

LA MADERA: CONCEPTOS CLAVE PARA SU IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA

EDITORA

Paloma Torroba Balmori

AUTORES

Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco

María Conde García

José Antonio Cabezas Martínez

Mariola Sánchez González

María Brígida Fernández de Simón

María Dolores Vélez Tebar

María Teresa Cervera Goy



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

INIA

Instituto Nacional de Investigación
y Tecnología Agraria y Alimentaria

LA MADERA: CONCEPTOS CLAVE PARA SU IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA



VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN





Aviso legal: Los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados citando la fuente, y la fecha, en su caso, de la última actualización.

Entidad colaboradora:

Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC)

Edita:

©: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Madrid 2020

www.miteco.gob.es

Plaza de San Juan de la Cruz s/n

28003 Madrid

ESPAÑA

NIPO: 665-21-023-5

ISBN: 978-84-18508-69-1

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

LA MADERA: CONCEPTOS CLAVE PARA SU IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA

Editora: Paloma Torroba Balmori

Autores: Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco, María Conde García, Jose Antonio Cabezas Martínez, Mariola Sánchez Gonzalez, Maria Brígida Fernandez de Simón, María Dolores Vélez Tebar y Maria Teresa Cervera Goy.



Índice

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA MADERA	9
2.1. Concepto de madera	9
2.2. Partes del xilema y su estructura celular	10
2.3. Diferencias anatómicas entre la madera de coníferas y de frondosas	14
3. PROPIEDADES Y USOS DE LA MADERA: GRUPOS TECNOLÓGICOS	19
3.1. Características de la madera como material	19
3.2. Grupos tecnológicos	20
4. PRODUCTOS DERIVADOS DE LA MADERA	21
4.1. Productos sin elaborar o poco elaborados	21
4.2. Productos elaborados	23
5. IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA DE LA MADERA	25
5.1. Análisis macroscópico previo	26
5.2. Técnica anatómica	27
5.3. Técnica genética	29
5.4. Técnicas espectrométricas (SVS)	32
5.5. Técnica de espectrometría de masas (DART-TOFMS)	34
5.6. Técnica isotópica	35
6. BIBLIOGRAFÍA	39
6.1. Bibliografía citada	39
6.2. Bibliografía y otras fuentes de información adicional recomendadas	39

1 Introducción

El consumo de madera en el mundo, con su correspondiente mercado internacional asociado, incluye diferentes productos como madera en rollo, madera aserrada, tableros (de diversos tipos), papel (en diversas presentaciones), madera para usos energéticos (leñas, pellets y briquetas), o bien muebles, elementos de carpintería (puertas, ventanas, parkés, etc.), productos destinados a estructuras o componentes secundarios para las construcciones, etc. Por poner en contexto la relevancia mundial de este material, de acuerdo con datos publicados por la FAO para el 2019, en el mundo se consumen aproximadamente 3900 millones de metros cúbicos de madera en rollo. Además, excepcionalmente, la madera también puede ser detectada en productos y aplicaciones bajo una apariencia muy diferente a la que estamos acostumbrados a ver. La ciencia nos cita su presencia en aplicaciones tan extrañas como vidrios, pilas de combustible, implantes óseos, etc.

Aunque el número de especies madereras de potencial interés puede resultar elevado, en la práctica el número de especies sometidas a la presión del mercado internacional suele ser bastante reducido, en torno al centenar. El mercado ejerce una presión selectiva sobre determinadas maderas en base a su estética (es decir, por sus usos decorativos), a sus propiedades físico-químicas y mecánicas, o en base a la facilidad para acceder a este recurso o a su mecanización. Por ejemplo, el interés sobre la madera como material de decoración ha sido relativamente constante a lo largo del tiempo y del espacio, variando tan solo su forma de presentación y las especies seleccionadas. Sin embargo, su uso como material de construcción está actualmente creciendo en los países más desarrollados de la mano de las regulaciones medioambientales, ya que la madera es el único material de construcción que aporta créditos de carbono al proceso constructivo, ayudando a reducir la huella ecológica de dichos procesos.

En cuanto al acceso a este recurso, los árboles pertenecientes a especies madereras (como cualquier otro ser vivo) necesitan unas condiciones determinadas para vivir, por lo que no se pueden encontrar de forma natural (o incluso como plantación) en todos los lugares del mundo. Por otra parte, las características de las maderas que producen los árboles dependen no solo de la genética de cada especie sino, también, de las condiciones climáticas, edáficas y hasta selvícolas en las que crecen. Todo ello hace que determinados orígenes de ciertas especies

productoras de maderas sean preferibles a otros, lo que concentra la presión del mercado sobre determinadas zonas geográficas. Con estos antecedentes, se entiende fácilmente que el incremento en el uso de este material natural pueda llegar a ejercer una enorme presión sobre los territorios productores, especialmente donde se encuentran las especies más demandadas.

Cuando una especie maderera o una procedencia altamente apreciada se da en zonas geográficas donde el control sobre la gestión forestal es laxo o inexistente, es altamente probable que se produzcan talas indiscriminadas y aprovechamientos no sostenibles de dichas especies. Entendemos por **tala ilegal** aquella que se produce contraviniendo las leyes del país donde se realiza el aprovechamiento de madera. Además, la madera ilegal puede estar también asociada a otros procesos (como procesado, transporte y compra-venta) que no cumplen con las leyes nacionales e internacionales. Esta actividad está considerada un crimen ambiental y supone alrededor del 30% del comercio global de madera anual, con un valor estimado de entre 51 y 152 mil millones de dólares estadounidenses al año. Estas actividades pueden poner en peligro las poblaciones naturales de dichas especies, además de generar importantes problemas de deforestación, con graves consecuencias para los bosques y para las comunidades que dependen de ellos.

Entre las **consecuencias económicas**, el Banco Mundial estima que los gobiernos pierden cada año entre 10 y 15 mil millones de dólares estadounidenses como resultado de la tala ilegal. Estos son impuestos perdidos por este crimen ambiental que podrían dedicarse a mejorar las vidas de sus ciudadanos. Además, las actividades ilegales hacen competencia desleal frente a los operadores responsables que desarrollan su actividad con arreglo a la legislación aplicable, ya que ponen en el mercado

madera ilegal pero más barata. Entre las **consecuencias medioambientales**, la tala ilegal contribuye, junto con otros factores, al proceso de deforestación y de degradación de los bosques, que puede llegar a causar hasta el 20% de las emisiones de CO₂ a nivel global según estimaciones recientes del IPCC. Además, representa una amenaza para la biodiversidad, especialmente en países tropicales, y contribuye a la desertificación y erosión del suelo. **A nivel social**, la tala ilegal es fuente de conflictos con las poblaciones locales y con frecuencia está asociada con corrupción, violencia y conflictos armados, violación de derechos humanos y crimen organizado, así como con el empeoramiento de los niveles de pobreza. Además, debilita la legitimidad del sector forestal a ejecutar sus trabajos y dificulta los esfuerzos de los gobiernos a implementar una gestión forestal sostenible en sus territorios. **Para luchar contra esta situación, se han dictado normas en diferentes países del mundo que buscan combatir la tala ilegal y evitar que el mercado se abastezca con madera procedente de aprovechamientos no legales.**

Ya en los años noventa empezó a surgir a nivel internacional una preocupación en torno a la tala ilegal de madera y al problema que supone para la buena gestión y la gobernanza forestal. Esta preocupación dio como resultado que la Unión Europea adoptara en 2003 el Plan de Acción FLEGT sobre la aplicación de las leyes, gobernanza y comercio forestales ("*Forest Law Enforcement, Governance and Trade*" por sus siglas en inglés), en el que se proponían una serie de medidas para afrontar el creciente problema de la tala ilegal y el comercio asociado a esta práctica. Entre estas medidas, se propuso la creación de un sistema de licencias FLEGT para garantizar que en la Unión Europea entrara sólo madera producida y manufacturada legalmente de conformidad con la legislación nacional del país productor que emitiera

esas licencias. Otra de las medidas propuestas fue la creación de una normativa que prohibiera la introducción de madera aprovechada ilegalmente en el mercado de la UE.

Así, por un lado, se desarrolló el sistema de licencias FLEGT mediante el Reglamento (CE) nº 2173/2005 del Consejo, de 20 de diciembre de 2005, relativo al establecimiento de un sistema de licencias FLEGT aplicable a las importaciones de madera en la Comunidad Europea, así como por el Reglamento (CE) nº 1024/2008 de la Comisión, de 17 de octubre de 2008, por el que se establecen las normas de desarrollo del Reglamento FLEGT. Mediante este sistema, los países socios que han firmado un Acuerdo Voluntario de Asociación con la UE ponen en marcha un sistema para asegurar que los productos de madera exportados a la UE cumplen con la legalidad del país de origen. La licencia FLEGT que acompaña a dichos productos sirve para garantizar su origen legal.

Por otro lado, se aprobó el Reglamento (UE) nº 995/2010 del Parlamento y del Consejo, de 20 de octubre de 2010, por el que se establecen las obligaciones de los agentes que comercializan madera y productos de la madera. Entre otras medidas, el reglamento prohíbe expresamente la importación de madera ilegal a la UE.

Por último, el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (o Convenio CITES) regula el comercio de las especies amenazadas de fauna y flora silvestres (entre las que se encuentran algunas especies madereras) para favorecer su conservación y un comercio sostenible. Este sistema se implementa mediante el uso de permisos oficiales o prohibición al comercio de ciertas especies y su aplicación en la UE se regula principalmente mediante el Reglamento (CE) nº 338/97 del Consejo, de 9 de diciembre de 1996,

relativo a la protección de especies de la fauna y flora silvestres mediante el control de su comercio.

La aplicación de todos estos reglamentos conlleva controles documentales y físicos para verificar que los productos de madera se han introducido en el mercado de la Unión Europea cumpliendo con los pasos necesarios que exige la normativa. Para un determinado producto, el control documental podría verificar, por ejemplo, si la documentación para pedir un permiso CITES o FLEGT ha sido manipulada o falsificada, o es inexistente, o si se dispone de información suficiente para analizar si existe riesgo de importar madera ilegal desde el punto de vista del Reglamento EUTR. Sin embargo, el control físico del producto también es necesario para verificar, por ejemplo, que no se está importando más cantidad que la autorizada por el permiso CITES o la licencia FLEGT, que la documentación que acompaña el producto no ha sido falsificada o manipulada, o para identificar que la madera del producto pertenece a la especie botánica descrita en la documentación y permisos que autorizan su importación. En este último caso, el análisis de la madera va a permitir validar si la especie declarada (o

incluso el origen declarado) corresponde a lo indicado en la documentación que la acompaña. Así, el análisis botánico podría sacar a la luz que los documentos y la especie analizada no se corresponden entre sí, lo que podría dar lugar a una investigación para analizar el grado de incumplimiento de la normativa, así como sobre el origen ilegal de ese producto de madera.

Por todo lo anterior (garantía de legalidad, cumplimiento de normativa, seguridad en la compra-venta) es evidente que disponer de unos mínimos conocimientos técnicos en cuanto a las características de la madera como material y en cuanto a su identificación botánica va a ser de utilidad para cualquier agente implicado en el comercio de la madera, ya sean comerciantes, importadores, compradores o inspectores.

En este sentido, hay que destacar la importancia de conocer el nombre científico de las especies madereras para evitar confusiones. Los nombres vulgares o comerciales pueden hacer referencia a varias especies distintas, creando errores en las traducciones de documentos y malentendidos comerciales y, por tanto, generando confusión en cuanto a qué madera se está

comprando y de dónde procede. Sin embargo, el nombre científico es único para cada especie, por lo que facilita asegurar la correcta trazabilidad de la madera de una especie determinada desde su origen.

Por todo lo expuesto, el objetivo del presente documento es aportar una serie de conocimientos básicos sobre la anatomía de la madera, los productos de madera que podemos encontrar en el mercado y las técnicas de identificación botánica existentes, de forma que la madera se convierta en un material más familiar cuando necesitemos valorar y evaluar las características de un determinado producto, por razones comerciales o de cumplimiento de la normativa, así como para comprender cómo funcionan las técnicas de identificación de maderas y seleccionar la más adecuada al producto en caso necesario. Por tanto, este conocimiento permitirá que los actores implicados en los procesos de comercialización, inspección y consumo de productos de madera puedan entender mejor y evaluar dichos productos a lo largo de la cadena de suministro, especialmente en cuanto al origen legal de los mismos.



2 Estructura anatómica de la madera

2.1. Concepto de madera

Lo primero que debemos preguntarnos es algo tan básico como qué es la madera. Pues bien, a nivel científico se puede definir como el “conjunto de tejidos del xilema que forman el tronco, las raíces y las ramas de los vegetales leñosos, excluida la corteza” (García-Esteban *et al.*, 2003).

En esta definición debe entenderse como vegetales leñosos aquellos que presentan las siguientes características:

- Deben ser plantas vasculares, es decir, tener tejidos conductores especializados: xilema y floema. El xilema es un tejido lignificado que se corresponde con lo que llamamos madera en el vegetal maduro (A y B en la Figura 1). El floema es el tejido conductor encargado del transporte de nutrientes orgánicos e inorgánicos –especialmente azúcares– producidos por la actividad fotosintética.

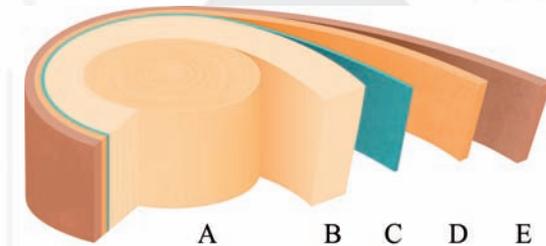


Figura 1. Capas que componen el tronco de un árbol. A. Duramen. B. Albura. C. Cambium. D. Floema. E. Corteza.

- Deben ser plantas perennes, es decir, que viven más de dos años.
- Deben tener un tallo principal que persiste de un año para otro. En el caso de los árboles, a este tallo se le llama tronco.

Y sobre todo...

- Deben tener crecimiento secundario, es decir, deben presentar un crecimiento en diámetro independiente del crecimiento longitudinal, que es el crecimiento primario.

El último de los requisitos, el de poseer crecimiento secundario, deja fuera de nuestra definición de madera a materiales tan próximos por sus aplicaciones como son la palmera y el bambú. Ambos materiales se usan por todo el

mundo con funciones resistentes y no es difícil verlos también en productos de decoración e incluso de carpintería (ej. suelos laminados de bambú). Ambos materiales poseen una estructura y propiedades radicalmente distintas a las de la madera, por lo que no es posible extrapolar la información presentada en este documento a dichos materiales.



Figura 2. Puerta fabricada con tejido lignificado de cactus (Atacama, Chile).

Tampoco se puede considerar como “madera” al tejido lignificado de los cactus, aunque pueda ser usado en

la fabricación de puertas (Figura 2) y de pequeños elementos decorativos en algunas zonas del globo.

De acuerdo con lo anterior, el término madera se aplica exclusivamente al xilema de los árboles, vegetales leñosos de dimensiones suficientes para ser aprovechables desde el punto de vista maderero.

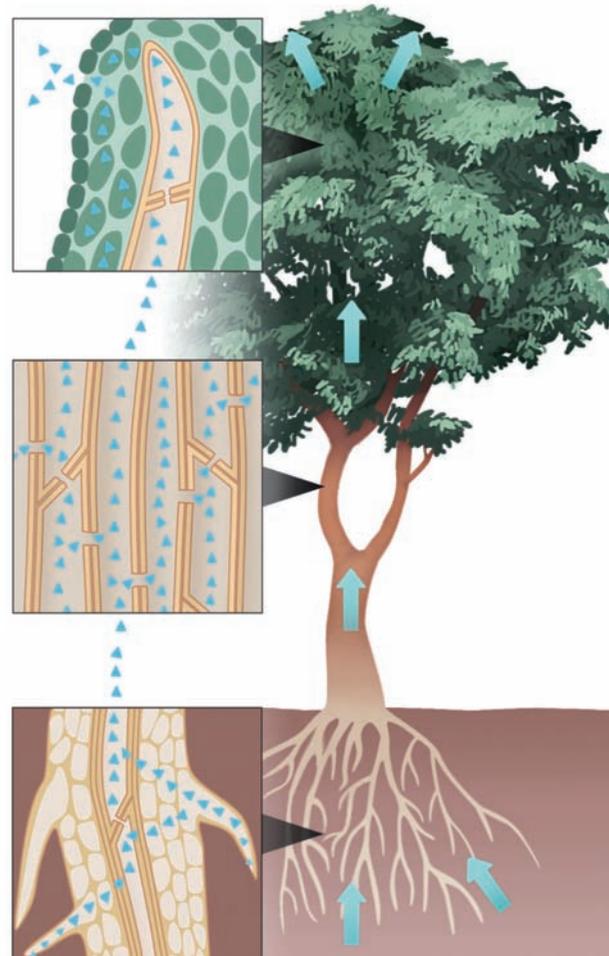


Figura 3. Estructura conductora del tronco de los árboles.

Los vegetales leñosos comercialmente maderables, es decir, los árboles, se encuentran agrupados en dos grandes divisiones: las gimnospermas, que incluyen a las coníferas, y las angiospermas, que incluyen a las frondosas.

El tejido leñoso de los vegetales obedece a una misma necesidad: desarrollar una estructura resistente de soporte vertical que ayude al vegetal a un rápido encuentro con la luz solar (necesaria para la fotosíntesis) y a tener dominancia frente a otras plantas, que son sus competidores por la luz y los alimentos.

En esta lucha por el espacio, donde se emplean estrategias muy distintas en función del tipo de vegetal, el árbol debe dar rigidez a su tallo para que sirva de soporte de toda la copa, su “fábrica” donde se generan las condiciones necesarias para llevar a cabo las funciones respiratorias, reproductivas, circulatorias y la actividad fotosintética. Así, el tallo debe crecer rápidamente en altura, pero con la resistencia suficiente para hacer frente al viento y a su propio peso. Además de estas funciones de soporte estructural y de resistencia, la estructura del tallo también debe hacer frente a funciones de conducción de la savia (tanto bruta como elaborada) y de almacenamiento de sustancias de reserva (en el parénquima). En la Figura 3 se aporta una visión esquemática de la función conductora del tronco de los árboles.

2.2. Partes del xilema y su estructura celular

Analizando la estructura macroscópica transversal del tronco de un árbol (Figura 4) se observan, de fuera a dentro, los siguientes elementos y tejidos:

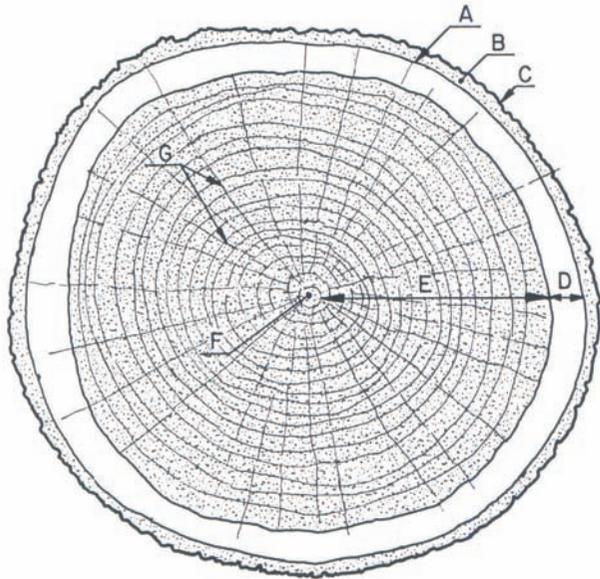


Figura 4. Sección transversal del tronco de un árbol.

- **Xilema (E+D):** Parte interna del tronco, denominada madera. En ella podemos diferenciar dos grandes zonas según sus características. Por un lado encontramos la albura, que es la parte externa y por otro lado el duramen que sería la parte más interna del tronco. En muchos casos se pueden identificar claramente a simple vista:
 - **Albura (D):** Parte externa del xilema, integrada en su mayoría por células fisiológicamente muertas (la excepción son las células del parénquima, que permanecen vivas y activas durante largo tiempo) que llevan a cabo una función conductora de la savia bruta desde las raíces hacia las hojas. La albura también contribuye a las funciones de soporte estructural, así como de almacenamiento de sustancias de reserva mediante las células del parénquima (tanto axial como radial). La anchura de la albura es muy variable (por ejemplo, puede ocupar casi todo el xilema en el pino radiata joven o tener una anchura muy reducida como en el castaño adulto) y su coloración habitualmente es más clara que la del duramen, aunque a veces sea indistinguible visualmente. Por su elevado contenido en sustancias alimenticias (azúcares, almidones, etc.) es la zona más fácilmente atacable por los hongos e insectos.
 - **Duramen (E):** Parte interna del xilema, compuesta por células fisiológicamente muertas que llevan a cabo una función fundamentalmente mecánica. Su aparición se debe a que, llegado un determinado momento, las células del parénquima de la albura mueren y las sustancias de reserva que se almacenaban en su interior se degradan y oxidan impregnando todo el tejido adyacente. Este proceso se conoce como duraminización y provoca

- **Corteza muerta (C):** Envoltura exterior muerta de consistencia esponjosa que protege al árbol frente a las agresiones exteriores (mecánicas, fuego, climáticas, etc.).
- **Corteza viva o floema (B):** Parte interior de la corteza, compuesta por células vivas por las que desciende la savia elaborada, producida en las hojas como consecuencia de la actividad fotosintética, mediante la cual los nutrientes son convertidos en glucosa.
- **Cambium (A):** Capa meristemática ubicada entre el floema y el xilema, que da lugar al crecimiento secundario del árbol al producir células de floema (corteza) hacia el exterior y células de xilema (madera) hacia el interior.

la transformación de la albura a duramen en toda la parte del tronco afectada, aunque la anchura del duramen es muy variable entre especies.

Debido a esta impregnación, el duramen tiene una durabilidad natural más elevada que la de la albura, es decir, es una zona menos propensa al ataque de hongos e insectos. Además, la impregnación también hace que habitualmente la coloración del duramen sea más oscura que la de la albura, permitiendo diferenciarlas a simple vista (por ejemplo, el duramen en pinos suele estar coloreado). Sin embargo, la anchura del duramen es muy variable entre especies y en algunas maderas el proceso de oscurecimiento no se produce (por ejemplo, en piceas, abetos o chopos). En ese caso, el duramen debe ser identificado mediante reactivos químicos o mediante análisis microscópico.

- **Madera juvenil (F):** A veces, dentro del duramen se puede encontrar un tejido diferenciado llamado **madera juvenil** (por ejemplo, en ciertas coníferas). Se trata del xilema formado durante los primeros años de vida del árbol, durante los cuales la velocidad de crecimiento es más elevada para ganar en la batalla por la ocupación del territorio. Por su mayor velocidad de formación, este tejido tiene características diferenciadas respecto de la madera adulta (por ejemplo, menor espesor de la pared celular, menor contenido en lignina, mayor inclinación de las fibras dentro de la pared secundaria, etc.), lo que altera tanto sus propiedades físico-mecánicas como sus características biométricas. Esta madera juvenil se ubica en la parte más interna del duramen, ocupando los primeros anillos (a veces hasta 20 anillos como en el pino laricio).

➤ *Datos clave*

El xilema está básicamente constituido por células muertas. Las únicas células fisiológicamente vivas en el tronco de los árboles se encuentran en el cambium, en las células de parénquima de los primeros anillos de la albura, y en el floema.

Adelantando información, uno de los análisis que se efectúan actualmente en laboratorio para la identificación botánica de una madera es el análisis genético, técnica que se basa en extraer y analizar el ADN de la madera. Como se ha comentado anteriormente, la mayor parte del xilema está formado por células muertas. Desde el momento en que una célula muere, los mecanismos que protegen su ADN dejan de estar activos y éste empieza a degradarse, por lo que en la madera hay muy poco ADN y está muy fragmentado. Por ese motivo, si se va a llevar a cabo un análisis genético en madera, la muestra debe tomarse de la parte de la albura en la medida de lo posible, que es donde había mayor cantidad de células vivas en el momento de la tala del árbol. Además, dentro de la albura se seleccionará preferentemente su parte más externa en relación con el tronco, ya que será la menos afectada por el proceso de duraminización, que afecta negativamente a la integridad del ADN y hace que la posibilidad de encontrar ADN viable en la madera, en cantidad suficiente para la identificación, sea muy reducida. Por ello, las mejores regiones para tomar la muestra de madera serán las del cambium y los primeros anillos de la albura y del floema.

En este sentido, es interesante tener en cuenta que la albura en las coníferas habitualmente es diferenciable del duramen a simple vista y, además, su cuantía suele ser abundante. Sin embargo, en las frondosas a menudo la albura no es diferenciable y suele ser de pequeño espesor,

de forma que en el mercado internacional de madera aserrada de frondosas o en sus productos elaborados la posibilidad de encontrar o identificar madera de albura es muy reducida.

Otros elementos anatómicos de la madera, visibles a simple vista, son:

- **La médula (F):** Es una estructura en el centro del tronco, a modo de cilindro de 1-2 mm de diámetro, que corresponde al crecimiento inicial del tallo.
- **Los anillos de crecimiento:** Es el conjunto de anillos concéntricos que engrosan el tronco año a año (es decir, al crecimiento secundario del tronco). En las especies que crecen en climas templados y boreales, con estaciones acusadas que crean un parón del crecimiento en invierno, se corresponde a los crecimientos en diámetro anuales. En árboles tropicales la diferenciación de los anillos es más complicada ya que las estaciones son menos marcadas y pueden formar más de un anillo por año, entre otras razones.

Esta estructura anular puede ser en ocasiones claramente visible (por ejemplo, en pinos) y otras veces no tanto (por ejemplo, en abetos, eucalipto o maderas tropicales). En la mayoría de los casos, dentro del anillo se pueden distinguir claramente dos zonas: la madera temprana, que es la formada al comienzo del periodo vegetativo (momento en el que el árbol comienza su crecimiento anual) y la madera tardía, que es la formada al final de dicho periodo. La anchura total del anillo y la de sus dos zonas varía en función de las condiciones climáticas y de crecimiento del árbol, motivo por el cual puede ser objeto de análisis dendrocronológico (es decir, análisis de la historia del

árbol y del clima circundante examinando sus anillos de crecimiento). Las características de estos anillos, donde se tienen en cuenta su anchura total, la anchura de cada una de las dos zonas que la componen (la madera tardía posee una mayor densidad y resistencia mecánica), y la homogeneidad a lo largo del tronco, tienen una especial influencia en las propiedades mecánicas y físicas de la madera. Por esta razón, la anchura media de los anillos de crecimiento es tenida en cuenta en muchas normas de clasificación resistente de la madera (por ejemplo, en las normas españolas UNE 56544 y UNE 56546).

- **Los radios leñosos (G):** Son estructuras que discurren a modo de líneas transversales en el tronco y están formadas fundamentalmente por células de parénquima, aunque en las coníferas también pueden incorporar **canales resiníferos y traqueidas**. En determinadas especies estos radios leñosos son visibles a simple vista, pero en otras especies es necesario emplear técnicas ópticas para verlos. Mecánicamente, esta estructura transversal permite unir y dar consistencia a toda la estructura longitudinal y, por ello, en algunas especies su influencia en las propiedades físico-mecánicas de la madera es muy elevada. También tienen influencia en la conductividad transversal de fluidos, lo que, a su vez, influye en la penetración de productos de protección y/o acabado. Desde el punto de vista de la identificación de las maderas su importancia también es grande:
 - En identificación macroscópica: analizando características relacionadas con el tamaño, color, número y distribución de los radios.

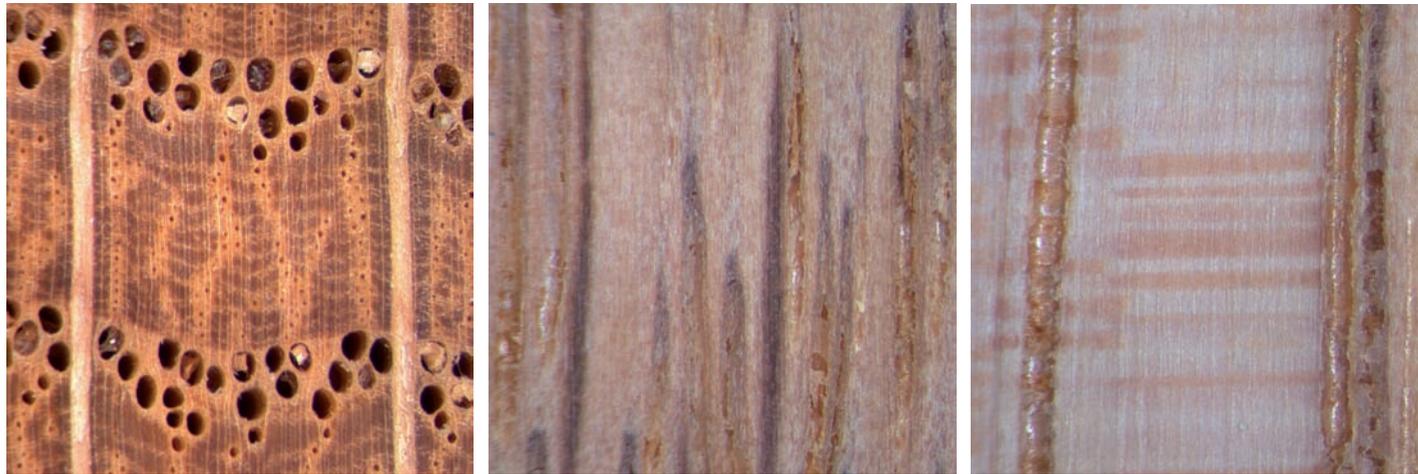


Figura 5. Roble rojo (*Quercus rubra*). Radios leñosos vistos en sección transversal, tangencial y radial.

- En identificación microscópica: por las características de las punteaduras presentes en los campos de cruce, que son las zonas de encuentro entre los elementos verticales y los elementos horizontales de la estructura (radios leñosos).

Los radios leñosos se aprecian, tanto macroscópica como microscópicamente, de forma diferente en las tres secciones de referencia que presenta un tronco (sección transversal: perpendicular al eje del árbol, sección tangencial: tangente a los anillos de crecimiento, y sección radial: según los radios, ver Figura 5 y Figura 20). En la sección transversal los radios se ven como líneas que aparentemente progresan desde la médula a la corteza (de ahí que en ocasiones se les haya llamado incorrectamente radios medulares, dando a entender que se originan de la médula). Las células que forman estas estructuras transversales se originan en el cambium, por lo que el crecimiento secundario del tronco hace que progresen radialmente. En la sección radial, los radios se pueden

detectar como espejuelos (es decir, superficies brillantes de tamaño y forma variables). Y en la sección la tangencial, se aprecian como líneas fusiformes de longitud y anchura variables.

La observación de la densidad de radios por unidad de superficie, así como sus características de tamaño y color, sirven de apoyo para la identificación macroscópica de las especies de madera. Por ejemplo, los radios resultan determinantes para distinguir entre madera de haya y plátano de sombra, por un lado, o para diferenciar el roble del castaño, por otro.

- **Otros elementos**, tales como los nudos (que son los restos de ramas embebidas en la madera), la madera juvenil y de reacción, la presencia de bandas o estructuras puntuales de color claro integradas por células de parénquima, son también visibles a simple vista y se usan en la identificación botánica.

Estructura celular

Cuando efectuamos un estudio microscópico de la madera, podemos observar que ésta posee una estructura tubular fundamentalmente orientada de forma paralela al eje del árbol, aunque arriestrada por elementos también tubulares dispuestos radialmente (los radios leñosos) y macizada por un material altamente resistente a la compresión (la **lignina**), que se dispone en los huecos dejados entre sí por los elementos tubulares. Por otro lado, las paredes celulares están básicamente constituidas por un material altamente resistente a la tracción (la **celulosa**) también embebida en una matriz de lignina reforzada con hemicelulosas (Figura 6). Considerando las proporciones de los componentes de la madera en peso, aproximadamente el 40-50% de la madera es celulosa, mientras que la lignina representa el 15-35%. El resto de los componentes de la madera están compuestos por cantidades variables de hemicelulosas (20-35%) y de diversos compuestos químicos secundarios (extractivos, materiales inorgánicos, etc.). Como se aprecia, es la celulosa el componente más importante en términos

de peso y volumen, siendo además el que mayor efecto tiene sobre las características y propiedades de la madera.

Un análisis más detallado de la ultraestructura de la pared celular (Figura 6) permite poner de manifiesto que las paredes de cada una de las células de la madera están formadas por gran cantidad de cadenas de celulosa, de carácter altamente cristalino, que primeramente se agrupan en paquetes de unas 40 cadenas de celulosa formando haces denominados fibrillas elementales (C en la Figura 6)¹. Posteriormente estas fibrillas elementales se agrupan a su vez para dar lugar a estructuras lineares de mayor diámetro denominadas microfibrillas (en color azul en la Figura 6), las cuales se disponen helicoidalmente en la pared celular quedando embebidas en una masa de lignina amorfa reforzada por la presencia de hemicelulosas (B en la Figura 6). No obstante, esta forma de explicar la pared celular es una simplificación notable, pues realmente la pared celular consta de diversas capas en las que las microfibrillas pueden tener diversas orientaciones, lo que refuerza aún más la resistencia de la pared celular. En este esquema simplificado de la pared celular, las microfibrillas aportan una gran resistencia a la tracción paralela a su dirección, mientras que la lignina permite la unión entre sí de todos los elementos resistentes y aporta resistencia a la compresión. Esta disposición explica el comportamiento

elástico de la madera ante cargas instantáneas, así como el comportamiento plástico ante cargas de larga duración.

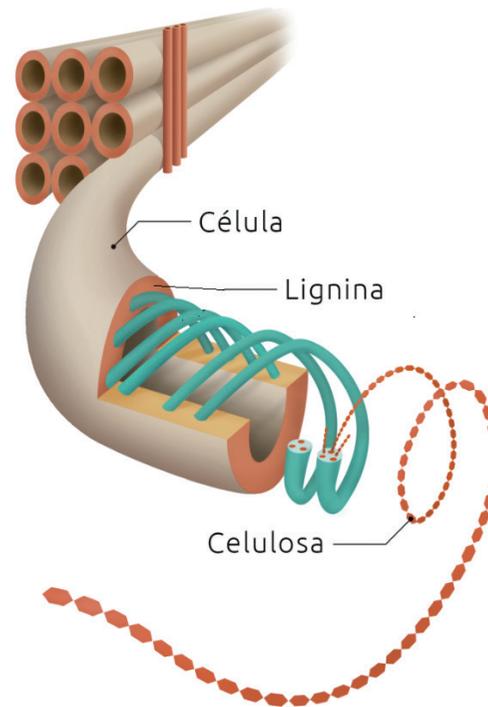


Figura 6. Ultraestructura de la pared celular. A. Célula. B. Lignina. C. Fibrilla de celulosa.

El hueco interior de cada célula, llamado **lumen**, permite el flujo de agua libre por el interior del tejido del xilema. Para permitir el movimiento intercelular de los fluidos existen comunicaciones entre lúmenes de células adyacentes mediante orificios en la pared celular llamados **punteaduras**. Su forma, número y disposición son caracteres distintivos que permiten la identificación anatómica de las especies de madera (Figura 7).

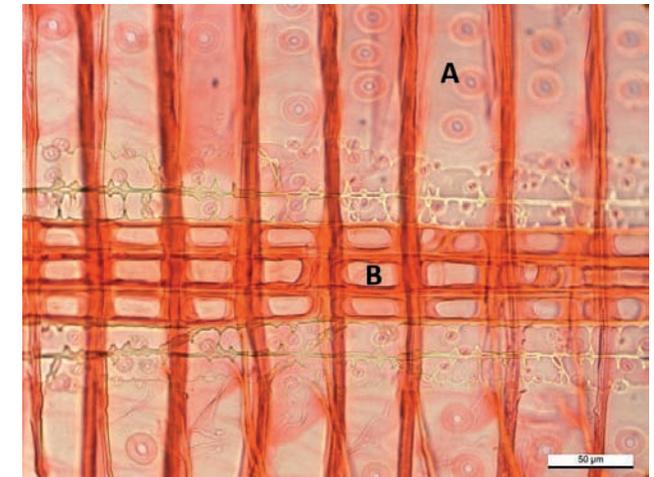


Figura 7. Sección radial de Pino silvestre (*Pinus sylvestris*). A. Punteaduras areoladas. B. Punteaduras de campo de cruce tipo ventana.

2.3. Diferencias anatómicas entre la madera de coníferas y de frondosas

Los dos grandes grupos en los que pueden ser divididas las maderas (es decir, coníferas y frondosas) tienen estructuras anatómicas distintas, aunque es necesario considerar que también dentro de cada uno de los grupos la variabilidad es enorme, especialmente en el seno de las frondosas.

Coníferas

En las coníferas, las funciones conductoras y de sostén están ejercidas por un único tipo de células de conducción y transporte denominadas **traqueidas**. Las traqueidas son células cerradas, alargadas y acabadas en punta, con una

¹ Las cadenas de celulosa que forman las fibrillas elementales están íntimamente en contacto, pero existen en ellas subzonas en las que el grado de alineamiento y de contacto de las cadenas de celulosa es tan estrecho que presentan características propias de los cristales, lo que hace que las fibrillas funcionalmente estén compuestas por zonas cristalinas y zonas amorfas. El mayor o menor grado de cristalinidad influye de forma decisiva en el comportamiento físico-mecánico de una madera y muy especialmente en la rigidez y en el comportamiento a la sorción.

longitud máxima de 10 mm, pero normalmente de entre 2,5 mm y 5 mm (Figuras 8 y 9). Se encuentran firmemente unidas entre sí y orientadas según el eje del árbol de forma que, si las miramos en una sección transversal, se asemejan a las celdillas de un panal (Figuras 8 y 10).

Estas células representan aproximadamente el 90% del volumen total de la madera (Figura 8). En esta gran homogeneidad estructural radica gran parte del éxito de la madera de conífera como material estructural en la construcción, ya que permite que la madera presente un comportamiento físico-mecánico mucho más predecible y facilita el agrupamiento en lotes homogéneos con similares características físico-mecánicas.

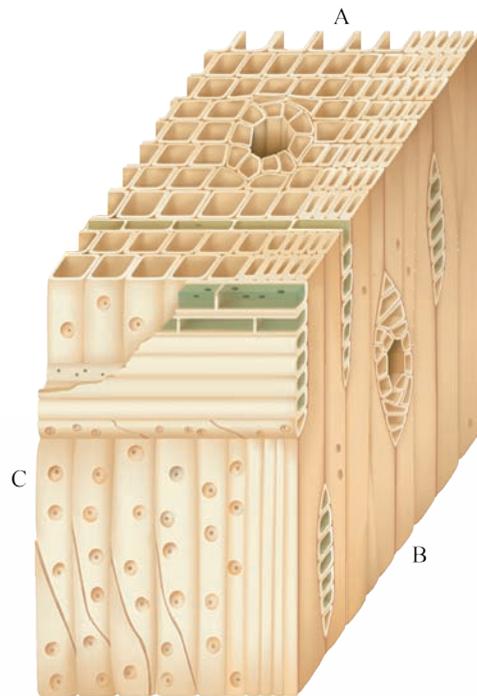


Figura 8. Estructura microscópica de la madera de coníferas. A. Sección transversal. B. Sección tangencial. C. Sección radial.

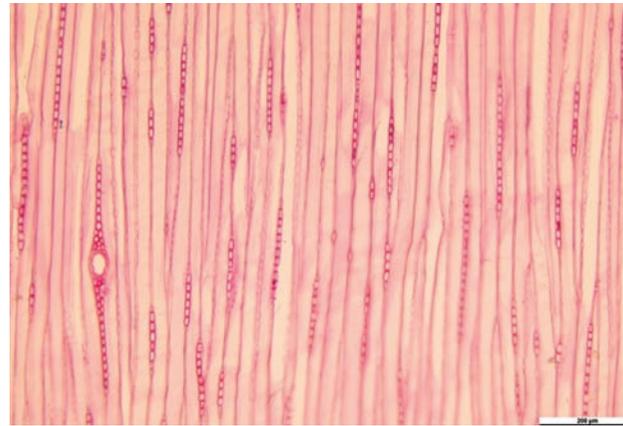


Figura 9. Sección tangencial de Picea (*Picea Abies*).

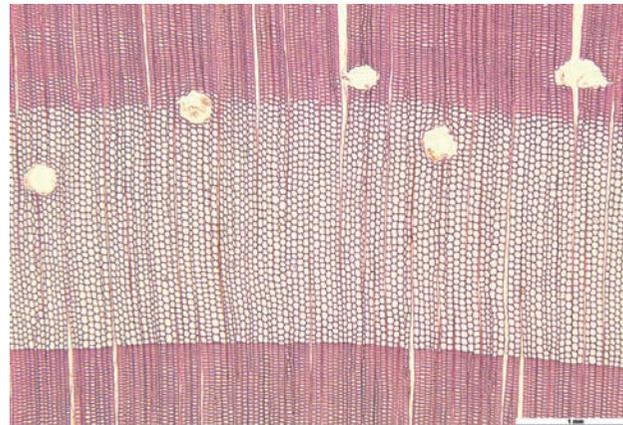


Figura 10. Sección transversal de Pino amarillo del sur (*Pinus elliotii*).

Aparte de estos elementos de conducción y resistencia, la madera de coníferas presenta elementos de almacenamiento: **las células de parénquima**. Estas células de parénquima tienen forma rectangular, paredes celulares delgadas y numerosas **punteaduras**. Además, estas células se disponen paralelamente al eje del árbol en el caso del parénquima longitudinal (que es ausente o escaso en

coníferas) o transversalmente en el caso del parénquima radial (Figura 11). Por otro lado, estas células se diferencian de las traqueidas en que permanecen fisiológicamente vivas durante varios años después de su formación. Esta característica es debida a que las sustancias que acumulan no son directamente utilizables por el árbol y requieren una transformación previa para poder ser utilizados, lo que sólo puede ser efectuado por una célula viva. Cuando esta utilidad como células de almacenamiento finaliza, la célula muere y comienza la oxidación de los nutrientes almacenados en ella y, con ello, la **duraminización**.

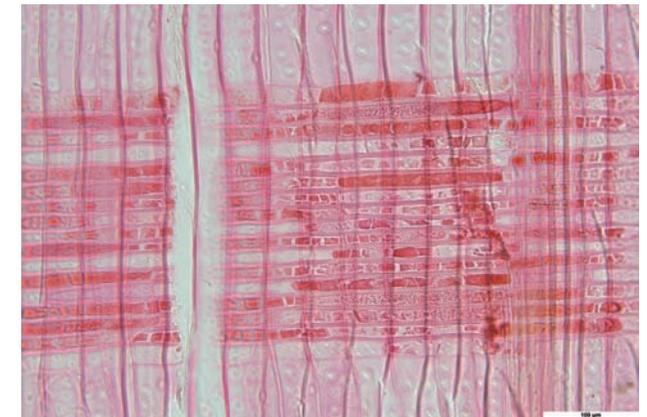


Figura 11. Sección radial de Cedro rojo occidental (*Thuja plicata*).

Un elemento anatómico de gran importancia para el funcionamiento hidráulico del xilema, así como para la identificación anatómica de la especie de madera, son las **punteaduras de paso**. Se trata de retraimientos de la capa secundaria de la pared celular que provocan que células adyacentes sólo estén separadas por una membrana formada por los restos de la pared primaria, permitiendo conexiones intercelulares. Dicho de otra manera, son zonas donde las paredes entre células adyacentes están más adelgazadas y permiten la comunicación y el paso de sustancias entre células.

De los tres tipos de **punteaduras** existentes (areoladas, simples y semi-areoladas, Figura 12), debido a la gran cantidad de traqueidas que presentan las coníferas, el que aparece con más frecuencia es el de las punteaduras areoladas, que conectan dos traqueidas longitudinales o radiales.

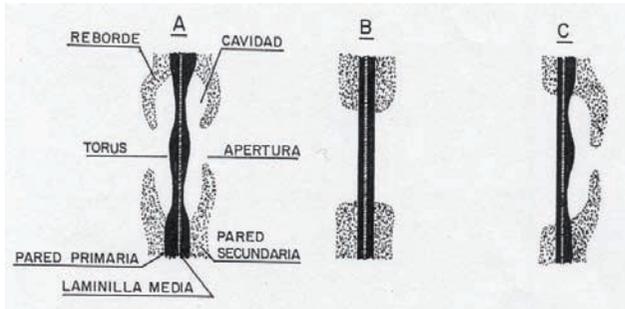


Figura 12. Punteaduras de paso. A. Areolada. B. Simple. C. Semi-areolada.

No obstante, además de punteaduras areoladas, también hacen acto de presencia los otros dos tipos señalados de punteaduras. Las simples conectan dos células de parénquima, mientras que las semi-areoladas se presentan entre traqueidas y células del parénquima. La menor presencia de elementos parenquimatosos en la madera de coníferas hace que la presencia de estos dos tipos de punteaduras sea muy escasa en las maderas de coníferas.

El hecho de que las coníferas presenten mayoritariamente punteaduras areoladas explica su mayor permeabilidad (salvo excepciones debidas fundamentalmente a aspiraciones del toro de las punteaduras), ya que estas punteaduras son más efectivas para el paso de líquidos, por el menor grosor de la pared primaria y el mayor tamaño de los poros en ella existentes.

Un aspecto que puede resultar de interés para los industriales y usuarios de la madera radica en el hecho

de que hay maderas de coníferas, como la picea o el abeto (aunque en diferente medida en ambas), en las que durante el proceso de secado de la madera, una vez abatido el árbol, se produce la aspiración del toro, el cual cierra totalmente la apertura de la punteadura a modo de tapón, lo que lleva a que tras su secado esta madera sea muy poco permeable a los líquidos. Esta es la razón por la cual las maderas de picea y abeto resultan refractarias a los tratamientos químicos de conservación. Por otra parte, el hecho de que en las coníferas las punteaduras sean más numerosas entre los elementos longitudinales y dentro de estos en sus paredes radiales, hace que el secado de las piezas aserradas radialmente sea más rápido que el de las aserradas tangencialmente.

Finalmente, en las coníferas es corriente la aparición de **canales resiníferos**, que son orificios que facilitan el flujo de fluidos por el interior de la madera. Estos canales están revestidos por células epiteliales de paredes gruesas o delgadas, siendo más frecuentes los canales longitudinales que los transversales (Figura 13).

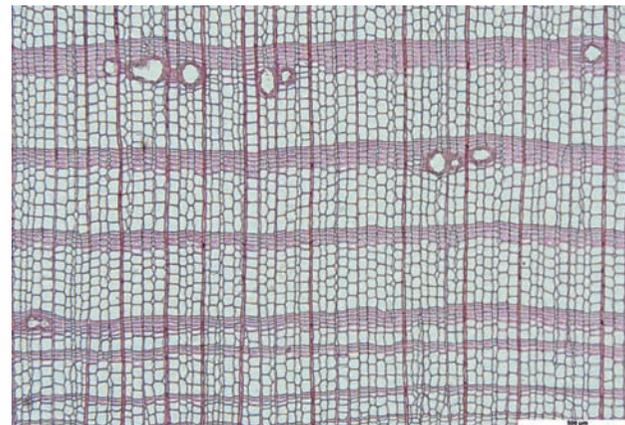


Figura 13. Canales resiníferos longitudinales en Alerce siberiano (*Larix sibirica*).

Frondosas

Las frondosas presentan tres grandes tipos de tejidos: i) el **conductor**, formado por vasos, ii) el de **sostén**, formado por fibras, y iii) el de **reserva**, constituido por células de parénquima. La mayor parte de las células que componen estos tejidos se orientan de forma paralela al eje del árbol, y no superan los 2 mm de longitud (Figura 14).

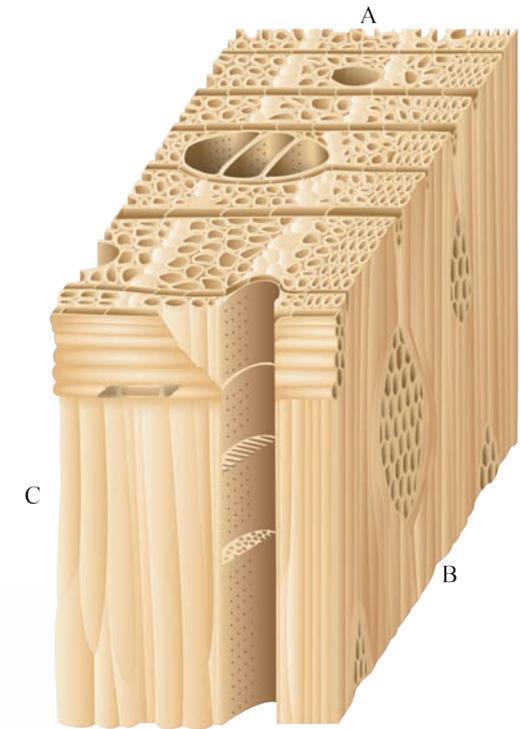


Figura 14. Estructura microscópica de la madera de frondosas. A. Sección transversal. B. Sección tangencial. C. Sección radial.

Los **vasos** de las frondosas son el equivalente a las **traqueidas** de paredes delgadas y función conductora de las coníferas. Un vaso es una agrupación longitudinal

de elementos tubulares (células con los extremos abiertos) que se extiende ininterrumpidamente a lo largo del tronco del árbol a semejanza de tuberías (Figura 15). Estas agrupaciones longitudinales no continúan indefinidamente sino que presentan frecuentes ramificaciones. Además, los vasos se pueden distribuir aisladamente, en grupos tangenciales o en zig-zag. Como regla general, todos los que se forman al comienzo del período vegetativo tienen paredes más delgadas y lúmenes más anchos que los que se forman al final. Los lúmenes de los vasos, también llamados coloquialmente **poros** cuando son visibles con facilidad, son más claramente visibles en el corte transversal de la madera y son un elemento diferenciador de la madera de las frondosas.

De la estructura de este tejido conductor se deduce claramente que su efectividad en el transporte de fluidos es mayor que en el caso de las traqueidas de las coníferas, lo que resulta necesario por la mayor superficie foliar de las frondosas.

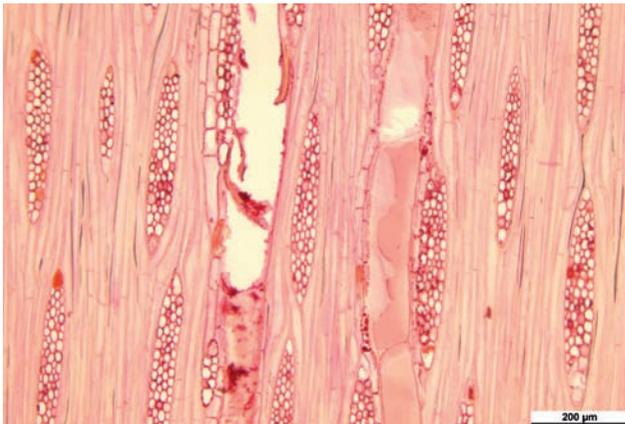


Figura 15. Elemento vascular en Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*).

En algunas especies como el roble (Figura 16), el olmo, el fresno o el castaño, los vasos de la madera temprana tienen un diámetro mayor que los de la madera tardía, siendo visibles incluso a simple vista, recibiendo el nombre de maderas de **anillo poroso** porque se observa a simple vista la existencia de bandas concéntricas de poros. Es también característico de estas maderas presentar un paso abrupto entre el tamaño de los vasos formados en la madera temprana y los formados en la madera tardía.

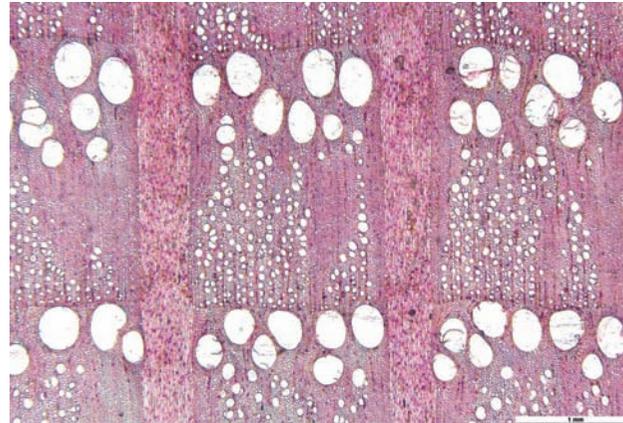


Figura 16. Sección transversal de roble (*Quercus* spp.). Madera de anillo poroso.

Existen otras frondosas como el haya (Figura 17), el aliso, el abedul, el arce, el nogal o el chopo, que presentan vasos de un diámetro uniforme a lo largo de todo el anillo. En este caso, se dice que estas maderas presentan **porosidad difusa** u homogénea.

Por último, existen maderas que como el nogal (Figura 18) presentan una disminución gradual del diámetro de los vasos desde la madera temprana a la madera tardía, denominándose a estas maderas como de **anillo semiporoso**.

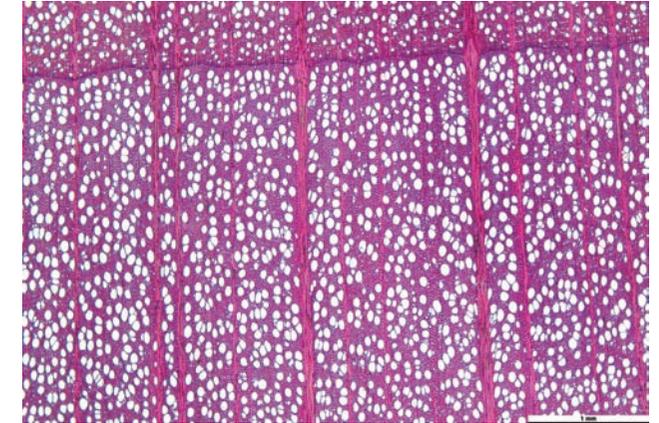


Figura 17. Sección transversal de haya (*Fagus sylvatica*). Madera de porosidad difusa.

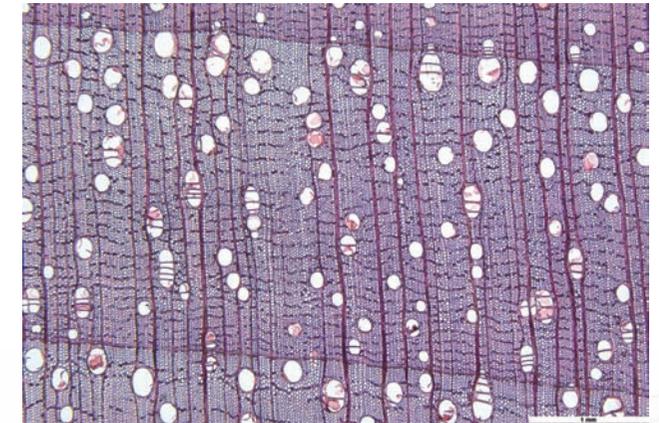


Figura 18. Sección transversal de nogal (*Juglans regia*). Madera de anillo semiporoso.

En las maderas de porosidad difusa, los vasos ocupan un porcentaje en volumen elevado, del 20% al 60%. Por contra, y pese al mayor tamaño unitario, en las maderas de anillo poroso los vasos sólo ocupan del 5% al 25% del volumen total de la madera. Por ello, las frondosas más

permeables al paso de los líquidos han de buscarse en el grupo de las maderas de **porosidad difusa** u homogénea.

Como curiosidad, las maderas de anillo poroso y especialmente, la madera de roble, han sido muy usadas en tonelería porque permiten el nivel de intercambio gaseoso adecuado para la conservación y envejecimiento del vino y del brandy. De hecho, los toneleros buscan maderas con un tamaño de anillo muy concreto y homogéneo para que el nivel de intercambio gaseoso que genera su porosidad sea el adecuado para cada tipo de bebida. Dado que la anchura de la madera temprana es sensiblemente constante en la madera de roble, el tamaño del anillo de crecimiento influye de forma destacada en la porosidad de la madera y esa es la razón por la cual en el pasado los toneleros europeos apreciaban mucho la madera de roble procedente de Cantabria (con mayores anillos de crecimiento, como corresponde a un clima más templado).

En cuanto al tejido de almacenamiento en las frondosas, este está formado por células de **parénquima**, presentes tanto en el tejido radial como en el longitudinal. En las

frondosas este tejido es similar al de las coníferas, pero más abundante.

Respecto a los **radios** leñosos, en las frondosas suelen ser mucho más abundantes y de mayor tamaño que en las coníferas. En este sentido, es corriente que, por su tamaño, resulten visibles a simple vista tal y como ocurre con el roble y el haya (Figura 19), entre otras.



Figura 19. Madera de haya.

A diferencia de lo que ocurre con las coníferas, el tipo de punteadura más frecuente en las frondosas es la simple (Figura 12) siendo su tamaño normalmente inferior, lo que

explica la menor permeabilidad media de las frondosas en comparación con las coníferas.

Por último, una característica propia de algunas frondosas es la de presentar **canales gomosos** longitudinales o transversales revestidos de células epiteliales que segregan gomas y resinas.

De todo lo anterior se deduce claramente que las frondosas presentan una estructura más compleja y variada, lo que hace que su aspecto y comportamiento sea más variado, siendo sus maderas más adecuadas para la decoración que para el trabajo estructural. Para este uso estructural se buscan maderas con la mayor homogeneidad posible.

Para ampliar los conocimientos sobre la anatomía de la madera, se pueden consultar los manuales técnicos detallados en la bibliografía.

3 Propiedades y usos de la madera: Grupos tecnológicos

La madera es una materia prima muy versátil. Se emplea habitualmente como material de construcción, tanto para el trabajo estructural como en carpinterías (ventanas, puertas, suelos, frisos, etc.). También se emplea habitualmente como materia prima para la elaboración de muebles, artesanías diversas, elementos de marquetería, etc. Dada la extremada variabilidad de aspecto y propiedades que presenta la madera, se podrá y deberá buscar para cada uso y condiciones de aplicación aquellas especies que presenten las propiedades visuales, físicas, mecánicas y de durabilidad más adecuadas a la aplicación y condiciones del uso deseadas. Por ejemplo, la madera de teca, que destaca por su durabilidad frente al ataque de hongos e insectos así como por su estabilidad dimensional, es muy demandada para la construcción naval y la elaboración de mobiliario de exteriores. Y como ya hemos comentado, otro ejemplo es el uso de madera de roble para tonelería, ya que las características estructurales de los anillos de crecimiento y la composición química de algunas de las especies que conforman el género *Quercus* hacen que su madera sea muy demandada para la fabricación de barricas, empleadas para la conservación y envejecimiento del vino.

Las propiedades físicas, mecánicas, visuales y organolépticas de las maderas presentes en el mercado se basan no solo en las particularidades vistas de su estructura anatómica sino, también, en su composición química, la cual en muchos casos también depende de las condiciones de crecimiento (que varía según el suelo y el clima donde crece el árbol).

3.1. Características de la madera como material

Las especiales propiedades de la madera radican en la estructura anatómica anteriormente vista. Lo primero que hay que considerar es que esta estructura hace que la madera sea un material básicamente **anisótropo** (que presenta propiedades diferentes en las tres direcciones), lo que hace que en el estudio de cualquier propiedad de la madera haya que considerar las tres secciones de referencia: sección transversal (perpendicular al eje del árbol), sección tangencial (tangente a los anillos de crecimiento) y sección radial (según un radio) (Figura 20).

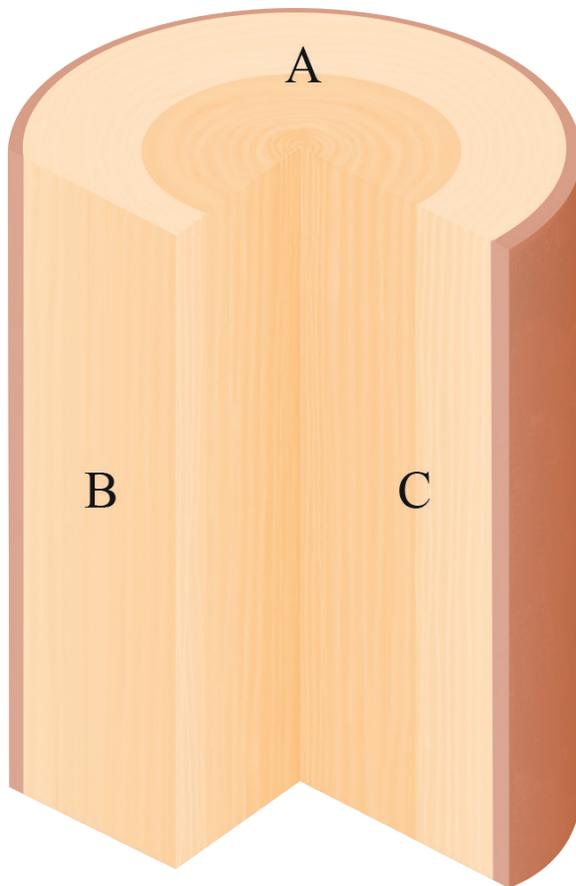


Figura 20. Secciones de referencia en el tronco. A. Sección transversal. B. Sección tangencial. C. Sección radial.

además de anisótropo, es heterogéneo. Es **heterogéneo** porque los diferentes elementos anatómicos (vasos, traqueidas, fibras, parénquima, etc.) que lo componen se pueden combinar de forma distinta según la especie de madera considerada, pudiendo incluso existir diferencias dentro de la misma especie según cual sea su procedencia. El hecho de que el tamaño de los elementos anatómicos varíe desde la médula a la corteza y desde la base hasta el ápice, hace que las propiedades también varíen en función de la posición dentro del tronco.

La heterogeneidad del material se debe no sólo a su propia naturaleza (el ADN o programa genético de cada especie) sino, además, a las adaptaciones puntuales de cada especie al medio en el que viven. Así, solicitaciones mecánicas especiales debido a la pérdida de la verticalidad, por ejemplo al crecer en una ladera fuertemente inclinada, explican la presencia de madera de reacción. Pero esta exigencia de mayor resistencia interna puede también explicar la existencia de otros elementos anatómicos, como son las trabéculas o los engrosamientos espiralados. Los traumatismos en los pinos pueden dar lugar a la formación de un mayor número de canales resiníferos o los incendios recurrentes a adaptaciones específicas, como se aprecia en los alcornoques y en el pino canario.

3.2. Grupos tecnológicos

Como acabamos de ver, las características de la madera varían fundamentalmente con la especie, si bien también

pueden existir ciertas diferencias dentro de la misma especie en función de las condiciones en las que se ha llevado a cabo el crecimiento.

Considerando que cada aplicación y condiciones de aplicación (por ejemplo, el clima) exige unas determinadas características de la madera, resulta de interés agrupar las distintas maderas existentes en el mercado en función de sus posibles usos, que es lo que se conoce como grupos tecnológicos. Un grupo tecnológico de maderas se entiende como el conjunto de maderas que, por sus características físico-mecánicas, de aspecto o durabilidad, son aptas para un uso determinado y que, por tanto, resultan intercambiables entre sí para dicho uso. Se pueden construir tantos grupos tecnológicos como aplicaciones de la madera existan e, incluso, cada empresa o profesional puede construirse los suyos propios desde su experiencia.

Conocer las maderas que integran un grupo tecnológico concreto (por ejemplo, maderas para suelos de exterior, para usos estructurales, para ventanas, etc.) resulta de gran utilidad para saber qué maderas son sustitutivas y qué maderas pueden coexistir en un mismo mercado. Si además de pertenecer a un mismo grupo tecnológico las maderas son parecidas exteriormente, es posible la confusión ya sea o no voluntaria.

Para conocer la clasificación de maderas por usos recomendamos el empleo de la clasificación adoptada por la Asociación Española del Comercio e Industria de la Madera (AEIM), que figura en su página web (<https://www.aeim.org/>).

Para la correcta definición de las propiedades funcionales de la madera es necesario considerar que este material,

4 Productos derivados de la madera

En función de las propiedades físicas de la madera ya comentadas y las particularidades biológicas de las especies, la madera como materia prima puede ser usada con diferentes finalidades en distintos tipos de productos. Por ello, podemos encontrarla bajo múltiples presentaciones en el mercado, desde productos sin elaborar hasta productos finales listos para su uso, pasando por productos intermedios que requieren labores de acabado final. A modo de clasificación no exhaustiva se podría adoptar la siguiente:

4.1. Productos sin elaborar o poco elaborados

Los productos sin elaborar o poco elaborados (también llamados materias primas intermedias) se refieren a aquellos que usualmente aparecen bajo presentaciones de gran formato y almacenados en grandes paquetes. Los que habitualmente pueden ser encontrados en los almacenes de venta al público y a los profesionales son los siguientes:

Madera en rollo

Bajo esta presentación la madera se comercializa en forma de rollos de diámetro y longitudes muy variables (Figura 21). No resulta fácil verlos en almacenes, pero sí en puertos especializados y en fábricas de tableros y aserraderos. También puede verse esta presentación en importaciones de rollizo tratado para instalaciones ambientales y recreativas.



Figura 21. Madera en rollo

Madera aserrada

La madera aserrada se puede encontrar en almacenes, tanto para profesionales como para el gran público. Aparece habitualmente formando parte de paquetes, tanto con tablas perfectamente escuadradas como con tablas que mantienen la corteza o la forma exterior del tronco (Figura 22).



Figura 22. Madera aserrada

Tableros y perfiles laminados de madera maciza

Se trata de tableros y perfiles de madera en los que se observan piezas de madera sólida dispuesta de diversas formas (Figura 24), pero con dimensiones apreciables. En este grupo se pueden incluir:

- Madera laminada encolada, bajo forma de vigas, rectas o no, de dimensiones variables (Figura 23.1).
- Tableros contralaminados (CLT), que suelen tener varias capas (cruzadas) y ser de grandes formatos (Figura 23.2).
- Tableros de madera maciza (SWP), que pueden tener una (Figura 23.3) o varias (Figura 23.4) capas (normalmente tres y cruzadas). Formalmente los

tableros SWP de capas cruzadas son muy parecidos a los CLT, radicando su diferencia en el espesor de las capas.

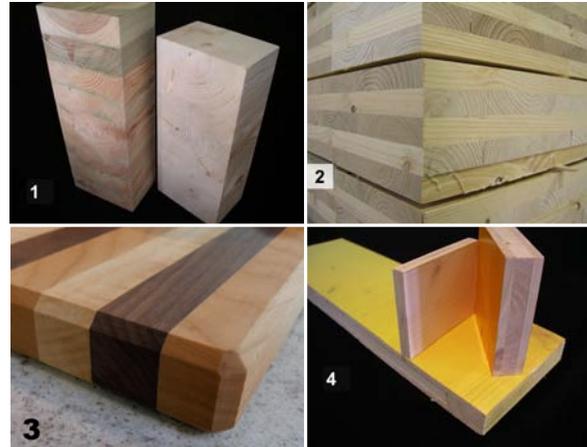


Figura 23. Madera laminada (1), tableros CLT (2) y tableros de madera monocapa (3) y multicapa (4).

Tableros y perfiles microlaminados (chapas)

Se trata de tableros y perfiles de madera en los que se observan chapas de madera sólida dispuestas de diversas formas. También es posible encontrar chapas, tanto decorativas (muy delgadas) como resistentes (más gruesas). En este grupo se pueden incluir:

- Tableros contrachapados (PLY) y laminados (LVL).
- Perfiles laminados (LVL).

La estructura de los tableros y los perfiles laminados es idéntica, variando tan solo sus dimensiones y formatos exteriores.

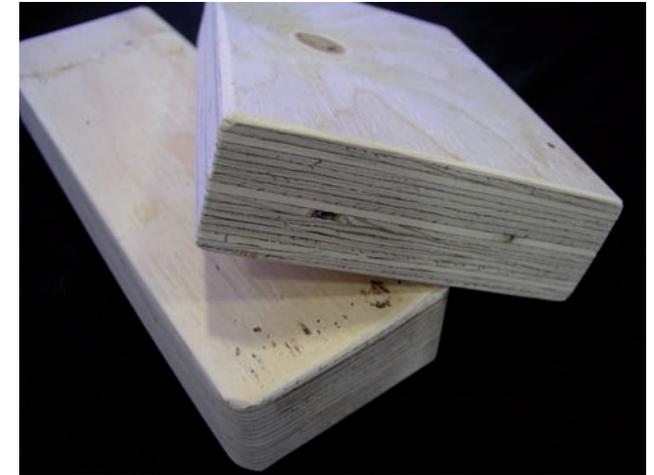


Figura 24. Tablero laminado (LVL).

Tableros y perfiles aglomerados (de partículas y fibras)

Se trata normalmente de tableros (en ocasiones pueden encontrarse también perfiles) de dimensiones variables, compuestos por partículas, más grandes (tipo OSB) o menos grandes, o fibras de madera (Figura 25). Su presencia es muy habitual en los almacenes y pueden presentar acabados superficiales con chapas de madera natural, de melamina u otros. Forman parte de otros muchos productos habitualmente presentes en los almacenes como son puertas, mobiliario de cocina, decoración y oficina, lamas para suelos, particiones

interiores, etc. También es corriente encontrar en el mercado partículas de madera bajo formato de pellets o astillas para combustión.

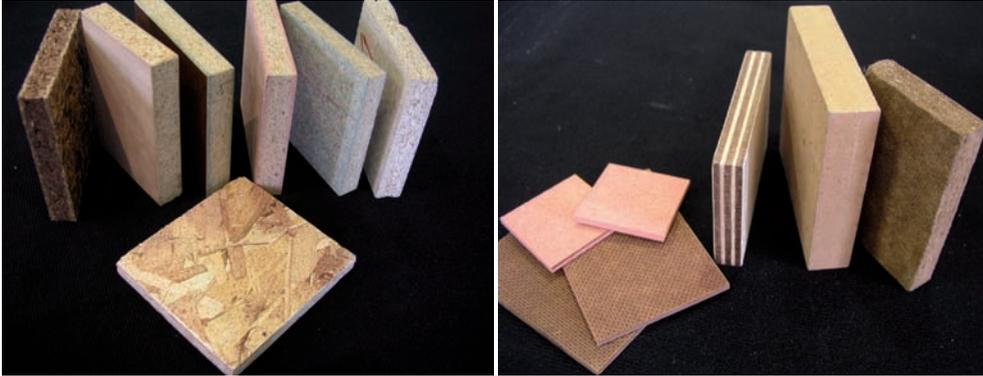


Figura 25. Tableros de partículas y de fibras.

4.2. Productos elaborados

La madera también puede estar presente en gran cantidad de objetos de mobiliario, decoración, carpintería de obra o, incluso, de alimentación, embalaje, limpieza (papeles sanitarios) y comunicación (papeles de impresión, Figura 26). En muchas ocasiones estos productos incorporan tratamientos, pinturas y barnices que pueden hacer difícil detectar la presencia de madera.



Figura 26. Otras presentaciones de la madera.

5 Identificación botánica de la madera

El concepto de identificación botánica de la madera hace referencia a cómo identificar la especie o especies de madera presentes en un determinado producto.

Hasta ahora, en el documento hemos dado unas pinceladas sobre la estructura física de la madera (su anatomía), sobre sus características principales como material para múltiples usos, sobre la posibilidad de agrupar las distintas maderas por usos en función de propiedades similares, así como sobre las más frecuentes presentaciones que tiene en el mercado. Toda esta información resulta necesaria no sólo para comprender el material y la necesidad de emplear diversas técnicas para su identificación sino, también, para ser capaces de identificar su presencia bajo diversas presentaciones.

La dificultad de la identificación de una madera se incrementa notablemente con el nivel de transformación de la misma. Si ya puede ser difícil la identificación de la especie de procedencia de una madera en rollo o aserrada, ésta puede convertirse en un objetivo muy complicado o imposible cuando, por ejemplo, se trata de identificar la especie de la que provienen las fibras presentes en un papel o un tablero.

Los tratamientos aplicados (preventivos, curativos, de acabado, termotratamientos, etc.) y procesos de transformación sufridos (desenrollo, astillado, desfibrado) pueden impedir o dificultar enormemente la posibilidad de aplicar los más modernos sistemas basados en el análisis espectroscópico y genético de su composición interna.

La perfecta trazabilidad del material desde el aprovechamiento al mercado es lo único que puede permitir una identificación segura de una madera. Para conseguir la perfecta trazabilidad de una madera a lo largo de toda su cadena de custodia, que va desde su eslabón como materia prima pasando por los distintos procesos de elaboración a la que es sometida y acabando en los productos finalmente comercializados, es importante que en los diversos documentos que permiten acreditar dicha trazabilidad se la nombre de una forma inequívoca mediante el empleo de su nombre científico. El nombre científico de una especie de madera está compuesto por dos palabras escritas en latín y en cursiva, siendo la primera el nombre del género al que pertenece y la segunda la especie propiamente dicha. Adicionalmente y tras el nombre científico

puede aparecer el nombre de una o más “autoridades” (que son quienes primero describieron la especie). El uso del nombre científico permite evitar las ambigüedades propias de los nombres comunes y comerciales dados en cada país y zona de procedencia a cada especie, ya que pueden ser extremadamente variables. Por ejemplo, el nombre comercial “Cedro” puede hacer referencia a diferentes especies del género *Cupressus*, *Cedrela*, *Juniperus*, *Cedrus*, *Thuja* e, incluso, *Guarea*, según estemos en América del Sur, del Norte, Europa, El Magreb o África. Esto hace que si empleamos este nombre comercial exista permanentemente imprecisión y un riesgo de falta de entendimiento entre el comprador y el vendedor, que se evitaría empleando el nombre científico asociado al nombre comercial en la documentación comercial de acompañamiento del producto.

Además del riesgo comercial, la imprecisión propia del empleo del nombre común generalmente dificultará la evaluación de si existe un riesgo de que la madera del producto sea de origen ilegal (por ejemplo, en el cumplimiento del Reglamento EUTR). El nombre común nos puede impedir reconocer qué especie concreta se está importando y, por tanto, va a dificultar la correcta trazabilidad de una madera desde su origen como mecanismo para asegurar su legalidad y no vamos a poder evaluar qué problemas de ilegalidad existen en el aprovechamiento de esa especie en su lugar de origen. Incluso, ese nombre común podría estar escondiendo el comercio de especies amenazadas en riesgo (por ejemplo, especies CITES) haciéndolas pasar por otras especies de madera anatómicamente muy parecidas, pero más comunes y neutrales.

El empleo del nombre científico y el aseguramiento de la perfecta trazabilidad de la madera desde su origen también son importantes desde un punto de vista científico para la

elaboración de las **claves y bases de datos de referencia** que permiten la posterior identificación de la madera por las distintas técnicas de identificación. Como cada técnica de identificación se basa en el análisis y posterior contrastación de determinados caracteres de la madera, las bases de datos han de contener la información anatómica, genética, molecular o isotópica necesaria para conseguir una identificación con alta fiabilidad. La fiabilidad exigible a las distintas técnicas de identificación se sustenta en gran medida en la incorporación de la variabilidad propia de cada especie, para lo cual han de emplearse muestras perfectamente referenciadas procedentes de todas las posibles zonas de crecimiento. Por la gran dificultad y coste que conlleva su obtención, todavía no existen bases de datos de referencia que cubran todas las especies madereras en todas las técnicas (a excepción de la técnica anatómica en la que sí están muy desarrolladas). Por dicho motivo, ha de ser tenido en cuenta que todavía falta mucho para que se pueda decir que el problema de la identificación botánica (incluyendo el origen) de las maderas está resuelto.

Como norma general la identificación de la madera ha de comenzar con el análisis macroscópico de la misma, continuar con el análisis microscópico y completar, si fuera necesario, con el análisis molecular (químico y/o genético) e isotópico. Considerando todas estas premisas, pasaremos a comentar las técnicas de identificación actualmente existentes.

5.1. Análisis macroscópico previo

El análisis macroscópico supone un primer y necesario paso antes de aplicar el resto de técnicas de identificación. Esta primera fase es siempre fundamental y simplifica mucho el trabajo posterior. En muchos casos, en este primer paso

el experto en maderas lleva a cabo una evaluación rápida de las especies que podrían o no podrían ser, basándose tanto en la diferente información comercial disponible relacionada con el producto como en los datos obtenidos tras el examen visual de la muestra. Por ejemplo, en este primer análisis es posible determinar visualmente si se trata de una madera de frondosa o de conífera y si los caracteres visibles son compatibles, o no, con la especie declarada. Cuando no hay declaración previa de especie pero se conoce el origen del cargamento, su destino final o incluso su precio, a un técnico bien formado estos datos le permiten orientar su indagación posterior. Cuando existe declaración previa de especie, mediante este proceso se puede dar verosimilitud, o no, a la declaración efectuada, si bien la certeza completa solo se podrá adquirir mediante un análisis posterior de la muestra mediante alguna o algunas de las técnicas de identificación que más adelante se explicarán.

Para llevar a cabo el análisis macroscópico visual de la madera es necesario fijarse en el color, en la textura, en el tamaño y características de los anillos, en la dirección de las fibras y en la presencia de elementos visibles a simple vista (radios leñosos, agrupaciones parenquimatosas, espejuelos, etc.). El uso de herramientas ópticas simples como lupas (normalmente de 10 aumentos) o lentes adosadas a teléfonos móviles (normalmente de 24 aumentos, pero pudiendo llegar hasta los 400) permiten apreciar la presencia de otras particularidades anatómicas (especialmente en la sección transversal) como la presencia o ausencia de canales resiníferos, la porosidad, la distribución de los vasos en frondosas, etc. Para ello, normalmente ha de identificarse y refrescarse la sección transversal de la muestra, efectuando un corte limpio con una navaja y, en todo caso, limpiando externamente la superficie de las maderas bajo estudio para poder apreciar su verdadero color. Existen aplicaciones basadas

en el empleo de teléfonos móviles que pueden resultar de enorme utilidad en esta fase.

Además, el técnico tratará de estimar la densidad de la madera mediante rallado con su uña o evaluación exacta de su masa en balanza. Algunos hasta aplicarán la punta de la lengua para notar si pica o no pica, o analizarán el cambio de color de una madera sometida a luz ultravioleta. En ocasiones, hasta el color del agua de cocción de una madera puede informar de las diferencias entre especies. Mediante estas prácticas se pueden llegar a presunciones respecto de qué especie puede o no ser, pero no a decisiones definitivas.

Así, cuando se elaboran fichas descriptivas de especies de maderas destinadas al público en general, normalmente se incluyen fotos del aspecto externo de la madera, datos sobre su densidad y fotos adicionales de la sección transversal tomadas con lupa (normalmente de 10 aumentos). También se suele incluir datos sobre las aplicaciones más habituales que pueden ayudar en la identificación.

En ocasiones, este análisis macroscópico puede ser complementado con otro, efectuado ya en laboratorio en condiciones de iluminación muy controladas y empleando una lupa binocular que permite llegar hasta los 50 aumentos. Este análisis suele ser muy útil al técnico de laboratorio para complementar su juicio respecto a la probabilidad de lo que puede ser la madera que está estudiando (por ejemplo, podría ser madera de pino por presentar canales resiníferos, o de roble por presentar una distribución de vasos en anillo poroso, etc.).

Todos estos datos pueden ayudar al interesado a efectuar una primera valoración sobre la probabilidad de que la madera de la pieza estudiada sea la especie declarada en los documentos comerciales. No obstante, sólo un

análisis completo en laboratorio mediante alguna de las técnicas que seguidamente se expondrán podrán dar certeza a la identificación de una madera.

5.2. Técnica anatómica

Con esta técnica se lleva a cabo una caracterización taxonómica basada en la estructura interna de la madera y siempre se tiene que realizar en laboratorio. Para ello, hay que extraer un cubo de madera del producto a analizar, que suele hacerse mediante serrucho y/o formón (Figura 27). Este cubo debe ser de unos 10 mm de lado y debe



Figura 27. Orientación de la muestra mediante formón.

estar perfectamente orientado, de forma que cada cara represente una sección de referencia (Figura 20). En general suele ser más práctico emplear tres cubos, uno para cada sección, ya que las mordazas del microtomo que se usará en un paso posterior (Figura 28a) suelen dejar marcas en la madera y estropean las superficies a analizar.

Después es necesario someter a los cubos a un proceso de reblandecimiento por cocción a presión atmosférica o en condiciones de vacío, que en ocasiones puede durar más de un día. Este proceso es necesario para poder cortar láminas del cubo durante el paso siguiente. Normalmente, las maderas de coníferas y de densidad baja (por debajo de 500 kg/m^3) no requieren un proceso de reblandecimiento largo, especialmente si están en estado verde (cortada recientemente). Hay varios métodos, técnicas y equipos para llevar a cabo este proceso de reblandecimiento.

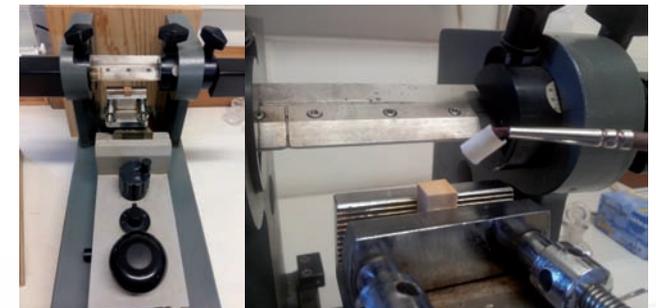


Figura 28. (a) Microtomo de deslizamiento. (b) Láminas obtenidas en el microtomo.

Posteriormente, y mediante el uso de un microtomo de deslizamiento (Figura 28a), se cortan láminas de madera (Figura 28b) de entre 10 y 20 micras de cada una de las tres secciones (transversal, tangencial y radial). Las láminas obtenidas son teñidas con safranina (Figura 29) que permite poder observar mejor los caracteres

anatómicos y, finalmente, son sometidas a un proceso de deshidratación para su posterior montaje (Figura 30).



Figura 29. Tinción de las láminas.

Por último, mediante la observación por microscopía óptica (Figura 31), se lleva a cabo la descripción de los elementos anatómicos según el Código establecido por IAWA Committee (2004) para la identificación de coníferas y IAWA Committee (1989) para la identificación de frondosas. Para ello será necesario observar y analizar las tres secciones (transversal, tangencial y radial), ya que cada una de ellas nos dará información sobre unos

determinados caracteres anatómicos (Figuras 32a, 32b y 32c). Los elementos anatómicos identificados se compararán con claves anatómicas nacionales e internacionales como Inside Wood (Figura 33), promovida por la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA), así como colecciones de preparaciones microscópicas reconocidas para llevar a cabo la identificación de la madera.

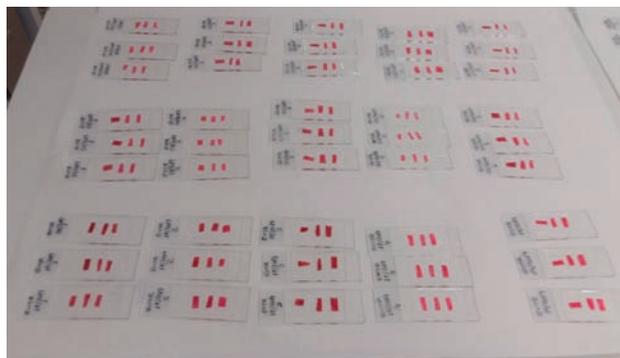


Figura 30. Preparaciones microscópicas.

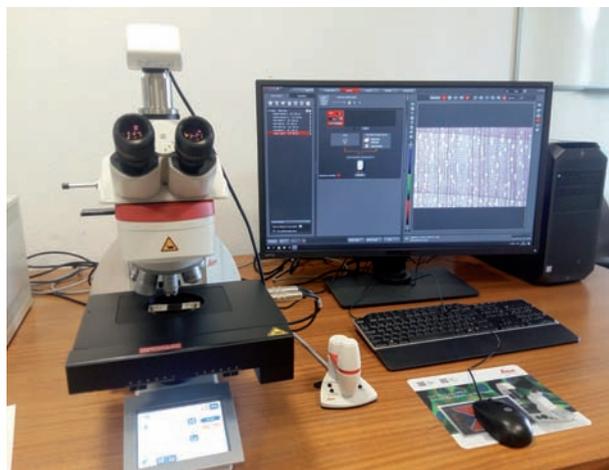


Figura 31. Análisis de los caracteres anatómicos en microscopio óptico (INIA).

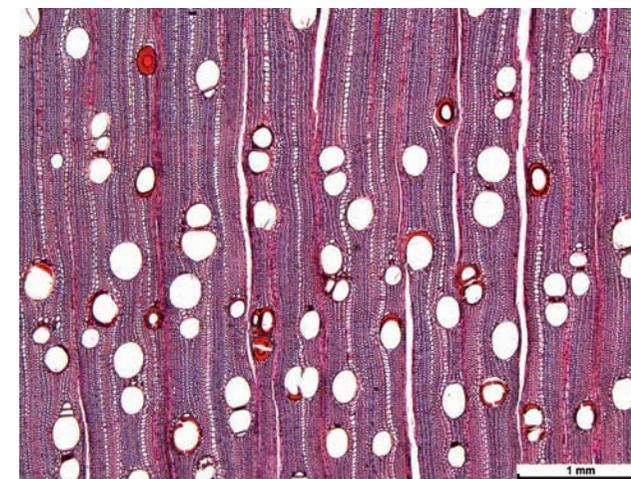


Figura 32a. Caoba africana (*Khaya ivorensis*). Sección transversal.



Figura 32b. Caoba africana (*Khaya ivorensis*). Sección tangencial.

Cuando la identificación es necesaria para confirmar o descartar si una madera coincide o no con la especie declarada, en la mayoría de los casos la técnica anatómica permite realizar esta discriminación, aunque

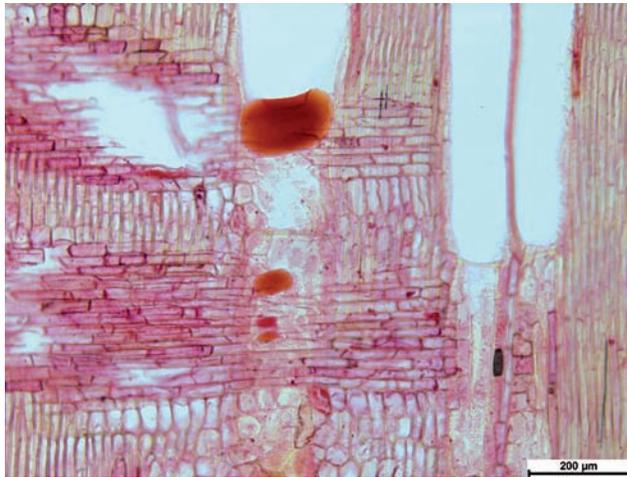


Figura 32c. Caoba africana (*Khaya ivorensis*). Sección radial.

efectúa sobre madera de duramen de frondosas en tres posibles estados: i) con la superficie recién refrescada (con navaja), ii) humectada con agua y iii) tratada superficialmente con etanol al 95%, sometiendo a las muestras así preparadas a la acción de la luz ultravioleta. El test de saponificación, que se basa en la identificación de la presencia de saponinas, se lleva cabo introduciendo una pequeña cantidad de serrín o de pequeñas virutas de la madera bajo estudio en un pequeño recipiente hermético con agua destilada, que tras una intensa pero corta agitación es analizada visualmente.

IAWA Feature#	Feature Description	Feature Code Options
Growth Rings		
1	Growth ring boundaries distinct	Present
2	Growth ring boundaries indistinct or absent	Absent
Vessels		
Porosity		
3	Wood ring-porous	Required Present
4	Wood semi-ring-porous	Required Absent
5	Wood diffuse-porous	
Vessel arrangement		
6	Vessels in tangential bands	Present
7	Vessels in diagonal and / or radial pattern	Required Present
8	Vessels in dendritic pattern	Required Absent
Vessel groupings		
9	Vessels exclusively solitary (90% or more)	
10	Vessels in radial multiples of 4 or more common	
11	Vessel clusters common	
Solitary vessel outline		
12	Solitary vessel outline angular	
Perforation plates		
13	Simple perforation plates	
14	Scalariform perforation plates	
15	Scalariform perforation plates with ≤ 10 bars	
16	Scalariform perforation plates with 10 - 20 bars	
17	Scalariform perforation plates with 20 - 40 bars	
18	Scalariform perforation plates with ≥ 40 bars	
19	Reticulate, foramine, and / or other types of multiple perforation plates	
Intervessel pits: arrangement and size		
20	Intervessel pits scalariform	
21	Intervessel pits opposite	
22	Intervessel pits alternate	
23	Shape of alternate pits polygonal	
24	Minute - ≤ 4 μm	
25	Small - 4 - 7 μm	
26	Medium - 7 - 10 μm	

Figura 33. Base de datos Inside Wood (IAWA).

muchas veces sólo permitirá llegar a la identificación del género (*Pinus* spp., *Quercus* spp., *Eucalyptus* spp., etc). Sin embargo, en aquellas ocasiones en que se requiera realizar identificaciones *ex novo* (sin tener ninguna referencia de qué posible especie se trata) o se necesite identificar de forma fehaciente la especie (por ejemplo, para descartar que la madera no sea de una especie CITES), el apoyo de otras técnicas de identificación complementarias será fundamental. Antes de aplicar las técnicas genéticas y químicas que más adelante se explicarán, puede ser de utilidad aplicar, cuando sea posible, dos sencillas técnicas complementarias que si bien no están basadas en el análisis de la estructura de la madera sí están presentes en todos los laboratorios de anatomía de la madera. Se trata de las técnicas de fluorescencia y saponificación.

Las técnicas de saponificación y fluorescencia se llevan a cabo sobre el duramen y solo son aplicables a las maderas de frondosas. El test de fluorescencia se

➤ Consejos clave

Nos interesará que las muestras de madera que se extraigan para la identificación de la especie tengan tanto albura como duramen para poder aplicar todas las técnicas de identificación posibles, incluida la genética. Sólo se aconseja extraer muestras constituidas íntegramente por duramen en el caso de que el objetivo del muestreo fuera la confirmación de una especie declarada previamente para la que se supiera no existe posibilidad de aplicar la técnica genética.

A continuación, mostraremos las técnicas que actualmente son más prometedoras, aunque para una revisión exhaustiva aconsejamos consultar el trabajo de Dormontt y col., (2015).

5.3. Técnica genética

El ADN (Ácido Desoxirribonucleico) es la molécula en la que se encuentra codificada toda la información genética de un organismo en forma de genes. Se trata de un sistema similar al de la escritura en el que la información, en vez de con letras, está codificada químicamente, empleando cuatro bases nitrogenadas (adenina, citosina, timina y guanina) que suelen representarse con las letras A, C, T y G. Al igual que ocurre con los seres humanos, cada árbol tiene una información genética única y característica (*genotipo*), que está en cada célula del árbol y por tanto en las de la madera y que, a diferencia de lo que ocurre con la documentación en papel o soporte informático, no puede ser falsificada.

El genotipado es el proceso por el cual se determinan los caracteres genéticos (genotipo) de un organismo mediante el análisis de su ADN. Se lleva a cabo

empleando una serie de técnicas analíticas (pruebas genéticas) que implican la extracción y purificación del ADN de la muestra, el desarrollo de análisis moleculares (genotipado) y la interpretación de los resultados.

Extracción del ADN

Para estudiar el ADN de una planta, lo ideal es extraer este ADN de tejidos en los que pueda encontrarse en gran cantidad, por ejemplo, de hojas jóvenes en expansión, que contienen un gran número de células vivas multiplicándose activamente. La madera, sin embargo, está formada en gran medida por células muertas en las que el ADN se ha degradado. Por eso, en la medida de lo posible, la toma de muestras debe realizarse en secciones que contuvieran mayor cantidad de células vivas en el momento de la tala del árbol. Estos tejidos comprenden la parte más externa del tronco evitando la corteza y el duramen (ver apartado 2.2. y Figura 4). Cuando esto no sea posible, por ejemplo en el caso de madera cortada en forma de tablones o con muebles, conviene intentar evitar el duramen, ya que el proceso de duraminización degrada el ADN tal como se adelantó en el apartado 2 de estructura anatómica de la madera. También es conveniente evitar las zonas tratadas (con termotratamientos o productos químicos, barnices, etc.), dado que los tratamientos con altas temperaturas destruyen el ADN y los compuestos químicos pueden interferir tanto en el proceso de la extracción del ADN como en las reacciones químicas de los procesos de genotipado.

Para la extracción del ADN la muestra debe molerse hasta obtener un polvo muy fino empleando diversos métodos, desde manuales (por ejemplo, empleando morteros) hasta sistemas automáticos de molienda. En cualquier caso, debe llevarse a cabo a temperaturas muy

bajas, utilizándose frecuentemente nitrógeno líquido a -195°C , debiendo ser posteriormente conservado a -80°C , con objeto de evitar una mayor degradación del ADN. A continuación, la muestra pulverizada se somete a una serie de procesos físicos y químicos para aislar y purificar el ADN. Tanto el proceso de extracción como la posterior amplificación debe realizarse en un área desinfectada (herramientas esterilizadas) y con sumo cuidado, con el fin de no dañar o contaminar la muestra.

Amplificación del ADN

Normalmente, las regiones del genoma que se quieren estudiar son muy específicas, y casi no hay copias en el genoma de la especie de manera natural. Las tecnologías actuales de análisis no son capaces de detectar esas pocas copias, porque necesitan mayores cantidades para realizar un estudio profundo y detallado del material genético. Así, para resolver esta limitación y una vez extraído el ADN, la mayoría de las aproximaciones implican la realización de una primera fase de “amplificación del ADN” para obtener un número suficiente de copias de ADN que permita, en una segunda fase, su análisis o su visualización. Para ello, se amplifican las regiones a analizar generando millones de copias, lo que se consigue mediante la técnica de la *reacción en cadena de la polimerasa* o *PCR* (del acrónimo inglés de *polimerase chain reaction*).

Análisis genético

Aunque en la actualidad es posible secuenciar el genoma completo de un individuo, la identificación de especies requiere el empleo de técnicas que permiten dirigir el análisis a regiones del genoma que sean especialmente informativas, empleando marcadores genéticos (en

muchos casos denominados marcadores moleculares), que sean característicos de la especie o incluso del individuo.

Los marcadores moleculares son segmentos de ADN que informan de las variantes existentes en zonas concretas del genoma. Por lo tanto, un conjunto de marcadores moleculares constituye un grupo de puntos de referencia para el análisis del genoma, de modo similar a puntos kilométricos en un mapa de carreteras. Así, para validar que una muestra de madera pertenezca o no a una determinada especie, es posible genotipar dicha muestra determinando las variantes que presenta en cada marcador analizado, obteniendo así el genotipo de la muestra. A continuación, los datos del genotipo de la muestra se compararán con los genotipos de una serie de muestras de referencia de dicha especie y de otras especies con las que pueda haber problemas de identificación, de forma que por similitud se identifique la especie.

El genotipado mediante marcadores moleculares puede llevarse a cabo empleando varias aproximaciones. En la Figura 34 (A) y (B) se muestran algunas de las más comunes, así como ejemplos de la visualización de perfiles genéticos que se obtienen con ellas:

- **Secuenciación.** Consiste en la determinación de la secuencia de nucleótidos de la muestra para una o varias regiones del genoma (o de genes) que sean especialmente informativas.
- **Análisis de fragmentos.** Son técnicas que permiten determinar el tamaño de los fragmentos (el número de nucleótidos A, C, T y G) que hay entre dos secuencias previamente conocidas. Es el caso del genotipado mediante marcadores moleculares de

tipo microsatélite, que permite detectar cambios en el número de repeticiones en tándem de un motivo (esto es, de una combinación de un número reducido de nucleótidos).

- Genotipado de SNP (del inglés *Single Nucleotide Polymorphism*). Permite identificar qué base hay en una determinada posición del genoma de la muestra analizada, detectando así diferencias en la composición de un único nucleótido entre individuos.

La elección de una u otra aproximación dependerá del objetivo del análisis (identificación o validación de especies u orígenes), de la biología de la especie o grupo de especies y de la información genética disponible. Por tanto, el ADN amplificado se analizará en función del tipo de la técnica de genotipado seleccionada, bien secuenciando dicha región (secuenciación de genes), o determinando su tamaño (microsatélites), o bien determinando el nucleótido que aparece en posiciones concretas del genoma (SNP).

Análisis de los resultados

El resultado de los análisis moleculares será la obtención de un genotipo para la muestra. En la Figura 34 se pueden observar algunos ejemplos de los genotipos generados mediante técnicas genéticas: una secuencia de nucleótidos, en el caso de la secuenciación; un listado de tamaños alélicos en pares de bases, en el caso del estudio de regiones microsatélite; o un listado de las variantes nucleotídicas que se encuentran en determinadas posiciones, en el caso de genotipado de SNP. Normalmente se obtendrán dos variantes para cada posición analizada (que pueden ser iguales o no), que en los individuos diploides corresponden a los

alelos heredados por el individuo de cada uno de sus progenitores.

Independientemente de si el genotipo de la muestra problema se establece mediante el estudio de secuencias de genes o mediante la utilización de algún tipo de tecnología de marcadores moleculares, siempre será necesario compararlo con los existentes en una base de datos que contenga los genotipos de una serie de muestras clasificadas como pertenecientes a la especie en cuestión y georreferenciadas. El resultado del análisis depende en gran medida de lo representativa que sea la base de datos construida con las muestras de referencia, es decir, de lo bien representada que estén en ella la variabilidad de las especies y sus áreas de distribución.

➤ *Ideas clave*

Las técnicas genéticas se basan en el estudio del ADN que hay en la madera. Al igual que los seres humanos, cada árbol tiene un ADN único, que no se puede falsificar, y que está en cada célula de la madera. Podemos emplear una serie de técnicas moleculares para estudiar ese ADN y determinar el genotipo que tiene una determinada madera. En ocasiones basta con estudiar unas pocas posiciones puntuales preestablecidas en el genoma, mientras que en otros casos es necesario analizar (secuenciar) fragmentos más grandes.

En cualquier caso, en el proceso de identificación de una madera mediante herramientas genéticas siempre tendremos que desarrollar tres fases. En primer lugar, hay que extraer y purificar el ADN de la muestra. Después hay que realizar las pruebas moleculares que sean pertinentes e interpretarlas para obtener su genotipo.

Finalmente, se compara ese genotipo con los que ya tenemos en una base de datos de referencia, que incluye una serie de individuos de la misma especie y de especies cercanas que cubran lo mejor posible la diversidad que existe en ellas. De este modo es posible identificar la especie y, en algunos casos, incluso el origen geográfico de la madera en cuestión. El alcance de esta técnica es mucho mayor que en caso del análisis anatómico pero, a diferencia de lo que ocurre con el análisis anatómico, el problema es que para muchas especies no existen aún esas bases de datos de referencia de datos genéticos. Por eso, ahora mismo no es posible identificar cualquier madera mediante métodos genéticos. En la actualidad se está trabajando a nivel internacional y de un modo coordinado en el desarrollo de colecciones de referencia (bases de datos de maderas de diferentes especies) para las especies más problemáticas, de manera que sean de utilidad pública.

Por su elevado precio, esta técnica sirve de apoyo para aquellos casos en los que no sea posible llegar a la identificación de especie empleando la técnica anatómica.

➤ *Consejos clave*

En los casos en los que existan las bases de datos necesarias para la identificación genética de las especies de interés, es importante priorizar la toma de muestras en zonas de albura porque será el lugar con mayores posibilidades de poder emplear la técnica genética como complemento a la de identificación anatómica. Esto no supondrá problemas para el análisis anatómico, ya que la estructura anatómica de la madera de albura y de duramen es similar.

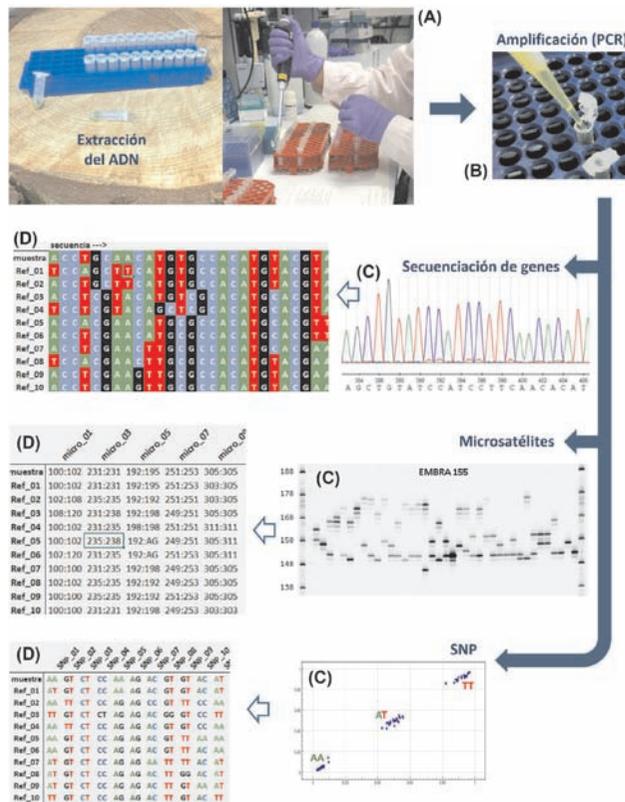


Figura 34. Etapas de la identificación de muestras de madera mediante técnicas genéticas: Extracción del ADN (A), amplificación mediante PCR (B), visualización de los resultados (C) y determinación del genotipo (C y D), que implica la obtención de secuencias y tablas de genotipos.

5.4. Técnicas espectrométricas (SVS)

Conceptos generales

Las tecnologías NIRS (Near Infrared Spectroscopy – Espectroscopía de Infrarrojo Cercano) y FTIR (Fourier-

Transform Infrared Spectroscopy– Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier) están dentro de la espectroscopía, que es la rama de la física y la química que estudia la interacción entre la radiación electromagnética (que es una forma de energía que se debe al movimiento de las partículas con carga eléctrica) y las moléculas.

Se trata de técnicas de espectroscopía vibracional, es decir, aquellas en las que el análisis de las propiedades de las moléculas se realiza basándose en las vibraciones a nivel molecular. Al ser emitida una radiación infrarroja sobre una muestra, la radiación interacciona con las moléculas de la muestra dando lugar a un espectro único para dicha muestra, llamado huella espectral (a modo de *huella dactilar*). Otra característica de estas técnicas es que están basadas en la absorción. En los métodos de absorción, la muestra se expone a un rango de longitudes de onda de la luz. Hecho esto, la cantidad de luz absorbida por la muestra se compara con una referencia produciéndose un espectro.

La región del infrarrojo va de 12.800 a 10 cm^{-1} y se puede subdividir en 1) región de Infrarrojo cercano (NIR) (12.500-4.000 cm^{-1}), 2) región de infrarrojo medio (4.000-400 cm^{-1}) y 3) Infrarrojo lejano o FAR-IR (50-400 cm^{-1}).

De las dos tecnologías espectroscópicas mencionadas, la denominada como NIR (la basada en el empleo del infrarrojo cercano) es la más ampliamente empleada para la identificación de maderas, si bien la tecnología FTIR (la basada en el empleo de la región media del infrarrojo) está dando también muy buenos resultados.

Tal y como se ha indicado, la tecnología NIR analiza y caracteriza los materiales haciendo uso de radiación del infrarrojo cercano. El origen del infrarrojo cercano se debe a los sobretonos y combinaciones de las vibraciones

fundamentales del infrarrojo medio. Sin embargo, en la zona NIR no aparecen bandas correspondientes a vibraciones fundamentales, por lo que las bandas que aparecen son anchas y de intensidad menor que las bandas que aparecen en el resto del infrarrojo. Las bandas observadas en NIR surgen predominantemente del estiramiento de los enlaces O-H, C-H y N-H y están presentes en casi cualquier sustancia que contenga hidrógeno unido covalentemente. En relación con la madera, esto significa que la tecnología NIR aportará información sobre grupos químicos de alto peso presentes en celulosa, hemicelulosa, lignina y moléculas extractivas (resina, gomas, etc.) que aparecen en la madera.

Una característica de la zona NIR es que es sensible a las interacciones entre moléculas, como puentes de hidrógeno, por lo que un espectro NIR también incorpora información sobre las interacciones moleculares de las sustancias.

La elevada complejidad de la región NIR hace imprescindible la utilización de técnicas estadísticas multivariantes que permitan entender e interpretar los espectros NIR compuestos por varios millares de variables. Así, se trata de un método indirecto, en el que los valores de absorbancia de un espectro se relacionan con una o varias propiedades físicas o químicas de una muestra mediante un modelo de calibración multivariante, el cual puede ser cuantitativo o cualitativo. Los modelos cualitativos sirven para diferenciar una muestra de otra y son especialmente útiles para la identificación de materias primas e incluso para diferenciar entre procedencias. Los modelos cuantitativos sirven para determinar la cantidad de algún componente químico o la magnitud de alguna propiedad física.

El proceso de elaboración de un modelo de calibración que permita predecir una propiedad concreta a partir de un espectro NIR se compone de los siguientes pasos:

1. Selección del grupo de aprendizaje o colectivo de calibración: Debe seleccionarse un conjunto de muestras representativas de toda la variabilidad física y química del colectivo objeto de estudio. En general, cuanto mayor sea el número de muestras que constituyan el grupo de aprendizaje mayor capacidad de predicción presentará el modelo de calibración.
2. Toma de los datos de referencia: Se debe medir la propiedad que se quiere determinar en las muestras que forman el grupo de aprendizaje empleando para ello el método de referencia. Por ejemplo, si se quiere elaborar un modelo cualitativo que estime el porcentaje de humedad de una serie de muestras a partir de los espectros NIR de dichas muestras, se debe medir el contenido en humedad de cada muestra utilizando el método habitual o método de referencia. Es importante que los datos obtenidos sean precisos y exactos, ya que condicionan la capacidad de predicción del futuro modelo calibración.
3. Pretratamiento de los espectros: Como se ha mencionado anteriormente, los espectros obtenidos en la región NIR son complejos, el pretratamiento de los espectros permite eliminar o minimizar la información redundante y no relevante y reducir el nivel de ruido espectral. Existen dos tipos de pretratamientos, por un lado, los destinados a disminuir el efecto negativo de la dispersión de la radiación incidente o *efecto scatter*, entre los que destacan la normalización vectorial (SNV) o la corrección multiplicativa de la dispersión (MSC) y, por el otro lado, los tratamientos de derivadas destinados a disminuir dos problemas que presentan

los espectros NIR, como son la superposición de los picos de absorción y las variaciones de la línea base de los espectros.

4. Construcción del modelo de calibración: Es el proceso mediante el cual se construye un modelo de calibración a partir de los espectros medidos y de los datos de referencia, que permite establecer una relación matemática entre los valores de absorbancia y los valores de la propiedad analizada. Para la construcción del modelo existen distintos métodos como la regresión lineal múltiple o la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) entre otros.
5. Validación: Permite determinar la capacidad de predicción que tiene el modelo de calibración desarrollado. Existen dos tipos de validación:
 - a. Validación externa: Emplea distintas muestras a las empleadas en la etapa de calibración. Por, tanto, se establecen dos grupos de muestras distintas: grupo de calibración y grupo de validación.
 - b. Validación cruzada: Emplea las mismas muestras usadas en la calibración.

En resumen, para estimar alguna variable o característica de interés con NIR, previamente hay que elaborar un modelo de calibración. Una vez que se ha desarrollado un modelo de calibración, ya sea cuantitativo o cualitativo, se pueden realizar análisis en rutina. En el análisis en rutina se toman los espectros NIR en nuevas muestras y se aplica el modelo de calibración que da una predicción instantánea de la propiedad que se quiere determinar.

Entre las principales ventajas del NIR frente a otras técnicas de laboratorio tradicionales se encuentran las siguientes:

1. Su naturaleza no destructiva (no hay que romper la muestra para analizarla).
2. Es un análisis rápido, ya que una vez que se tiene el modelo de calibración, la medida de la muestra se obtiene en escasos segundos.
3. Es un análisis barato para los análisis en rutina, que haya que hacer con frecuencia, ya que una vez adquirido el equipo NIR no se requiere mayor inversión posterior.
4. No es necesaria la preparación previa de la muestra, aunque los tratamientos que se hayan dado a la muestra (por ejemplo, barnizado o pintura en el caso de madera) pueden desvirtuar los resultados.
5. Admite todo tipo de muestras: sólida, líquida o gaseosa.
6. Es una técnica multi-atributo, ya que con una sola medida (un solo espectro) se pueden determinar varias variables a la vez.
7. Es una técnica muy versátil, ya que puede emplearse fuera del laboratorio, tanto en la propia línea de producción (*in-line*) como *in-situ*.
8. No emplea ningún tipo de reactivo en el análisis y, por tanto, no genera residuos.

Por el contrario, entre los principales inconvenientes del NIR se encuentran los siguientes:

1. Es una técnica indirecta que requiere de un modelo de calibración. Es decir, la huella espectral obtenida del análisis debe introducirse en modelos de calibración para poder ser interpretada.
2. El desarrollo del software para el análisis es largo.
3. El trabajo preliminar (calibración y validación) es laborioso e importante, ya que se requiere un número relativamente elevado de muestras para que el modelo de calibración tenga una capacidad de predicción adecuada.

4. Es necesario un modelo de calibración para cada tipo de muestra, es decir, un modelo desarrollado para muestras de madera maciza no sirve para muestras de tablero tratado.
5. Los espectros obtenidos por diferentes equipos NIR difieren por diversos motivos, lo que no permite la transferencia directa de modelos entre diferentes equipos.
6. El análisis del NIR procede exclusivamente de la capa exterior. Por tanto, mediciones destinadas a diferenciación de especies de madera pueden sufrir errores en sus resultados debido a los efectos de otras variables como variaciones de humedad, rugosidad superficial o diferentes procesados de la madera.

Aplicaciones en el sector maderero

La mayoría de las aplicaciones que pueden encontrarse en la bibliografía para la tecnología NIR hacen referencia al control de calidad de productos agroalimentarios (cereales, frutas y hortalizas, carnes, etc.), siendo este el campo donde inicialmente se desarrolló esta tecnología y en el que ha alcanzado una gran evolución. Sin embargo, hoy en día la tecnología NIR se ha incorporado a muchos otros sectores como la industria farmacéutica, petroquímica, textil, etc.

En el sector maderero su empleo es relativamente moderno, aunque está aumentando el número de aplicaciones desarrolladas. Se considera de gran potencialidad en la identificación de maderas en campo, aunque su estado de desarrollo resulta aún muy incompleto y desigual.

Entre las aplicaciones desarrolladas cabe destacar:

- 1) La determinación de la humedad (ya que el rango espectral NIR incluye información sobre la humedad de la muestra) y/o la densidad (que puede ser estimada a partir de la relación con los tres principales componentes químicos de la madera, es decir, celulosa, hemicelulosa y lignina).
- 2) La evaluación de propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad (MOE), el módulo de rotura (MOR), la resistencia a compresión, la dureza, etc.
- 3) La determinación de la composición química, porcentaje de lignina, celulosa o extractivos.
- 4) La clasificación de maderas por especie y/o procedencias.
- 5) La predicción de parámetros anatómicos, como el ángulo de la microfibrilla (MFA), la contracción de la madera, o la predicción del grosor de la pared celular.
- 6) La evaluación del comportamiento de madera en servicio (ej. presencia de pudriciones).
- 7) La caracterización de madera arqueológica.

Además de las anteriores aplicaciones, también se utiliza actualmente en los procesos de control en la industria del tablero para la clasificación de astillas, o en la industria de la chapa para la determinación de la humedad o la densidad.

➤ *Consejos clave:*

Para evitar errores, la aplicación de esta técnica requiere limpiar la superficie de la madera, eliminando todo rastro de suciedad y de tratamientos químicos de acabado superficial (Ej. ceras y barnices). No es, por tanto, una técnica adecuada para ser usada con fines de identificación de madera tratada en profundidad.

La técnica está en desarrollo y tan sólo es aplicable en un reducido número de especies de madera.

5.5. Técnica de espectrometría de masas (DART-TOFMS)

La espectrometría de masas es una herramienta analítica muy potente, de aplicación en ámbitos muy variados. Básicamente, consiste en obtener los **espectros de masas** de una muestra, que refleja su composición química (su **perfil químico**) y podríamos decir que es un equivalente a su huella dactilar. Esto se consigue convirtiendo los componentes de la muestra en iones gaseosos que se mueven rápidamente en presencia de un campo magnético y se separan en función de su relación masa/carga. Estos espectros aportan información sobre la estructura de compuestos moleculares complejos, las relaciones isotópicas de los átomos en las muestras y la composición cualitativa y cuantitativa de compuestos orgánicos e inorgánicos en muestras complejas. Se genera así el perfil químico característico de una muestra, de forma que mediante un análisis estadístico multivariante que compara los perfiles obtenidos para diferentes muestras, se puede determinar cómo de relacionadas están dichas muestras (es decir, cómo de similares son).

Existen varias técnicas cromatográficas que, acopladas al espectrómetro de masas, permiten optimizar la separación e identificación de los metabolitos. Debido al requisito de ionización en vacío, casi todas ellas requieren una larga y complicada etapa previa de preparación de la muestra. Sin embargo, el análisis directo en tiempo real con espectrometría de masas por tiempo de vuelo (DART-TOFMS: *Direct Analysis in Real Time-Time Of Fly Mass Spectrometry*) es una técnica de reciente desarrollo que no tiene ese requerimiento. La tecnología DART-TOFMS permite obtener instantáneamente el perfil químico de muestras en cualquier estado en condiciones medioambientales, sin la necesidad de llevar a cabo complejas manipulaciones del material.

Con relación al análisis de muestras de madera, esto significa que la tecnología DART-TOFMS permite gran rapidez en el análisis de la muestra (inferior al minuto) al reducir la preparación a simplemente obtener una fina lámina de madera. Esto es una gran ventaja frente a otras técnicas que usan el espectrómetro de masas, que deben ser optimizadas para cada especie analizada y requieren un trabajo previo de obtención de extractos de la muestra o ADN. Esta escasa preparación de la muestra permite utilizar esta técnica no sólo sobre madera y productos derivados sino también en productos no madereros como resinas, aceites, etc. Por otro lado, su muy bajo coste de análisis por muestra la convierte en una de las herramientas más potentes para la rápida identificación de maderas, capaz de discriminar maderas de especies muy relacionadas e, incluso, orígenes diferentes. Esta técnica es, de hecho, la aproximación que emplea el *U.S. Fish and Wildlife Service* del U.S. Forest Service (EE.UU.) para identificar las especies protegidas por el convenio CITES cuando la identificación anatómica no lo permite.

Al igual que ocurre con otros métodos químicos y con los genéticos, y en general con todas las técnicas de identificación, la utilización del DART-TOFMS para la identificación de una madera se basa en la comparación del perfil químico obtenido para la muestra con los existentes en una base de datos de muestras de referencia que represente adecuadamente la diversidad en la especie problema y otras especies relacionadas. De forma similar a lo ya comentado anteriormente sobre el efecto que sobre las características físico-mecánicas de una determinada especie producen las condiciones de crecimiento, la composición química de una madera también puede variar de forma sustancial por diversas causas, tales como: i) su genotipo (es decir, de su ADN como árbol), ii) el medioambiente circundante (clima, suelos), iii) el proceso de crecimiento (Ej. natural o

cultivado), iv) el envejecimiento, v) el procesado, vi) los tratamientos aplicados, etc. Estas variaciones harán posible varios niveles de identificación en una muestra de madera: género, especie, silvestre vs. cultivado, procedencia geográfica, etc. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esto sólo será posible cuando esos grupos o niveles de diferenciación estén bien definidos y estudiados, y además haya suficiente material representativo incluido en la base de datos de referencia que represente toda la variación que es posible encontrar durante los análisis.

La tecnología DART-TOFMS puede aplicarse sobre cualquier madera, conífera o frondosa, e incluso a maderas tratadas, permitiendo obtener resultados muy rápidamente. Sin embargo, aún son muy pocas las especies para las que esta herramienta ha sido optimizada y se han generado las bases de datos necesarias. Aun así, en el momento actual es posible emplear la tecnología DART-TOFMS para diferenciar madera de *Swietenia macrophylla* de la de otras seis especies taxonómicamente distantes, pero visualmente indistinguibles. Del mismo modo es posible: a) discriminar madera de *Dalbergia nigra*, especie incluida en CITES, de la de otros 15 congéneres; b) diferenciar entre 12 especies de *Dalbergia* y otras ocho especies relacionadas; c) separar las *Dalbergia* de Madagascar de las *Dalbergia* de África y Asia; d) diferenciar entre dos especies de roble americano (*Quercus alba* y *Q. rubra*); e) diferenciar entre especies de *Aquilaria* y otras 25 maderas fragantes; f) diferenciar maderas de abeto de Douglas procedentes de dos regiones de origen en el oeste de Oregón; o g) distinguir *Araucaria araucana* de *A. angustifolia* y *A. heterophylla*, por un lado, y de *Agathis australis* y *Wollemia nobilis*, por otro.

Para terminar, resulta interesante destacar algunas consideraciones sobre esta técnica:

- El análisis fitoquímico utilizando métodos de espectrometría de masas mediante DART-TOFMS es una excelente opción para la identificación forense de madera de forma rutinaria en el futuro.
- Aunque los equipos que se necesitan son muy costosos, luego es posible obtener rápidamente los resultados de los análisis.
- Permite desarrollar bases de datos para compartir la información entre laboratorios muy fácilmente.
- Actualmente, solo hay un reducido número de maderas para las que se ha desarrollado la metodología necesaria. Se está trabajando intensamente en este campo.
- Puede aplicarse a cualquier madera, conífera o frondosa, e incluso a maderas tratadas.
- Permite discriminar especie y origen de la madera.
- Para el análisis es necesaria muy poca cantidad de muestra y un procesado mínimo.

5.6. Técnica isotópica

La técnica isotópica, también conocida por su acrónimo SIRA, procedente de su nombre en inglés: *Stable Isotope Ratio Analysis*, es una técnica que estudia la relación de los isótopos estables de determinados elementos químicos presentes en una muestra de madera mediante espectrometría de masas, permitiendo con ello la identificación de la zona geográfica de procedencia del árbol del que procede, a su vez, la muestra analizada.

A diferencia de las otras técnicas presentadas en este trabajo, esta técnica se utiliza en la actualidad únicamente para la determinación del origen geográfico de una madera, ya sea identificando positivamente la localización o descartando localizaciones improbables. Sin embargo, es todavía una técnica incipiente que

necesita incrementar el número de especies y orígenes incluidos en las bases de datos de referencia. La técnica analítica de isótopos estables no tiene, de momento y por sí misma, capacidad suficiente para determinar el género, la especie o el árbol de procedencia a partir de una muestra de madera.

Esta metodología se basa en que cualquier material orgánico del planeta se compone de elementos químicos, especialmente carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Estos elementos se presentan en la naturaleza con el mismo número de protones y electrones pero con un número variable de neutrones en su núcleo y, por tanto, con diferentes masas atómicas que se denominan “isótopos”. Es común asociar el término “isótopo” a “radiactivo”, sin embargo, los isótopos estables, los que no se descomponen con el tiempo, son los más abundantes en la naturaleza. Las proporciones de los diversos isótopos estables fluctúan en la naturaleza y se correlacionan con las variables climatológicas, biológicas y geológicas. Si se analiza la relación entre los diferentes isótopos de un mismo elemento que están presentes en un determinado material natural con una determinada procedencia, se puede llegar a concluir que dicha relación entre isótopos sea característica de ese material natural y esa procedencia en concreto, por lo que se dispondrá de una potente herramienta forense para verificar la autenticidad geográfica.

Respecto a la cuestión “¿Por qué esta relación de isótopos tiene carácter distintivo?” ha de ser tenido en cuenta que la biomasa se compone de los materiales disponibles en su entorno circundante, por lo que la composición de los isótopos del medio ambiente se reflejará en la biomasa. Así, un producto proveniente de un determinado lugar puede mostrar una composición de isótopos muy distintiva, que no coincide con la del mismo producto

proveniente de otro lugar. Por consiguiente, cualquier producto orgánico natural, y por tanto la madera, lleva en sí mismo una “etiqueta” natural llamada “huella digital isotópica” para esa ubicación.

En concreto, las plantas absorben distintos elementos químicos a través del agua (hidrógeno, oxígeno), de los nutrientes del suelo (azufre, estroncio, nitrógeno) y de la fotosíntesis (carbono, oxígeno).

El agua juega un papel esencial para el SIRA, ya que la relación de isótopos de hidrógeno (D/H) y oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) en el agua de lluvia depende principalmente de la temperatura anual en la zona y, en menor grado, de la influencia de la altitud, la latitud y el “efecto continental”. Como resultado, hay una gran variabilidad geográfica en el patrón isotópico de las aguas, que serán absorbidas por las plantas, y que puede relacionarse con cada localización.

La relación de isótopos de carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en la madera viene definida por las rutas fotosintéticas utilizadas en la planta, que no presentan variaciones geográficas, lo que no será relevante en el SIRA. Sin embargo, los ratios de carbono también dependen de la conductancia de los estomas y la asimilación fotosintética, y ambos procesos están influidos por factores ambientales como la humedad, la luz y la temperatura. Por tanto, la relación de isótopos de carbono en una madera reflejará el clima local y va a añadir mayor resolución a la determinación del origen geográfico mediante SIRA.

La relación de isótopos de elementos como nitrógeno ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) y azufre ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) es independiente de la especie o el clima, ya que reflejan la identidad geológica o del suelo, por lo que son indicadores a un nivel local. Algo similar a lo que ocurre con el estroncio ^{87}Sr , que se forma

en la naturaleza por la desintegración del rubidio-87, reflejando la edad geológica del área, por lo que se podrá utilizar la ratio de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en la localización geográfica de las maderas.

Además, estas relaciones de isótopos se pueden utilizar por separado o conjuntamente, con lo que se obtendrá un mayor grado de información y de seguridad en la determinación del origen geográfico.

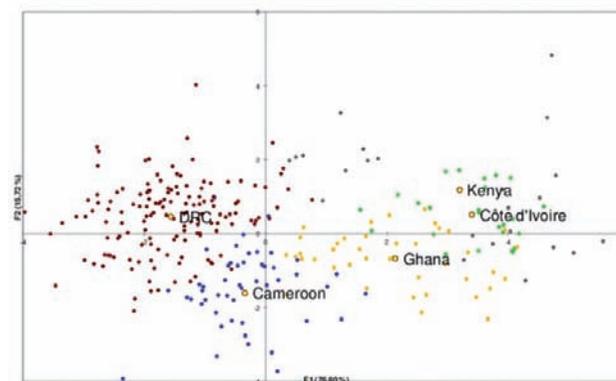


Figura 35. Análisis Canónico discriminante con los datos obtenidos mediante SIRA de los elementos C, O, H, N, S y Sr para la madera de iroko (tomado de Boner, Hofem & Watkinson, 2015).

Como cualquier otro método de análisis químico, la utilización de SIRA para la localización geográfica se basa en la comparación. El SIRA de la madera objeto de análisis debe ser comparado con una base de datos construida con un número suficiente y representativo de muestras de referencia conocidas como auténticas. En la actualidad, el GTTN (Global Timber Tracking Network) dispone de bases de datos para roble, caoba, abeto y teka, y está desarrollando las de iroko, sapelli o caoba de Guinea, y ayous o samba. Todas ellas se han construido con muestras de las diferentes zonas productoras a nivel

mundial o continental, según el caso. También se han desarrollado bases de datos a un nivel más local, para resolver problemas particulares: abeto en los Alpes, alerce en Austria y Siberia, palo de rosa y ébano de Madagascar frente a otros países de África occidental, sapelli e iroko de una plantación concreta de Camerún, etc.

Como ejemplo, la Figura 35 muestra la discriminación del origen de la madera de iroko de varios países africanos.

Algunas consideraciones sobre la técnica son las siguientes:

- Para llevar a cabo el SIRA en los distintos elementos se utilizan técnicas analíticas que incluyen sistemas muy específicos y avanzados de espectrometría de masas. Por tanto, la técnica debe ser realizada por un químico entrenado y con experiencia siguiendo un protocolo estandarizado, y es necesaria una instalación altamente especializada.
- Las pruebas de isótopos múltiples en una misma madera mejoran ostensiblemente el poder predictivo de la técnica en los estudios de procedencia y origen geográfico.
- La asignación de una muestra de madera a un origen se basa en los datos de los árboles vecinos más cercanos pertenecientes a esa especie, ya que se entiende que las muestras con firmas isotópicas similares probablemente se deriven del mismo lugar de origen.

Dicho de otra manera, si el análisis de una madera indica similitud con las maderas de una región geográfica determinada, es probable que la madera analizada también provenga de ese sitio.

- Aún no se ha determinado la utilidad de la huella isotópica estable de una especie para identificar la procedencia geográfica de otra especie distinta. Es decir, por ahora sólo se pueden comparar huellas isotópicas dentro de la misma especie, pero no entre especies distintas.
- Es una técnica válida para todos los tipos de madera, tanto de coníferas como de frondosas.
- La determinación de SIRA en tejidos envejecidos puede proporcionar resultados variables, debido a los cambios a lo largo del tiempo en los procesos ambientales y fisiológicos. Por ello, las bases de datos deben construirse con madera, no siendo tan fiables las construidas con hojas, raíces, etc.
- El coste del análisis es elevado, pudiendo llegar a los 600€ por muestra y los análisis necesitan un periodo de entre 1 y 6 semanas. La cantidad de muestra necesaria es pequeña, pero se trata de un análisis destructivo.



6 Bibliografía

6.1. Bibliografía citada

- Boner M, Hofem S, Watkinson C (2015). *The stable isotope method to retrace the origin of iroko in seven African countries*. GTTN Newsletter (3): 15-17.
- Dormontt E y col (2015). *Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging*. Biological Conservation (191):790-798.
- FAO (30 de diciembre de 2020). Producción y comercio mundiales de productos forestales en 2019. <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/es/>
- García-Esteban L, Guindeo Casasús A, Peraza Oramas, C, Palacios de Palacios P (2003). *La madera y su anatomía*. Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa y AITIM, Madrid. ISBN 84-86793-91-2 y 84-87381-23-5.
- IAWA Committee (2004). *IAWA list of microscopic features for softwood identification*. IAWA Journal. 25: 1-70.
- IAWA Committee (1989). *IAWA list of microscopic features for hardwood identification*. IAWA Bulletin 10 (3): 219-332.
- Inside Wood data base (IAWA). <https://insidewood.lib.ncsu.edu>.

6.2. Bibliografía y otras fuentes de información adicional recomendadas

- Asociación Española del Comercio e Industria de la Madera (AEIM). *Clasificación de maderas por usos recomendados* <https://www.aeim.org/>.
- Asociación Española del Comercio e Industria de la madera (AEIM). *Fichas de maderas*. <http://www.aeim.org>.
- Beeckman, Hans & Blanc-Jolivet, Céline & Boeschoten, Laura & Braga, Jez & Cabezas, Jose Antonio & Chaix, Gilles & Cramer, Simon & Degen, Bernd & Deklerck, Victor & Dormontt, Eleanor & Espinoza, Edgard & Gasson, Peter & Haag, Volker & Helmling, Stephanie & Horacek, Micha & Koch, Gerald & Lancaster, Cady & Lens, Frederic & Lowe, Andrew & Schmitz, Nele. (2020). Overview of current practices in data analysis for wood identification. A guide for the different timber tracking methods. 10.13140/RG.2.2.21518.79689.

- Esteban LG, de Palacios P, Guindeo A, García-Esteban L, Lázaro L, González L, Rodríguez Y, García F, Bobadilla I, García F, Bobadilla I, Camacho A. (2002). *Anatomía e identificación de maderas de coníferas a nivel de especie*. Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. ISBN 84-86793-89-0.
- Gasson P, Baas P, Wheeler E. (2011). *Wood Anatomy of CITES-Listed tree species*. IAWA Journal, Vol. 32(2): 155-198.
- Guindeo A, Esteban LG, Peraza F, Arriaga F, Kasner C, Medina G, de Palacios P, Touza M. (1997). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. AITIM, Madrid. ISBN 84-87381-11-1.
- LIGNUM. Sistema Estatal de Información sobre el Comercio de la Madera. MITECO. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/internacional-especies-madera/madera-legal/sistema/>
- Richter, H.G. and Dallwitz, M.J. (2000). *Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. <https://www.delta-intkey.com/>.
- Schoch W, Heller I, Schweingruber FH, Kienast F (2004). *Wood anatomy of central European Species*. Versión online: www.woodanatomy.ch.
- Schweingruber FH (2011). *Anatomy of European Woods: An Atlas for the Identification of European Trees, Shrubs and Dwarf Shrubs*. Verlag Kessel. 2nd edition. 800 pp. ISBN 978-3-941300-51-4.
- UNEP. 2019. *The Species+ Website*. Nairobi, Kenya. Compiled by UNEP-WCMC. Cambridge, UK. www.speciesplus.net.
- UNEP-WCMC (2019). *The Checklist of CITES Species Website*. CITES Secretariat, Geneva, Switzerland. Compiled by UNEP-WCMC, Cambridge, UK. <http://checklist.cites.org>.
- Wheeler, EA (2011). *InsideWood - a web resource for hardwood anatomy*. IAWA Journal 32 (2): 199-211.

