/m³ sin diferencia entre clones debido a que en el proceso de fabricación del LSL se aplica la misma presión densificando las muestras de similar manera.

Tabla 6. Valores medios de módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOEL), módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOET), módulo de rotura longitudinal y transversal (MORL y MORT), resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T) y resistencia a tracción longitudinal (Ft) de tableros contrachapados fabricados con diferentes clones. Letras diferentes representan diferencias significativas.

Clon	MOE _L		MOR _L		MOE _T		MOR _T		Fc _L		Fc _T		Ft	
I-214	5988,6	a	33,1	a	2648,2	a	19,3	a	24,3	a	20,7	ab	18	a
UNAL	6053,3	a	35,6	a	2698,3	a	19,4	a	24,6	ab	19,9	a	18,8	a
RASPALJE	7241,4	b	41,3	b	3135,6	b	22,7	b	24,2	a	20,6	ab	14,7	a
MC	7295,7	b	41,3	b	3220,4	b	24	b	26,6	c	21,7	b	17,5	a
BEAUPRE	7159,9	b	42,9	b	3288,4	b	22,6	b	26,2	bc	21,8	b	19,9	a

Tabla 7. Valores medios por posición de la troza de módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOEL), módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOET), módulo de rotura longitudinal y transversal (MORL y MORT) y resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T). Letras diferentes representan diferencias significativas.

Troza	MOE _L		MOR _L		MOE _T		MOR _T		Fc _L		Fc _T	
1	5568,5	a	34,3	a	2444,9	a	18,6	a	23,6	a	19,8	a
2	7452,3	b	40,9	b	3238,3	a	22,7	b	25,8	b	21,5	b
3	7560,7	b	42,7	b	3464,4	c	24,5	c	26,1	b	22	b

Tabla 8 Valores medios de módulo de elasticidad en flexión (MOE), módulo de rotura (MOR) y densidad de LSL fabricado con diferentes clones. Letras diferentes representan diferencias significativas.

CLON	MOE (N/mm ²)	MOR (kN/mm ²)	Densidad (Kg/m ³)
UNAL	7770,2 a	25,6 a	657,5 a
BEAUPRE	9201,8 ab	27,5 ab	628,5 a
I-214	9849,2 ab	31,4 b	639,9 a
MC	10168,5 b	29,0 ab	628,2 a
RASPALJE	10774,5 b	33,1 b	649,5 a

4. Modelos de predicción del Módulo de elasticidad del tablero contrachapado a partir de las mediciones con métodos no destructivos en troza y chapa

Este apartado se ha realizado analizando la relación entre el valor de MOE dinámico estimado con sónicos sobre las trozas y chapas y el valor de MOE estático calculado sobre el tablero contrachapado realizado con madera

del mismo lote de trozas. Para ello, se calculan previamente los valores medios por parcela para un clon concreto y para cada altura de troza en el árbol. Las mejores correlaciones se obtuvieron con el MOE global obtenido según la norma UNE-EN 789:2006.

La relación observada entre el MOE dinámico de las trozas y chapas y el MOE estático de los productos tras el ensayo a flexión ha sido muy elevada y ha permitido

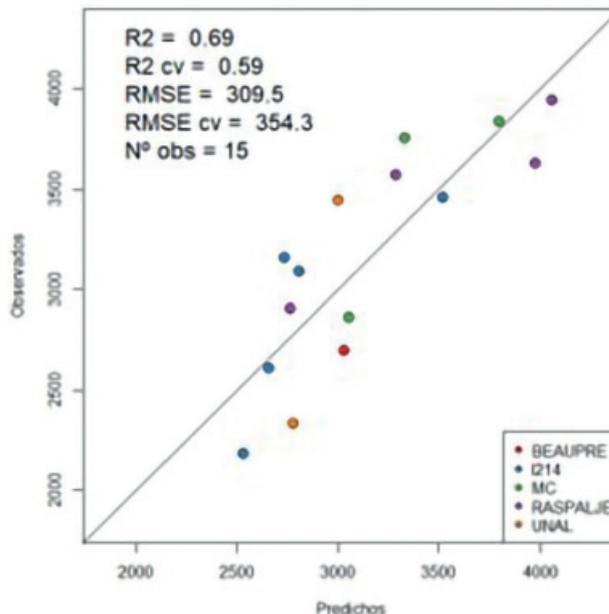
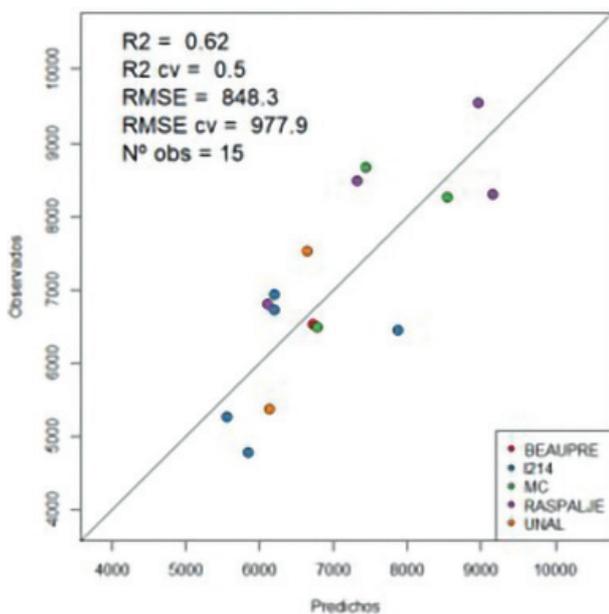


Figura 13 Observados Vs Predichos desde troza del MOEG longitudinal (izda) y transversal (derecha) (Norma UNE-EN 789:2006)

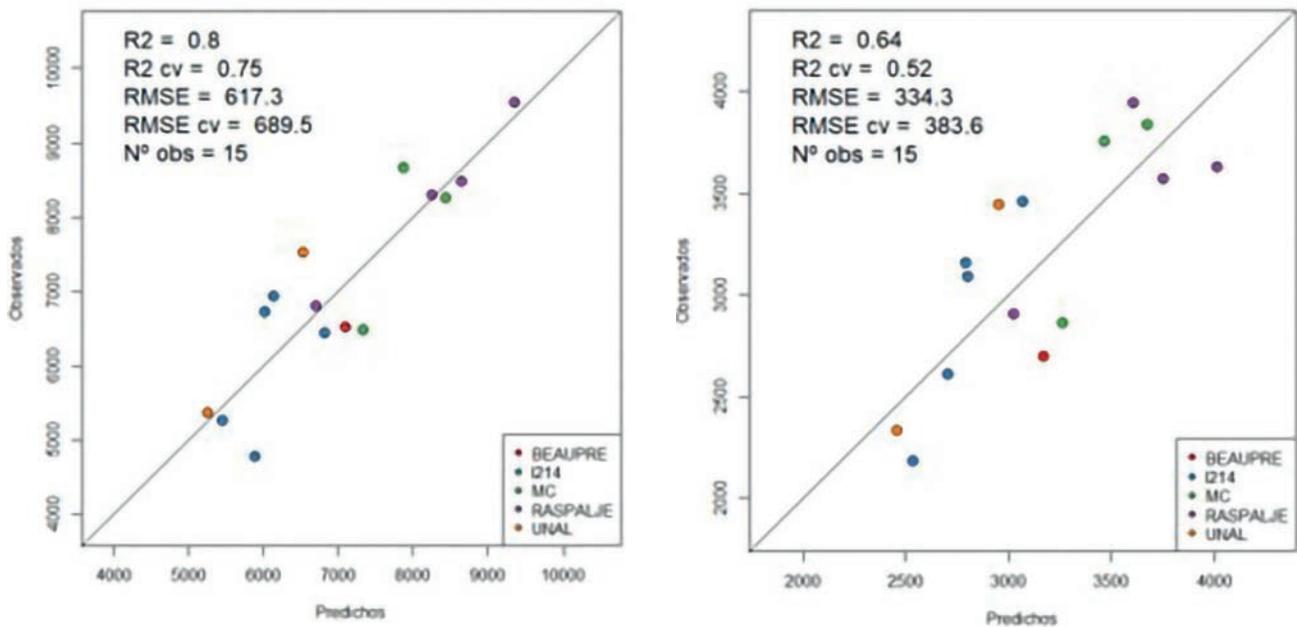


Figura 14. Observados Vs Predichos desde chapa del MOEG longitudinal (izda) y transversal (decha) (Norma UNE-EN 789:2006).

desarrollar modelos predictivos de la calidad final de los productos a partir de mediciones con métodos no destructivos en trozas y chapas. Las gráficas de observados/predichos de las regresiones realizadas para las trozas y las chapas se exponen a continuación (Fig. 13 y 14).

Conclusión

Los resultados han mostrado que el clon influye significativamente en la calidad tecnológica de los productos de madera. Además, se ha observado un aumento de las propiedades tecnológicas de la madera en altura a lo largo del tronco y se han obtenido correlaciones sólidas entre los diferentes niveles de medición (tronco, chapa y producto), lo que destaca el potencial significativo del uso de equipos sónicos para optimizar el abastecimiento de madera.

Con base a estos hallazgos, fue posible desarrollar un modelo de regresión utilizando datos medidos en madera en rollo y en chapa lo que permite una estimación razonablemente precisa del MOE del producto. La posibilidad de una

evaluación no destructiva ofrece una oportunidad para seleccionar madera en rollo y mejorar la calidad tecnológica de los productos finales, según los diferentes requisitos de uso final de una manera muy efectiva.

En base a los resultados obtenidos, se podría evaluar la posibilidad de fabricar tableros contrachapados de chopo con características estructurales haciendo una correcta selección del clon y clasificando las trozas por su posición en el tronco, ampliando la gama de productos.

Comparando la resistencia del contrachapado de *Pinus radiata* (6110 - 8819 N/mm²) y con otros contrachapados de chopo (4865,4 - 8666 N/mm²), se obtuvieron resistencias similares, demostrando la capacidad estructural y competitiva del contrachapado de chopo frente a otros tipos de contrachapados.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los técnicos del laboratorio de Cesefor: Juan Carlos Rubio, Álvaro Sánchez, Cristian Ribas, Nacho Monforte y Pablo Blanco. Su dedicación, conocimiento y esfuerzo han sido fundamentales para el desarrollo de este capítulo.

Bibliografía

Balasso, M., Hunt, M., Jacobs, A., & O'reilly-Wapstra, J. (2021). Development of non-destructive-testing based selection and grading strategies for plantation eucalyptus nitens sawn boards. *Forests*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/f12030343>

Gallego, A., Ripoll, M. A., Timbolmas, C., Rescalvo, F., Suarez, E., Valverde, I., Rodríguez, M., Navarro, F. B. y Merlo, E. (2021) Modulus of elasticity of I-214 young poplar wood from standing trees to sawn timber: influence of the age and stand density. *Eur. J. Wood Prod.* 79, 1225-1239. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01675-5>

Huda, A. S. M. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., & Fortin, Y. (2014). Variation of the Physical and Mechanical Properties of Hybrid Poplar Clones. *BioResources*, 9(1). <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1456-1471>

Jiang, Z. H., Wang, X. Q., Fei, B. H., Ren, H. Q., & Liu, X. E. (2007). Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohei*. *Annals of Forest Science*, 64(8). <https://doi.org/10.1051/forest:2007063>

Madhoushi, M., & Daneshvar, S. (2016). Predicting the static modulus of elasticity in eastern cottonwood (*Populus deltoides*) using stress wave non-destructive testing in standing trees.

European Journal of Wood and Wood Products, 74(6). <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1043-0>

Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Bernardi, B., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022). The Predictive Accuracy of Modulus of Elasticity (MOE) in the Wood of Standing Trees and Logs. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081273>

Rescalvo FJ, Ripoll MA, Gallego A, Abarkane C, Rodríguez M, Merlo E. (2020). Propiedades mecánicas de la madera de chopo. ISBN: 978-84-09-21107-4. Grupo IDIE-Universidad de Granada.

Wang, X. (2013). Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis. In *Wood Science and Technology* (Vol. 47, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>

Yu, Q., Zhang, S. Y., Pliura, A., MacKay, J., Bousquet, J., & Périnet, P. (2008). Variation in mechanical properties of selected young poplar hybrid crosses. *Forest Science*, 54(3). <https://doi.org/10.1093/forestscience/54.3.255>

Zhang, S. Y., Chauret, G., Ren, H. Q., & Desjardins, R. (2002). Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood and Fiber Science*, 34(3).

Zhao Rongjun¹, Yao Chunli², Cheng Xianbao¹, Lu Jianxiong¹, Fei Benhua³ and Wang Yurong. 2014. Anatomical, chemical and mechanical properties of fast-growing *Populus × euramericana* v. '74/76',* *IAWA Journal* 35 (2), 158-169 *IAWA Journal* 35 (2), International Association of Wood Anatomists, DOI 10.1163/22941932-00000057

Zobel BJ, Buijtenen JP (1989) Wood variation-its cause and control. Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo

CAPÍTULO 6

Nuevas herramientas para la certificación y promoción del cultivo del chopo.



Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal

Sistema de certificación simplificada

- Marco de Gestión Forestal Sostenible
- Referente Selvícola
- Documento de Adhesión

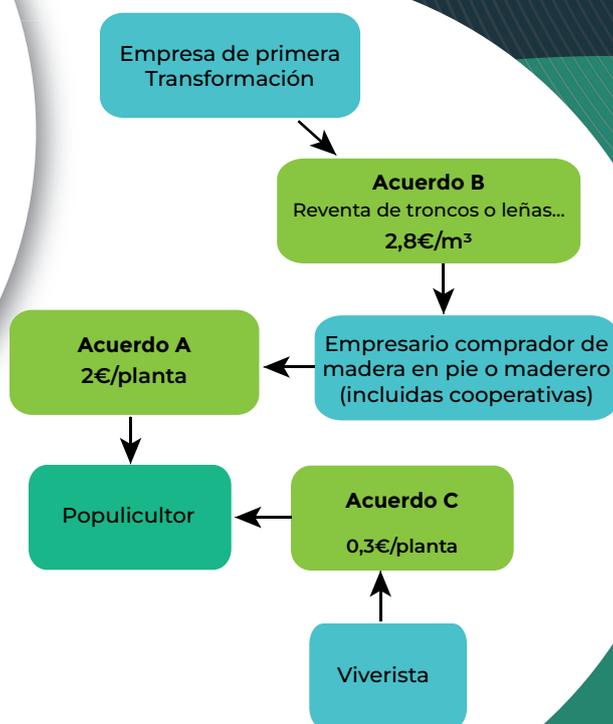
Beneficios del sistema de certificación simplificada

- Planificación sencilla
- Cumplimiento normativo
- Certificación PEFC
- Mejora de la competitividad



Convenio "gracias al Chopo"

- Fomentar la replantación de choperas tras la cosecha
- Perpetuar el recurso de los chopos en pie
- Desarrollar el uso de la madera certificada PEFC o FSC, desde el populicultor hasta el consumidor.



Marta Salvador del Pozo
Eva Martínez Garcés
PEFC España
Ignacio García Hernández
AEFCO
Elena Blanco Lago
Fundación Cesefor
Oscar Crespo Pinillos
Sergio Souto Suárez
Grupo Garnica Plywood SA
Joaquín Garnica López
Bosques y Ríos SL

Luis Ignacio Rojo,
Dir. Gral. de Patrimonio Natural y Política Forestal.
Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio. Junta de Castilla y León
Olga González Raposo
FAFCYLE
Miguel García Romero
ASFOLE
Raquel Tobar León
Área de Gestión Forestal y Proyectos Gobierno de Navarra

6. NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA CERTIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DEL CULTIVO DEL CHOPO.

Introducción

La gestión forestal sostenible constituye un elemento clave para garantizar la sostenibilidad ambiental, social y económica de los recursos forestales. En Castilla y León, una de las regiones más ricas en biodiversidad y superficie forestal de España, la gestión de las choperas de producción se ha convertido en una prioridad estratégica. Estas plantaciones, distribuidas principalmente en áreas ribereñas, son una fuente esencial de recursos madereros y desempeñan un papel crucial en la industria local del contrachapado. Sin embargo, su manejo enfrenta múltiples desafíos, desde el descenso en la superficie plantada hasta la necesidad de optimizar la calidad de la madera y fomentar prácticas sostenibles.

En el marco del GO BIOPOPTECH se han desarrollado nuevas herramientas para la certificación de choperas de pequeña superficie en Castilla y León. Este esfuerzo se materializa en un paquete documental diseñado para simplificar los procesos de certificación bajo el Sistema PEFC. En paralelo, se ha trabajado en la iniciativa “Gracias al Chopo,” inspirada en el modelo francés “Merci le Peuplier,” que pretende impulsar la replantación de choperas tras la cosecha, a través de la colaboración directa entre populicultores, viveristas y la industria. Ambas estrategias se complementan al fomentar la certificación, garantizando prácticas sostenibles a lo largo de toda la cadena de valor y respondiendo a la creciente demanda de productos madereros certificados en los mercados nacionales e internacionales.

Certificación de choperas de pequeña superficie

El GO BIOPOPTECH planteaba entre sus objetivos simplificar la planificación de choperas de pequeña superficie, garantizando su certificación conforme a los requisitos de la Norma UNE 162.002 de Gestión Forestal Sostenible. Para ello, se ha desarrollado un paquete documental que incluye, el Marco de Gestión Forestal Sostenible de Castilla y León, el Referente Selvícola de Choperas y el Documento de Adhesión al Referente Selvícola. Este enfoque integral busca simplificar los procesos para los propietarios y gestores, asegurando su cumplimiento normativo y facilitando su certificación bajo el Sistema PEFC.

La creación de estos tres documentos responde a la necesidad de contar con un marco integral que no solo facilite la gestión de las choperas, sino que también unifique criterios y procedimientos para su certificación, todo ello alineado con el futuro “Decreto de Planificación Simplificada de Castilla y León”.

Este enfoque permite un cumplimiento ágil y efectivo de los requisitos legales, promoviendo una gestión forestal multifuncional que abarque la sostenibilidad ambiental, la productividad económica y el beneficio social.

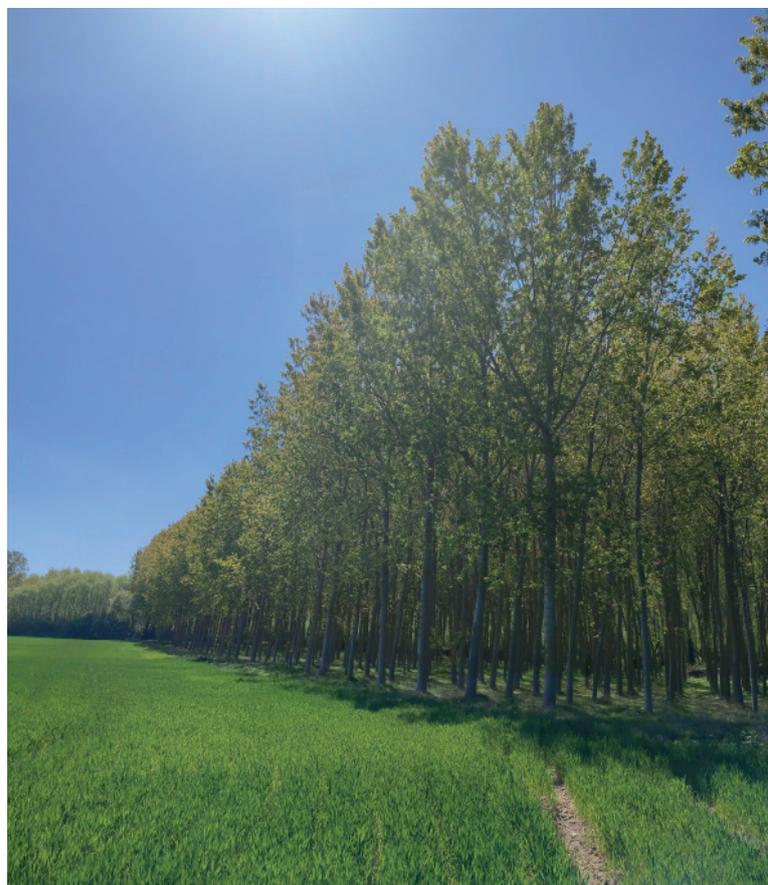
Metodología

En la definición del contenido y composición del paquete documental se aplicaron los últimos avances en planificación forestal simplificada a nivel nacional. Para ello, se analizó diferente documentación legal y de instrumentos de planificación desarrollada por diferentes comunidades autónomas, con especial atención a los itinerarios selvícolas creados por la Xunta de Galicia, la Junta de Andalucía, el Principado de Asturias y la documentación proporcionada por el Gobierno de Navarra.

Asimismo, la colaboración con el gobierno de Castilla y León resultó fundamental, ya que permitió acceder al último borrador del “Decreto de Planificación Simplificada” y al “Referente Selvícola de Choperas”.

Este análisis llevó a la conclusión de que era esencial contar con un paquete documental específico compuesto por:

- Marco de Gestión Forestal Sostenible de Castilla y León: documento general de planificación de carácter autonómico.
- Referente Selvícola de Choperas: itinerario con las pautas de gestión para choperas de pequeño tamaño.
- Documento de Adhesión al Referente Selvícola de Choperas: formulario para que los propietarios formalicen su compromiso con el cumplimiento del “Referente Selvícola de Choperas”





Jornada de Divulgación realizada en Nájera

Proceso de Elaboración

1. Marco de Gestión Forestal Sostenible de Castilla y León

La elaboración de este marco comenzó con una serie de reuniones de consenso en las que se definieron los principios clave que lo guiarían. Se buscó un enfoque multifuncional que abordara la dimensión ambiental, económica y social de la gestión forestal.

El proceso continuó con una revisión integral de la normativa estatal y autonómica aplicable, recopilando datos ambientales, sociales y económicos. Esta información fue utilizada para redactar secciones que reflejaran la realidad de Castilla y León y proporcionaran pautas claras para la gestión forestal sostenible.

El documento destaca la relevancia de las choperas de producción en Castilla y León, una región que abarca una amplia diversidad geográfica y ecológica. La superficie forestal de la comunidad representa el 54,5 % de su territorio. Dentro de este marco, las choperas de producción ocupan un papel importante, especialmente en provincias como León, que concentra casi el 47 % de su superficie total. Estas plantaciones se sitúan mayoritariamente en áreas cercanas a los ríos, como el Órbigo, el Sil y el Esla. Aunque las choperas representan una fracción relativamente pequeña de la superficie forestal total, su valor económico y ambiental es significativo,

especialmente en la industria del contrachapado.

El marco legal es otro de los pilares clave del documento. Se detalla cómo la normativa estatal y autonómica regula los usos forestales, la clasificación de montes públicos y privados, y las restricciones relacionadas con los espacios protegidos. Castilla y León cuenta con una amplia red de áreas naturales protegidas, que incluyen parques nacionales, reservas naturales y zonas de la Red Natura 2000. Estas designaciones subrayan la importancia de la biodiversidad de Castilla y León y su contribución a los objetivos de conservación europeos. En este sentido, el documento también aborda las reservas de la biosfera reconocidas por la UNESCO, que en Castilla y León suman diez, destacando áreas como los Ancares Leoneses y la Sierra de Béjar y Francia.

Otro aspecto relevante es la gestión de riesgos, particularmente los relacionados con plagas, enfermedades y daños abióticos en las choperas. El documento identifica una serie de plagas, como los perforadores y defoliadores, que afectan la calidad de la madera y la salud de los árboles. También se describen enfermedades causadas por hongos y bacterias, que pueden tener un impacto económico significativo si no se gestionan adecuadamente. Además, se mencionan los daños abióticos, como heladas, granizo, viento y sequías, que



Jornada de Divulgación realizada en Nájera

son comunes en la región debido a sus características climáticas. Para mitigar estos riesgos, se destacan la selección adecuada de clones resistentes y las prácticas de manejo sostenible.

La prevención de incendios forestales también recibe una atención especial, dado que Castilla y León cuenta con zonas clasificadas como de alto riesgo. Estas áreas están sujetas a restricciones durante la época de mayor peligro, que generalmente abarca los meses de julio a septiembre. El documento señala que las actividades como el uso de fuego, la quema de residuos agrícolas y el empleo de maquinaria que pueda generar chispas están estrictamente reguladas para minimizar el riesgo de incendios. Además, se subraya la importancia de la sensibilización y la vigilancia en estas zonas críticas.

En cuanto al aspecto socioeconómico, el documento examina el impacto de la actividad forestal en la economía y el empleo regional. Castilla y León, con una población de alrededor de 2,4 millones de habitantes, enfrenta desafíos demográficos significativos, como la despoblación rural. Sin embargo, el sector forestal representa una oportunidad clave para generar empleo y dinamizar las áreas rurales. Se destacan actividades relacionadas con la producción maderera, la caza y la recolección de setas, que son particularmente relevantes en términos de productos no madereros. La normativa específica, como el Decreto 31/2017 para la regulación de la recolección micológica,

busca equilibrar la explotación de estos recursos con la conservación del medio ambiente.

En resumen, el documento proporciona un marco detallado y exhaustivo para la gestión sostenible de las choperas de producción en Castilla y León, integrando aspectos ambientales, legales, económicos y sociales. Su enfoque busca garantizar la sostenibilidad de los recursos forestales, promoviendo al mismo tiempo su valor económico y su papel en la conservación de la biodiversidad. Este marco no solo facilita la certificación forestal, sino que también aborda de manera integral las necesidades y desafíos del sector, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región. Se puede acceder al documento completo en el siguiente enlace: <https://pfcyl.es/lista/gfs-documentos>.

2. Referente Selvícola de Choperas

Con el objetivo de ofrecer una herramienta sencilla y efectiva para propietarios de choperas de pequeña superficie, se definió una estructura basada en los modelos en uso de Galicia, Asturias y Andalucía.

El referente fue adaptado para cumplir con los requisitos del borrador del “Decreto de Planificación Simplificada” de Castilla y León mediante una revisión exhaustiva y propuestas de modificación al texto facilitado por la Junta. Este proceso colaborativo permitió un enriquecedor intercambio de conocimientos entre los actores clave, asegurando que el Referente Selvícola del GO BIOPOPTECH estuviera plenamente alineado con el futuro marco normativo regional, garantizando así su aplicabilidad y cumplimiento de las directrices legales desde su entrada en vigor.

De este modo, el referente selvícola establece directrices claras para la gestión sostenible de choperas, con el fin de garantizar la producción de madera de calidad y el cumplimiento de los principios de sostenibilidad.



SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

FONDO ESPAÑOL
DE GARANTÍA AGRARIA O.A.



REFERENTE SELVÍCOLA

CÓDIGO: Ch1	
Especie principal	<i>Populus x euroamericana</i> o <i>Populus x interamericana</i> o cualquier clon autorizado en la UE
Formación Objetivo	Chopera procedente de repoblación
Objetivo de gestión:	Producción madera
Turno/edad de madurez:	Turno 10 a 20 años, siendo el turno habitual de aproximadamente 15 años
Ámbito aplicación:	Chopera procedente de repoblación

MATERIAL DE PLANTACIÓN
<p>Material en plantones de 1 o 2 savias, excepcionalmente de 3 savias, de 4 a 7 m, a plantar a raíz profunda y de 2 a 4 m para su plantación en raíz superficial.</p> <p>Las plantas utilizadas han de proceder de un vivero certificado y disponer de pasaporte fitosanitario.</p> <p>Se han de emplear variedades o clones de chopo autorizados en el catálogo nacional de materiales de base a nivel nacional o de otros países dentro de la Unión Europea.</p> <p>Se recomienda evitar masas continuas monoclonales, superiores a 2 o 3 hectáreas, por lo que en superficies de mayor tamaño es aconsejable plantar diversos clones para que actúen de barrera natural contra plagas y enfermedades.</p>

MARCO Y DENSIDAD DE PLANTACIÓN
<p>Previamente son necesarias (en su caso) las labores de destocoado, nivelación y señalamiento.</p> <p>El marco de plantación más utilizado es 6x6 metros (278 pies/ha), aunque marcos de plantación más amplios son también adecuados en situaciones concretas o para el establecimiento de sistemas agroforestales con cultivos intercalares. No se recomiendan en ningún caso marcos de plantación inferiores a 5 x 5 m.</p> <p>La técnica habitual de plantación es a raíz profunda utilizando para ello plantones de 2 años.</p> <p>Ahoyado mediante retroexcavadora o tractor, con aperos como cazo, pica, barrena helicoidal o rejón.</p> <p>La técnica habitual de plantación es a raíz profunda. La profundidad de plantación oscilará entre 1 m y 4 metros dependiendo de la profundidad del nivel freático y el sistema de plantación elegido (raíz superficial vs raíz profunda). La plantación ha de realizarse fuera del periodo vegetativo ya que se trata de una plantación a raíz desnuda.</p> <p>La reposición de marras sólo se aconseja en caso de un porcentaje elevado, a realizar durante el primer año de la plantación.</p>



SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

FONDO ESPAÑOL
DE GARANTÍA AGRARIA O.A.

TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS INTERMEDIOS	
Gradeos	<p>En los primeros años se realizan, en su caso, gradeos cruzados anuales, con el fin de liberar al chopo de la competencia de la vegetación herbácea y de aumentar la permeabilidad del suelo.</p> <p>En los años posteriores se realizan, en su caso, gradeos simples para evitar riesgos de incendios.</p>
Riego	<p>Cuando la plantación se ha realizado sin alcanzar la capa freática (a raíz superficial), los riegos son necesarios. Dependiendo de la edad de los chopos, se necesitan entre 2.000 y 4.500 m³/ha/año. Si la parcela está nivelada se puede regar a manta. De lo contrario, será necesario preparar todos los años caballones después de realizar los gradeos y contar con la presencia de un operario que se ocupe de la distribución del agua. Son preferibles riegos más abundantes y espaciados, cada semana o 15 días, para que el agua se infiltre en profundidad y las raíces no se desarrollen sólo cerca de la superficie.</p>
Podas	<p>Se deberán realizar podas de formación y de conformación para obtener madera de calidad, recta y libre de nudos. Se recomienda que el espaciamiento de las podas no supere los 2 años.</p> <p>Podas de formación o de guía: hasta 12 m para facilitar el desarrollo de la guía terminal del árbol, conseguir un fuste recto y evitar las horquillas. Se recomienda que se realicen, al menos, 2 podas de formación durante los primeros 5 años.</p> <p>Podas de conformación o de limpieza del fuste: tiene el objetivo de obtener un fuste limpio libre de nudos en los 6 primeros metros y no sobrepasar la altura de 10 m en los chopos de mayores crecimientos. La periodicidad debe ser suficiente para que las ramas no superen los 6 cm de para lograr una buena cicatrización. En casa intervención se deberá dejar 2/3 de copa viva.</p>
Claras	No aplica.
CORTA FINAL DE REGENERACIÓN	
Corta a hecho seguida de replantación.	

Como documento de apoyo para un mejor conocimiento de la selvicultura de la chopera se aconseja consultar la publicación de la Junta de Castilla y León, "Cultivo de chopos en Castilla y León".

Entre la información disponible en la citada publicación, destacamos la siguiente tabla que ofrece algunos resultados de producción del clon '1-214', según la calidad de la chopera a marco de 6x6 metros.



SECRETARÍA GENERAL
DE AGRICULTURA
Y ALIMENTACIÓN

FONDO ESPAÑOL
DE GARANTÍA AGRARIA O.A.

Calidad	Turno (años)	Diámetro medio (cm)	Altura media (m)	Volumen medio (m ³)	Producción (m ³ /ha)	Productividad (m ³ /ha/año)
I	14	42,9	31,8	1,774	493	35,2
II	15	39,5	29,3	1,380	383	25,6
III	16	35,1	26,0	0,971	270	16,8
IV	18	32,2	23,9	0,751	209	11,6
V	18	28,0	20,8	0,496	138	7,7

BIBLIOGRAFIA

- Rueda J., García Caballero J.L., Cuevas Y., García-Jiménez C., Villar C. (2019) Cultivo de chopos en Castilla y León. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid. 116 pp.



3. Documento de Adhesión al Referente Selvícola de Choperas

Para completar el paquete documental, se creó un formulario que permite a los propietarios formalizar su compromiso con el cumplimiento del Referente Selvícola de Choperas. En la misma solicitud se incluye la adhesión al Certificado Regional de Castilla y León bajo el Sistema PEFC. En este documento los propietarios se comprometen también a cumplir con los requisitos de certificación en consonancia con la normativa UNE 162.002 de Gestión Forestal Sostenible y el Sistema PEFC. La solicitud de adhesión está disponible en <https://pfcyl.es/lista/gfs-documentos>

Beneficios del sistema de certificación simplificada

El paquete documental, compuesto por el Marco de Gestión Forestal Sostenible, el Referente Selvícola y el Documento de Adhesión, ofrece un marco integral para planificar y certificar la gestión sostenible de las choperas de pequeña superficie.

Sus principales beneficios incluyen:

- **Planificación sencilla:** proporciona a los propietarios de choperas de pequeña superficie una guía clara y concisa para su gestión.
- **Cumplimiento normativo:** los documentos están alineados con el futuro Decreto de Planificación de Castilla y León y su Referente Selvícola, asegurando que las plantaciones cumplan con los estándares legales.
- **Certificación PEFC:** permite la adhesión al Certificado Regional PEFC gestionado por la Mesa Intersectorial de la Madera de Castilla y León (MIMCYL), promoviendo la gestión forestal sostenible y aportando valor añadido a los productos madereros
- **Mejora de la competitividad:** la certificación ayuda a que los productos derivados del chopo sean más competitivos en el mercado nacional e internacional, respondiendo a la creciente demanda de productos sostenibles.

“Gracias Chopo”, iniciativa para fomentar la replantación de choperas.



Convenio “*gracias al Chopo*”

“Gracias al chopo” es una iniciativa basada en Merci le Peuplier, iniciativa que, a finales de 2011, lanzaron los empresarios franceses, las empresas de la región Países del Loira y otras regiones limítrofes, con la colaboración de PEFC Oeste. El objetivo principal fue promover la replantación de chopos tras la cosecha, ofreciendo una ayuda financiera directa a los propietarios forestales. Tras unos primeros resultados muy alentadores, se transfirió la iniciativa al Consejo Nacional del Chopo de Francia para que pudieran adherirse todos los populicultores y empresas francesas. Este mecanismo de promoción ha facilitado la plantación de más de 5.400 hectáreas de chopos en una década, demostrando el compromiso de la industria en revitalizar el cultivo del chopo en Francia.

Ahora, a través del proyecto GO BIOPOPTECH la iniciativa se implanta en España.

Gracias al Chopo está destinado a:

- Maderistas (comerciantes de madera),

- Empresarios de 1ª transformación del chopo (tableros contrachapados, envases, elementos de distribución, revestimientos, listones, palés...),
- Viveristas.

Los principales objetivos son:

- Fomentar la replantación de choperas tras la cosecha.
- Perpetuar el recurso de los chopos en pie.
- Desarrollar el uso de la madera certificada PEFC o FSC, desde el populicultor hasta el consumidor.

En la práctica, la replantación la promueven los miembros de “Gracias al Chopo”, con una participación financiera en la replantación que se añade al precio de la madera. Por lo tanto, “Gracias al Chopo” no es una ayuda en el sentido común del término, sino que se trata de una participación financiera directa de las empresas en la inversión de los populicultores.



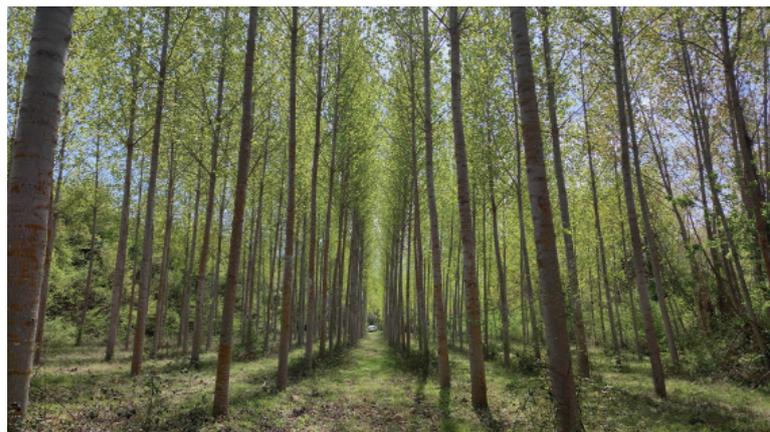
Pueden participar en la iniciativa todos los comerciantes, empresarios y viveristas que explotan o plantan chopos en territorio español (en el caso de plantación siempre que el gestor sea privado). La empresa (excepto los viveristas) debe contar con una certificación de Cadena de Custodia PEFC o FSC en vigor. Las plantaciones deben contar con la certificación PEFC o FSC.

¿Cómo funciona Gracias al Chopo?

El compromiso entre populicultores y empresas y entre empresas se formaliza mediante distintos acuerdos según el tipo de acto comercial:

- Entre compradores de madera en pie y populicultores: el acuerdo se llama «Contribución a la recuperación de las plantaciones de chopos», también denominado acuerdo A.
- Entre comerciantes (maderistas) y empresarios, el acuerdo se llama «Contribución a la sostenibilidad del suministro de chopo», también denominado acuerdo B.
- Entre viveristas y propietarios, el acuerdo se llama «Contribución a la compra de plantas de chopo», también denominado acuerdo C.

Se ha desarrollado un sistema informático, basado en el sistema francés,



en el que se introducen todos los datos de las empresas adheridas, el número de chopos cortados que se van a replantar y la financiación para esa replantación (Gráfico 1).

¿Por qué se exige la certificación PEFC o FSC?

Existen dos motivos principales:

- En un contexto en el que aumenta la necesidad de madera certificada, la iniciativa “Gracias al Chopo” fomenta el desarrollo de la certificación.
- La iniciativa “Gracias al Chopo” insta a reforestar con la intención de lograr una gestión sostenible. Con la certificación del propietario, se dispone de garantías adicionales para que el populicultor aplique prácticas respetuosas de gestión forestal sostenible.

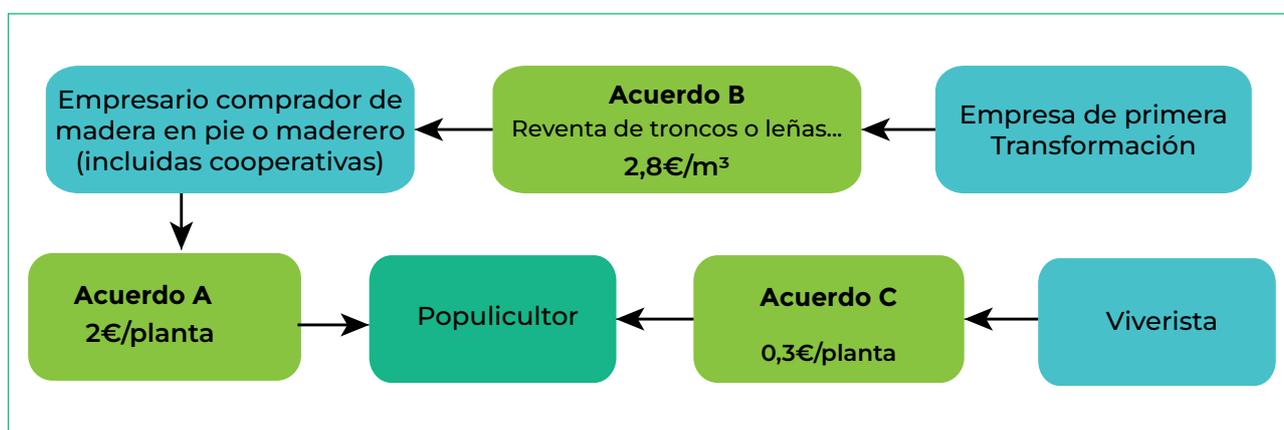


Gráfico 1. Diagrama de funcionamiento de la iniciativa “Gracias al Chopo”

¿En qué momento puede firmar el propietario el convenio “Gracias al Chopo”?

Normalmente el convenio se firma en el momento de compra de la madera. No obstante, la firma se puede realizar posteriormente siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que el albarán de venta indique el número de PEFC o FSC del propietario,
- Que los chopos se encuentren aún plantados en el momento de la firma,
- Que el comprador esté informado en el momento de realizar la compra.

En el caso de ventas de madera agrupadas, si el propietario desea beneficiarse del convenio Gracias al Chopo, debe indicar en las cláusulas particulares de su lote una mención similar a la siguiente: “El comprador licitante deberá ser firmante del convenio Gracias al Chopo”. La empresa licitante y miembro de Gracias al Chopo realiza su oferta de compra, sin cambiar los procedimientos habituales.



¿Quién introduce los acuerdos suscritos en el sistema informático?

La introducción de datos se debe realizar al menos una vez al trimestre. Para evitar duplicidades se procede del siguiente modo:

- Acuerdos entre comprador y populicultor (acuerdo A): Como norma general, la introducción la realiza el comprador con respecto al propietario (maderero/comerciante, o el empresario que adquiere directamente la madera en pie).
- Acuerdos entre empresas (compra-venta de troncos o partes de troncos, acuerdo B): Por lo general, es el empresario quien realiza la introducción. En el caso de intercambios entre dos madereros o dos empresarios, el comprador es quien se encarga de la introducción. La unidad a utilizar es siempre el m³ (en el caso de cantidades expresadas en toneladas, se deben convertir a m³).
- Acuerdos de viveristas o empresa de obras - populicultor (acuerdo C): La introducción la realiza el viverista, incluso cuando haya una empresa de obras que realice la plantación.

En el caso de las empresas que hacen la replantación, que compran directamente plantas en grandes cantidades:

1. si el viverista dispone de la identidad del propietario beneficiario y los demás datos necesarios para el establecimiento de un acuerdo C: aplica la reducción e introduce el acuerdo C

2. si la empresa que hace la replantación aplica ella misma la reducción de los 30 céntimos, se encarga de introducir el acuerdo C.

Desarrollo de la iniciativa en el marco del GO BIOPOPTECH

El primer paso fue elaborar una base de datos de todos los agentes implicados, tanto propietarios de choperas como asociaciones de propietarios, rematantes, industria usuaria del chopo como materia prima, explotadores forestales y viveros, que podrían participar en la iniciativa una vez ésta esté implantada.

Identificados los agentes implicados, se dio a conocer la iniciativa a las asociaciones de propietarios. Se mantuvieron reuniones con las

asociaciones que engloban a la mayoría de productores de chopo de España. La industria es conocedora de la iniciativa ya que es la impulsora de la misma.

La iniciativa “Gracias al Chopo” se rige por un programa informático al que tienen acceso las partes implicadas y en el cual se introducen los datos de las cortas, se controlan las replantaciones y los saldos a pagar a los populicultores cuando replantan. Este programa informático está basado en el francés de “Merci le Pueplier” que se ha adaptado para España. Para hacerlo, se tradujo al español el sistema informático francés, se identificaron aquellas áreas que necesitaban adaptación a la realidad española y se desarrollaron los convenios entre las distintas partes implicadas (populicultores, rematantes, viveros e industria) que permiten el correcto funcionamiento de la iniciativa. El sistema informático está ya online y se puede acceder a él en www.graciasalchopo.org

Para adherirse, la empresa puede:

- firmar el documento de compromiso que se incluye en el anexo del convenio general,
- o inscribirse previamente a través del sitio web www.graciasalchopo.org administrado por AEFCON y el Consejo Nacional del Chopo (Francia).

Se reconoce oficialmente que la empresa es firmante del convenio cuando su nombre aparece en el sitio web www.graciasalchopo.org.



SOCIOS



MIEMBROS SUBCONTRATADOS | COLABORADORES



El GO BIOPOPTECH: Promoción del cultivo del chopo y uso en cascada de su madera hacia productos tecnológicos de alto valor añadido, busca el desarrollo de la cadena de valor asociada a la plantación y aprovechamiento de choperas.

Comisión Europea: : https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/rural-development_es.

El grupo operativo GO-BIOPOPTECH ha recibido para su proyecto de innovación una subvención de 596.571,75. El importe del proyecto es cofinanciado al 100% con fondos procedentes del Instrumento de Recuperación Europeo (EU Next Generation), tal como se establece en el Real Decreto 169/2018, de 23 de marzo.

El organismo responsable del contenido es el GO-BIOPOPTECH

La Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) es la autoridad de gestión encargada de la aplicación de la ayuda del FEADER.
«Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: Europa invierte en las zonas rurales»

