

COMUNICACIÓN

# Nudo de la madera - Tecnologías de detección, reducción y nuevas perspectivas de uso

*Wood knot – Detecting and reducing technologies and new perspectives of use*

**D. Amaral de Deus<sup>1</sup>, A. Scarambone Zaú<sup>2</sup>, D. Correia Gama<sup>3</sup>, G. I. Bolzón de Muniz<sup>4</sup>,  
S. Nisgoski<sup>5</sup>, H. dos Santos Abreu<sup>6</sup> (*in memoriam*)**

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto de Ciências Agrárias, Belém-PA, Brasil. E-mail: eiseamaral.ufra@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9041-2775>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências do Ambiente, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. E-mail: andreza@unirio.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6782-351X>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Cruz das Almas-BA, Brasil. E-mail: drauziogama@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6357-0698>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Florestal e Tecnologia, Curitiba-PR, Brasil. E-mail: graciela.ufpr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4417-0178>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Florestal e Tecnologia, Curitiba-PR, Brasil, E-mail: silvana.ufpr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9595-9131>

<sup>6</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Laboratório de Química da Madeira, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. E-mail: abreu@ufrj.br

Recibido en febrero de 2024; Aceptado en octubre de 2024

## RESUMEN

En las especies forestales de interés económico, los nudos se consideran influencia dañina y negativa en las propiedades mecánicas de la madera, lo que, como consecuencia, reduce su valor comercial. Para facilitar la comprensión de la formación de nudos en la madera, la clasificación comercial, las posibilidades de uso y contribución a la investigación futura y su relación con la calidad de la madera. El presente estudio se elaboró con el objetivo de exponer información sobre los aspectos de la formación y tecnologías de los nudos de madera, implicaciones y perspectivas de sus usos. Con este fin, se realizó una revisión de literatura narrativa. Se observó que el conocimiento de los procesos fisiológicos de formación e inducción de nudos de madera, así como la composición química y anatómica, son fundamentales para ampliar la comprensión de los mecanismos que influyen en la resistencia de la madera en las áreas de intersección 'nudo-madera'. Esto, combinado con las técnicas prometedoras de detección de nudos, aumenta la capacidad de calcular con mayor precisión las fuerzas que actúan en estas áreas (interfaz 'nudo-madera'). Por otro lado, el estudio de los componentes químicos de los puntos de los nudos, son importantes no solo para un mayor uso de la madera, sino especialmente para nuevas fuentes de uso, incluida la comercialización del nudo en sí como un producto para el uso de la decoración y material bruto para productos artesanales, con una mayor rentabilidad económica de la que ofrece hoy. Así como en la industria farmacéutica y alimentaria.

Palabras clave: nudos, madera, composición química, defectos, detección, decoración, artesanías.

## ABSTRACT

In forest species of economic interest, knots are considered to have a harmful and negative influence on the mechanical properties of wood, which, therefore, reduces its commercial value. To facilitate the understanding of knot formation in wood, the commercial classification, the possibilities of use and contribution to future research and its relationship with the quality of wood, this study was prepared with the objective of exposing information on aspects of the formation and technologies of wood knots and implications and perspectives of your uses. To this end, a review of narrative literature was carried. It was observed that the knowledge of the physiological processes of formation and induction of wood knots, as well as the chemical and anatomical composition, are fundamental to expand the understanding of the mechanisms that influence the resistance of the wood in the areas of 'knot-wood' intersection. And this, combined with the promising techniques of detection of knots, increases the ability to calculate more precision the forces that act in these areas (knot-wood interface). On the other hand, the study of the chemical components of the points of knots, are important not only for greater use of wood, but especially for new sources of use, including the commercialization of the knot itself as a product for the use of the decoration and material for handmade products, for example. This has allowed us to understand

that wood knots can be used with greater economic profitability than it offers currently. As well as in the pharmaceutical and food industries.

Keywords: wood knots, chemical composition, defects, detection, decoration, handmade.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se han realizado estudios sobre los nudos de la madera desde la década de los 1930 (Mohan *et al.*, 2014). Sin embargo, todavía existen algunas lagunas de conocimiento, puesto que tales obras abordan tratamientos silvícolas que buscan limitar su frecuencia y ocurrencia, minimizar los efectos perjudiciales sobre la madera como producto final (Viquez y Pérez, 2005), crear métodos para su detección y desarrollar técnicas que correlacionen las características físicas de los nudos, como tamaño, forma y ubicación, con sus propiedades mecánicas específicas (Oscarsson *et al.*, 2012).

En las especies forestales de interés económico, los nudos se consideran perjudiciales por influir negativamente en las propiedades tecnológicas de la madera y reducir su valor comercial. Entre los defectos que se producen, este es uno de los que influyen en mayor medida en la depreciación de las especies comerciales. Su aparición en piezas de madera puede afectar a la resistencia, dificultar los procesos de desdoblado y retestado, y originar la aparición de grietas en elementos estructurales, además de reducir la capacidad de carga (Wang *et al.*, 2013). En la industria celulósica, los nudos son considerados perjudiciales para la calidad de la pasta y del producto final, por lo que, preferentemente, deben ser retirados antes del proceso de fabricación (Holmbom *et al.*, 2003). Fuera del campo de la tecnología de productos forestales, los estudios sobre nudos han despertado interés en los campos de la medicina y de los productos alimenticios (Phelan *et al.*, 2009) debido a las posibilidades que ofrecen sus productos derivados.

Para mejorar el aprovechamiento de la madera y reducir el impacto negativo de los nudos en los productos y subproductos madereros, es fundamental comprender detalladamente la dinámica de la formación y el desarrollo de los nudos, así como conocer su composición química y la forma en que su estructura influye en la madera (Hoadley, 2000; Wang *et al.*, 2013). A partir de un análisis minucioso de los elementos estructurales del nudo es posible calcular con precisión la distribución de tensiones en piezas aserradas afectadas por este defecto (Buksnowitz *et al.*, 2010).

Se considera un defecto cualquier irregularidad o imperfección en la constitución y estructura de la madera que resultan en cambios perjudiciales para las propiedades físicas y mecánicas y, en consecuencia, comprometen su aplicación (Sousa, 2012).

Para fines de clasificación visual, los defectos más comunes en la madera son defectos de tipo físico (deformidad de la estructura), como nudos y bolsas de resina; tipo anomalía (irregularidades estructurales) como el anillo desigual y elementos vasculares retorcidos, tipo alteración (modificación en la madera), como mancha y pudrición; tipo industrialización (operación de corte descuidada), como la ranura o las fisuras de corte y secado, y tipo de trabajo (pobres operaciones de conversión y secado) que causan grietas de secado (Sousa, 2012).

Con respecto a la aparición de nudos en la madera, como deformidad estructural, son defectos anatómicos que, por lo tanto, dañan o hacen que la madera sea inútil para ciertas aplicaciones (Rocha *et al.*, 2018).

De ese modo, para el uso estructural, por ejemplo, es deseable usar madera libre de defectos que puedan afectar su resistencia mecánica (Rocha *et al.*, 2018). Sin embargo, debido a este requisito

del estándar, es difícil obtener muestras de madera totalmente defectuosas y puede haber mucho material desperdiciado considerado inapropiado para las pruebas mecánicas (Rocha *et al.*, 2018).

Es importante destacar que para los usuarios de madera, los nudos pueden caracterizarse como defectos, sin embargo, para los árboles vivos, los nudos realizan estructuras de importancia fundamental en la supervivencia del organismo vivo (Spatz y Theckes, 2013; Slater *et al.*, 2014).

Entre otros estudios, se han considerado trabajos que tratan los mecanismos de formación de nudos y procuran reducir este defecto en especies comerciales, y estudios que evalúan la variación de las fuerzas admitidas por las piezas de madera en función del formato de los nudos. En este contexto, el presente trabajo recopila información de diferentes campos de estudio, como la tecnología de productos forestales, la fisiología vegetal y la fitoquímica, a fin de ampliar el conocimiento sobre los nudos.

## 2. DESARROLLO

### **Nudos: concepto y formación**

El nudo se define como la intersección de la rama con el tronco (Buksnowitz *et al.*, 2010). La rama lateral, unida a la incidencia del tronco principal desde su origen, se desarrolla agregando ante sus anillos de crecimiento y formando capas continuas. Se trata de un proceso de extensión similar al que se da en la formación de los anillos de crecimiento del tronco; aunque en éste los anillos son más anchos que en las ramas y el diámetro de las ramas aumenta más lentamente que el del tronco. Con el aumento del perímetro del tronco, la rama toma la forma de un cono, formando el nudo, cuyo desarrollo continúa dentro del tronco, aunque más lentamente (Hoadley, 2000; Aloni, 2013).

El nudo es la parte basal de una rama que se desarrolló desde la médula (Hoadley, 2000) y cuya estructura queda rodeada por la madera del tronco. Los nudos tienen sistemas independientes de anillos de crecimiento y están formados principalmente por fibras de compresión morfológicamente distintas a las fibras de la madera corriente.

La formación del nudo comienza en una yema lateral en la cual hormonas específicas estimulan el crecimiento de la rama. Los procesos de síntesis y transporte de las hormonas auxina y citoquinina (Napoli *et al.*, 1999), la actividad del meristema apical y la actividad de los meristemas axiales intervienen para formar las ramas y, en consecuencia, los nudos. El meristema apical origina el eje principal de la planta y la arquitectura de ésta es moldeada por la ramificación, que resulta de la actividad de los otros meristemas (Schmitz y Theres, 1999). El patrón de ramificación depende de la evolución espacial y temporal de esos meristemas, y a pesar de estar determinado genéticamente, puede experimentar modificaciones como respuesta a estímulos del ambiente (Shimizu-Sato y Mori, 2001).

Las hormonas auxina y citoquinina son las más importantes en el control de este proceso (Napoli *et al.*, 1999), y el desarrollo de la rama depende principalmente de la relación entre estas dos hormonas. La citoquinina participa en la estimulación de la división celular e inicia el desdoblamiento de la yema lateral (Shimizu-Sato y Mori, 2001). Por otro lado, la auxina ácido indolacético (AIA) actúa en los genes de las células vegetales estimulando la síntesis de enzimas que promueven el ablandamiento de la pared celular, lo cual permite la distensión de las células. La acción de citoquininas y auxinas, junto con otros factores (luz, temperatura, humedad, estado nutricional y otras hormonas) provoca la formación de mayor o menor número de ramas y, como consecuencia, de nudos (Eklöf *et al.*, 1997).

Además de los factores hormonales, los mecanismos que regulan los lugares de aparición de ramas están estrechamente relacionados con la incidencia de luz (Takenaka, 2000), pues ésta favorece el crecimiento de las yemas laterales al inhibir el movimiento y la acción de la auxina (AIA), producida en la yema apical. Puesto que la AIA inhibe la formación de ramas, en situaciones donde la plantación se produce con espacios más grandes entre plantas, reciben una mayor cantidad de luz que previsiblemente inhibe la actuación de la auxina y, consecuentemente, favorece la activación de nuevos lugares de inserción de ramas. La penetración de luz en la corteza conduce a la fotooxidación de la auxina en el cambium, que a su vez impide la posible inhibición de los brotes (Nicolini *et al.*, 2001).

Para concluir, el aislamiento y caracterización de genes relacionados específicamente con el control de la ramificación, la dominancia apical y la latencia de las yemas laterales permiten suponer que cada especie presenta características de ramificación particulares (Shimizu-Sato y Mori, 2001).

### **El nudo: influencia en la madera**

En los nudos se dan bajos niveles de humedad y una densidad dos veces superior a la de la madera corriente, además de notables variaciones en sus células, orientación del grano más o menos perpendicular a la madera circundante, irregularidades de los anillos de crecimiento y, eventualmente, discontinuidad entre el nudo y la madera que lo rodea; lo cual conlleva una reducción de la resistencia de la madera en este punto (Hoadley, 2000).

Las alteraciones de las propiedades mecánicas de la madera por causa de la presencia de nudos se producen, principalmente, debido a la interrupción de la continuidad en la dirección de las fibras en los puntos de inserción de los nudos. Las alteraciones dependen del tamaño, la posición y la forma del nudo, además de su solidez, que a su vez depende del grado de inclinación respecto al tronco y del tipo de tensión que generan las células que lo rodean (Mohan *et al.*, 2014).

El efecto sobre las propiedades mecánicas de las piezas de madera aserrada está directamente relacionado con el tamaño del nudo. A partir de medidas de 0,18 a 0,38 mm de longitud, los nudos provocan cambios en la calidad de la madera (Tong *et al.*, 2013), siendo el MOR (módulo de rotura) y MOE (módulo de elasticidad) las propiedades más relacionadas con el tamaño del nudo, en relación a la pieza donde está inserto (Lam *et al.*, 2005). En las piezas estructurales sometidas a esfuerzos de flexión estática, los esfuerzos son mayores en el punto medio de su longitud y en los extremos. Por esta razón, cuanto más próximo de estas zonas se encuentra el nudo, mayor es su efecto sobre la resistencia de la madera. Desde el punto de vista del mecanizado, un nudo que aparece en formato extendido en una tabla de madera puede provocar que esta se quiebre por la mitad al ser sometida a pequeños esfuerzos, además de reducir la vida útil de las herramientas de corte y aumentar el coste operacional (Hoadley, 2000).

El nudo afecta en gran medida a las piezas de dimensiones estructurales (vigas y similares). Su menor resistencia en comparación con las muestras de prueba sin defectos puede ser considerada consecuencia casi exclusiva de la aparición y distribución de los nudos (Oscarsson *et al.*, 2012). Se trata del defecto que disminuye en mayor medida la fuerza de la madera de uso estructural, siendo la resistencia a la tracción longitudinal la propiedad más afectada, seguida de la resistencia a la flexión (MOR), la fuerza de compresión paralela al grano y el MOE (Foley, 2001).

El efecto del nudo sobre la resistencia de las piezas estructurales está directamente relacionado con su tamaño relativo en relación a la sección transversal de la pieza y al ángulo de inclinación del nudo, siendo preferible la aparición de nudos pequeños, aunque sean más frecuentes (Zhang *et al.*, 2006), tanto el ángulo de inclinación como el tamaño, varían en relación al eje principal y dependen del espaciamiento de la plantación (Tong *et al.*, 2013). Cuanto menor es el ángulo de la

inserción de la rama, menores son las fuerzas aplicadas sobre las zonas de transición rama- tronco y menor es el riesgo de cizallamiento en esta región. Un ángulo de 45° provoca una distribución uniforme de la carga axial estática generada por el peso de la rama sobre el tronco principal (Jungnikl *et al.*, 2009).

### **El nudo: clasificación**

Las normas de clasificación de las piezas de madera en relación a los nudos consideran el número, la frecuencia, el diámetro y el estado de los mismos (Viquez y Pérez, 2005). Se dividen principalmente en dos categorías: nudos vivos y muertos. Un nudo se denomina vivo cuando se da un crecimiento continuo en la unión entre la rama y el tronco del árbol. Cuando la rama muere y se produce un crecimiento posterior del árbol entorno a la rama, el nudo resultante se denomina muerto (Mohan *et al.*, 2014).

Entre las normas de clasificación de maderas, las principales son: DIN 1052/88 (norma alemana); AS 2858-86 (Timber - Softwood - Visually stress - graded for structural purposes) de Australia; CSA 086.1-94/89 de la NLGA (National Lumber Grades Authority) de Canadá; EUROCODE 5/93 (norma de la Unión Europea) y NCh1207-90 (*Pinus radiata* D. Don – Clasificación visual para uso estructural – especificaciones de los grados de calidad) de Chile. Para facilitar la clasificación, a pesar de tener un origen similar (Gava, 2005), algunos mercados determinan nomenclaturas específicas y una unificación de criterios para los tipos de nudos que se dan en la madera.

Las normas españolas, que están de acuerdo con el Eurocódigo 5, aunque aportan más detalles, describen en función de su formato, color y estado patológico. Los nudos con forma de hoja o alargados aparecen por completo en la pieza, pero de forma alargada o extendida. De acuerdo con la clasificación visual de la coloración pueden ser claros, negros o rojizos. Según su estado patológico, se clasifican principalmente en sanos, resinosos y podridos. Por último, de acuerdo con su distribución y posición en las piezas aserradas, son llamados: dispersos; aquellos que se encuentran separados a una distancia mayor que la anchura que tienen, agrupados; aquellos que se encuentran juntos en una misma región, y ramificados; cuando se originan a partir de un mismo verticilo o están unidos a otros nudos (normas españolas, s/d).

En la norma mexicana (NMX-C-409-ONNCCE-1999: “Norma Mexicana de Clasificación Visual de Maderas Latifoliadas de Usos Estructurales”) el nudo se considera sano cuando se encuentra adherido a la pieza de madera de tal forma que no se desprende durante los procesos de secado o de uso de las piezas. Para ser clasificado sano, no debe presentar grietas ni ningún signo de pudrición. Un nudo hueco es aquel que no está unido de forma continua al tejido de la madera circundante y se desprende fácilmente cuando la madera es aserrada; y nudos agrupados son aquellos que comparten el mismo tejido, pero con desvíos en las fibras (Martín *et al.*, 2002).

Casi todas las normas de clasificación de la madera se basan en la norma americana ASTM D245-93 (Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber), que no determina las reglas de clasificación visual, sino que define criterios para la evaluación (Melo *et al.*, 2010) y medida de defectos, y proporciona la base para limitarlos en función de una razón de resistencia (Carreira y Dias, 2005). Esta norma establece que tanto la localización como la naturaleza de los nudos deben ser evaluadas en toda la longitud de la pieza y que la razón de su resistencia asociada debe ser calculada a partir de una relación teórica entre la resistencia de una pieza de madera con nudo y la de una pieza sin defecto. La norma proporciona ecuaciones teóricas específicas para la determinación de las dimensiones de los nudos, y establece criterios como el tamaño y la posición para asignar diferentes clases a las piezas de madera aserrada en función de tales medidas. La ASTM D245-93 determina también parámetros específicos para la evaluación de nudos en vigas, postes y columnas, así como los que aparecen en tableros de madera (Carreira y Dias, 2005).

En Brasil, la norma NBR 12.297 (Brasil, 1991) define los criterios de evaluación de nudos en piezas de madera aserrada, y la norma NBR 12.551 (Brasil, 2002a) define la fórmula para la cuantificación de los mismos, además de determinar una nomenclatura específica para cada tipo de nudo de acuerdo con sus características específicas. La denominación de los nudos, dada por la norma NBR 12.551, considera la forma y el estado sanitario.

La forma de un nudo en superficies aserradas queda determinada por la dirección del corte en el procesado de la madera (Martín *et al.*, 2002). Cuando la madera se asierra a partir del tronco y la rama se corta en perpendicular a su longitud, el nudo aparece con forma redonda. Y si el corte es diagonal a la longitud de la rama, se muestra en forma oval. Un nudo alargado se produce cuando la troza se asierra siguiendo la dirección longitudinal de la rama. La norma NBR 12.551 considera como nudo de esquina aquel que aparece tanto en el borde como en el frente de la pieza y contiene la intersección de estas superficies longitudinales; nudo de corbata se denomina a la unión de dos nudos con formas alargadas que convergen hacia el mismo punto; cuando dos o más nudos están separados por traqueidas desviadas de la dirección del grano, se considera grupo de nudos; y cuando los nudos se encuentran juntos, de tal forma que no es posible identificar las traqueidas entre ellos, se denomina haz de nudos.

El nudo se denomina firme cuando permanece adherido a la madera, mientras que el suelto es el que se desprende de la madera tras el proceso de secado. Cuando aparece parcialmente deteriorado, ya sea por agentes biológicos o por daños mecánicos, se denomina cariado. Y cuando se puede observar un agujero en la madera originado por el desprendimiento de un nudo, este orificio se llama vaciado (Martín *et al.*, 2002).

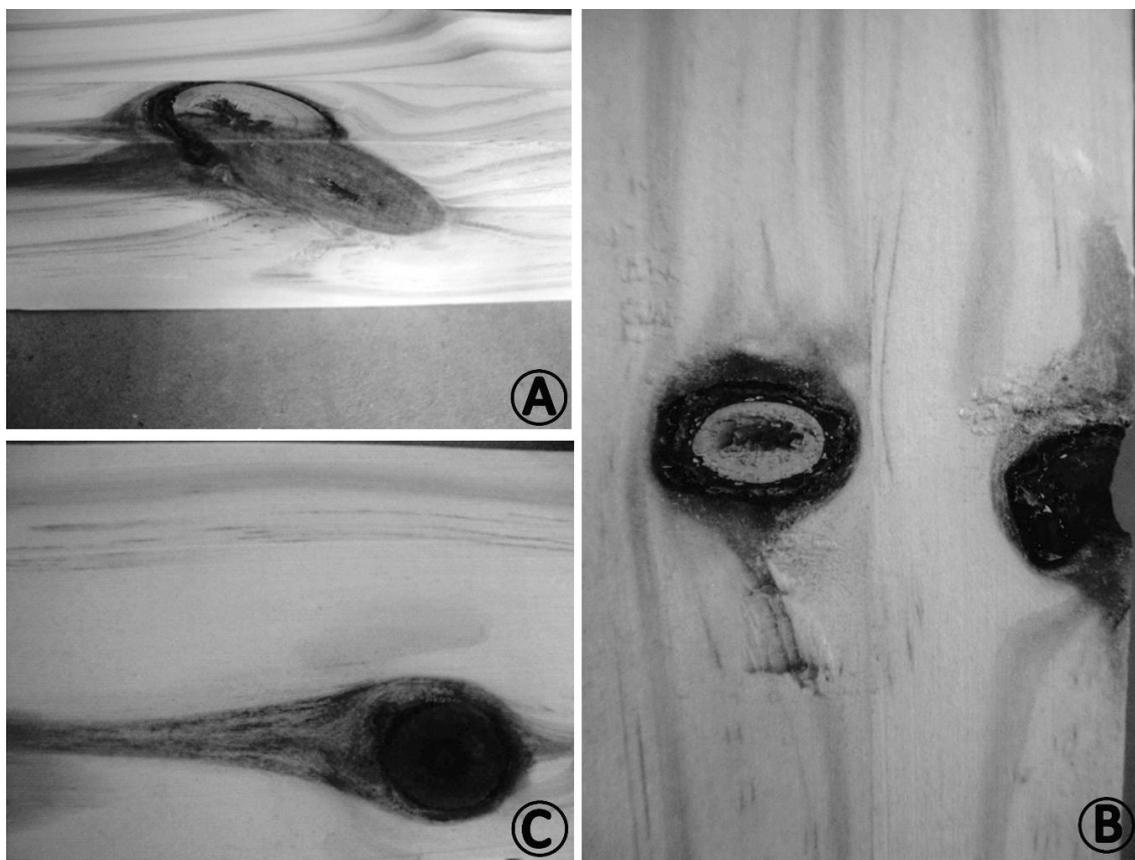
La norma brasileña de clasificación de la madera aserrada de eucalipto, NBR 14.806 (Brasil, 2002b), especifica la clasificación de nudos en cuatro clases diferentes según características específicas que éstos presentan en relación a las piezas. En la madera considerada de primera clase no se admite la existencia de ningún tipo de nudo. En las piezas de segunda clase se admite la presencia de un nudo solamente, en una de las caras de la pieza, de tipo firme, con diámetro menor de 25 mm y en el mismo color. En piezas de tercera clase se admiten varios nudos firmemente adheridos en la misma sección, incluso si tienen diferente color al de la madera y de formato tipo corbata; sin embargo, los nudos no deben aparecer en ambos lados de la pieza. La cuarta clase de piezas de madera puede presentar nudos de tipo cariado, suelto o incluso hueco, con medidas de hasta 25 mm de diámetro y con una frecuencia máxima de un nudo por cada metro de pieza. Finalmente, en las piezas de la quinta clase se admiten todos los tipos de nudos, mientras que no inviabilicen la utilización de la madera (Figura 1).

### **Nudos: técnicas de detección**

Dependiendo del tamaño, la forma y la disposición de los nudos, las propiedades mecánicas de la madera pueden permanecer inalteradas o cambiar significativamente (Lukacevic y Füssl, 2014). Por lo tanto, el conocimiento del tamaño, la distribución y el ángulo de inclinación de los nudos, así como la comprensión de su respuesta al ser sometidos a una fuerza, son extremadamente importantes para el desarrollo de métodos y herramientas más precisas de clasificación de la capacidad de resistencia de la madera (Oscarsson *et al.*, 2012). Además, incluso los profesionales especializados tienden a reducir la eficiencia y la precisión en la inspección a menos del 70 % al dedicarse a la evaluación de piezas de madera durante largas horas (Mohan *et al.*, 2014). Partiendo de estos principios, se han realizado investigaciones para encontrar técnicas no destructivas que permitan la evaluación precisa de los defectos internos en piezas de madera (Audreu y Rinnhofer, 2003). Los rayos gamma, la tomografía computarizada, la resonancia magnética nuclear, las microondas, los ultrasonidos, las vibraciones y las ondas de tensión longitudinal son algunas de las técnicas que se utilizan para la detección de nudos en las trozas. Los rayos-X se consideran

más prometedores para la captura y visualización de imágenes de la estructura interna de los troncos (Audreu y Rinnhofer, 2003).

En un estudio sobre la caracterización de nudos en *Picea glauca* (Moench) Voss (picea blanca - Pinaceae) las imágenes de tomografía computarizada asociadas a un software de localización, permitieron identificar la forma, número, diámetro e inclinación, además de la distribución de los nudos dentro del tronco de los árboles (Tong *et al.*, 2013; Audreu y Rinnhofer, 2003). Evaluando una plantación de 32 años de edad, hallaron más de 24 nudos a cada 2,0 cm de grosor del diámetro del fuste. Estos autores observaron una mayor frecuencia de estos elementos conforme aumentaba la altura de la troza. Mero la proporción del volumen de nudos en relación al volumen total de madera resultó más baja en las trozas más próximas al diámetro a la altura de 1,30 m del suelo. Gracias al empleo de la tomografía computarizada, en éste mismo estudio, fue posible modelizar los nudos en 3D, obteniendo una alta tasa de detección de nudos a partir de 10 mm a lo largo del fuste y calculando el punto de inserción de los mismos.



**Figura 1.** Nudos en *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm: **A:** nudo de esquina, **B:** nudo suelto (al centro) y nudo cariado y **C:** nudo firme. (Propia autoría de imágenes).

Clasificaciones automatizadas, reconstrucción digital de la madera y estudios sobre el rendimiento de trozas fueron impulsados a partir de la aplicación de un programa de simulación por ordenador desarrollado para estudiar las formas de los nudos desde varios planos de observación. El modelo geométrico resultante de este programa permitió describir los nudos en troncos y en la superficie de vigas de madera, definiéndolos a través de siete parámetros asociados a su forma y su posición en el tronco (Samson, 1993). Un modelo digital basado en tres parámetros de evaluación (diámetro del nudo, posición tangencial y posición longitudinal), que describe el nudo dependiendo de la distancia del radio de la médula, fue desarrollado y

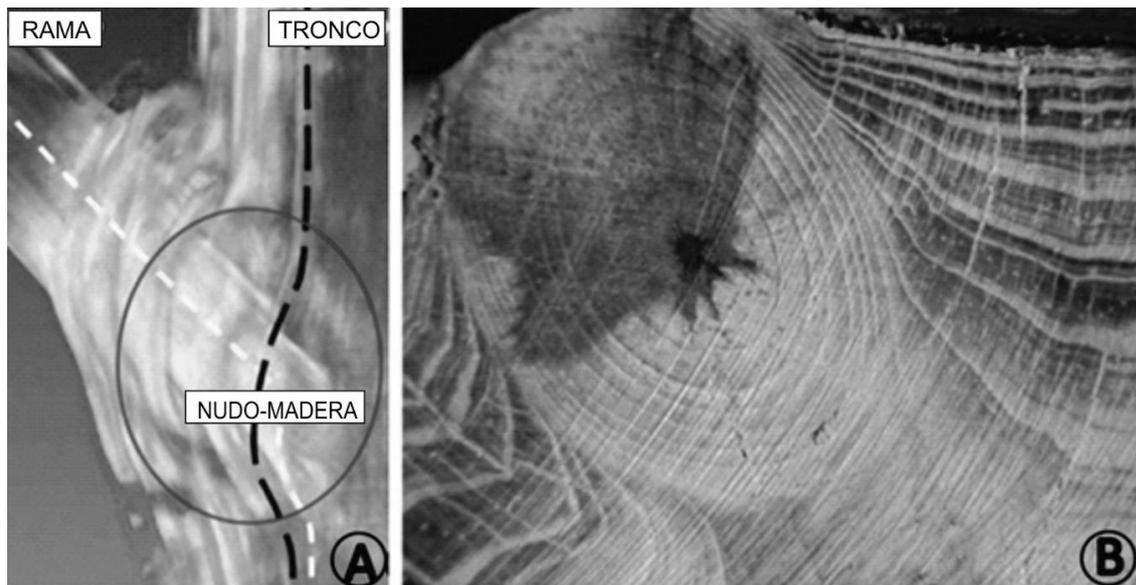
optimizado por Grundberg y Grönlund (1997). A su vez, los autores Lukacevic y Füssl (2014) crearon una herramienta de simulación digital capaz de captar la dirección de las fibras en las proximidades de los nudos de forma tridimensional. Pruebas de resistencia a la tracción y a la flexión demostraron que los valores de resistencia estimados se basan en la formación de zonas de grietas que son causadas, principalmente, por la tensión perpendicular al grano en las proximidades de los nudos.

El campo de deformación en torno al nudo y el comportamiento mecánico de la intersección rama-tronco, sometidos a variaciones de cargas y tensiones, fueron evaluados a través de la correlación de imágenes digitales por Oscarsson *et al.* (2012). En este estudio, los investigadores consiguieron cuantificar las cargas necesarias para causar la rotura de las fibras desde la médula del nudo, identificaron formas específicas de nudos que serían responsables de provocar grietas en las piezas de madera, y descubrieron cambios bruscos de tensión a partir del crecimiento de estas grietas, que son capaces de liberar tensiones internas existentes en el nudo y a su alrededor. Demostraron que las tensiones aplicadas en la dirección longitudinal pueden no ser transmitidas a través del nudo. La dirección de las fibras en las proximidades del nudo varía considerablemente con la dirección de la carga aplicada, y los análisis del comportamiento mecánico de las grietas en nudos de piezas de madera constituyen modelos importantes para el desarrollo de métodos más precisos de clasificación de la resistencia en base a información digitalizada.

Las técnicas de rayos-X y tomografía computarizada se utilizaron para evaluar el papel de la densidad de la madera y del ángulo de las microfibrillas en el ajuste mecánico de las uniones rama-tronco. Tanto la densidad como el ángulo de las microfibrillas provocan variaciones en el ajuste y proporcionan mayor rigidez o mayor flexibilidad a nivel local, creando un patrón de protección ante las tensiones provenientes del tronco y las cargas dinámicas propias de la rama. En la base de la rama surgieron deformaciones antes de transmitir las fuerzas, evitando una posible rotura. Se demostró también que valores altos en el ángulo de las microfibrillas están asociados a una mayor resistencia en tejidos de alta densidad y a una mayor flexibilidad en tejidos de baja densidad, y que el aumento de la densidad en el tejido de la intersección aporta rigidez tanto en la dirección de las traqueidas (la dirección de la rama) como en la dirección perpendicular en relación al eje del tronco (Jungnikl *et al.*, 2009), como se puede ver en la Figura 2.

### **Métodos para la reducción de la aparición de nudos**

Para reducir la aparición de nudos manteniendo un volumen de madera económicamente competitivo en las trozas destinadas a la industria maderera de planchas y aserrado, las técnicas de gestión han sido ampliamente estudiadas. Entre las técnicas de silvicultura, el espaciamiento de las plantaciones juega un papel fundamental en la aparición de nudos. Espaciamientos anchos, de 3 m x 4 m (Scolforo *et al.*, 2001) y 3 m x 3,75 m (Balloni y Simões, 1980), por ejemplo, inducen una mayor aparición de nudos, puesto que permiten un crecimiento libre de la copa. Este crecimiento está mecánicamente relacionado con la mayor presencia de luz, la menor cantidad de agua y nutrientes y la libre acción de los factores genéticos y hormonales propios de cada estructura. Con espaciamientos mayores, el crecimiento de la rama no se limita ni detiene por la reducción de la incidencia de luz que causan otras ramas. En los individuos distribuidos en espaciamientos mayores, los nudos son mayoritariamente vivos, de diámetro grande, con fibras circundantes distorsionadas, con el grano transversal y discontinuidades que conllevan la concentración de tensiones en la madera (Mäkinen, 1999). Para reducir la frecuencia y el diámetro de los nudos, el menor espaciamiento en la plantación y la poda sistemática deben ser consideradas, teniendo en cuenta las características propias de cada especie (Scolforo *et al.*, 2001).



**Figura 2.** Tomografía computarizada evidenciando el punto de inserción **A:** de la rama en el tronco (Jungnikl *et al.*, 2009) y **B:** nudo firme en tronco de *Pinus Elliottii* var. *elliottii* Engelm (Propia autoría de imagen B).

La altura de inserción de la primera rama es otro factor importante para la industria de procesamiento de la madera, y también se ve influida por el espaciamiento de la plantación. Las dos primeras trozas de un tronco pueden presentar entre el 4,0 % y el 13,0 % de su volumen total en forma de nudos y este porcentaje aumenta progresivamente con la altura del tronco (Rosso y Ninin, 1998). Como el mayor volumen de madera proviene de las primeras trozas (Evans, 1992), cuanto más libre de nudos mayor es el rendimiento de las piezas de mayores diámetros.

Cuanto menor sea la densidad de la plantación, menor será la altura de inserción de las primeras ramas y mayor la porción volumétrica de madera libre de nudos (Scolforo *et al.*, 2001). Los mismos autores también citan que la producción de árboles con mayores alturas de inserción de la primera rama es uno de los objetivos de las plantaciones dedicadas al procesado mecánico. Y así como debido a que también se busca obtener árboles de grandes diámetros, y ya que estas dos características se logran por medios opuestos, la mejor manera de atender ambos objetivos sería aplicar una separación intermedia, de 2,5 x 2,8 m, por ejemplo (Scolforo *et al.*, 2001).

La poda artificial se emplea cuando el rendimiento compensa los costes operacionales en la plantación, pero se debe realizar tan pronto como el desarrollo de la planta lo permita, y mientras que las ramas sean pequeñas y se mantengan vivas (Montagu *et al.*, 2003). Con este manejo, el rendimiento de madera libre de nudos puede alcanzar un porcentaje de hasta un 94 % más alto que en el caso de individuos que no sufren podas (Polli *et al.*, 2006). Espaciamientos pequeños (-1.0 x 1.0 m) estimulan la poda natural al inhibir la emisión de yemas y limitar la formación de ramas, y favorecen una mayor concentración de nudos en la madera juvenil (Tong *et al.*, 2013).

En el régimen de poda intensiva, dependiendo de la rotación aplicada a la plantación, el fuste de un individuo puede producir más de un 40 % del volumen total de madera sin nudos, pudiendo alcanzar este porcentaje más de 60 % del volumen comercial de un árbol (Viquez y Pérez, 2005). Por otro lado, para minimizar los costes de esta práctica silvícola, es recomendable mantener una densidad mínima que favorezca la poda natural no permitiendo la expansión y longevidad de las ramas (Scolforo *et al.*, 2001).

### Composición química de los nudos y nuevas perspectivas de utilización

El contenido de productos químicos en un nudo puede ser cientos de veces superior al de la madera adyacente (Phelan *et al.*, 2009). Estudios con más de 50 especies de árboles demuestran que los nudos pueden contener cantidades notablemente más altas de polifenoles que la madera adyacente - hasta 100 veces (Willför *et al.*, 2003), mientras que la proporción de lignina crece significativamente con el aumento del ángulo de las microfibrillas (Buksnowitz *et al.*, 2010). Las especies de *Pinus* sp. presentan mayores porcentajes de estilbenos en los nudos, mientras que los flavonoides son abundantes en los nudos de ciertas especies de madera dura (Holmbom *et al.*, 2003). Phelan *et al.* (2009), evaluando extractos de nudos de *Pinus sitchensis* (Bong.) Carrière y *Pinus banksiana* Lamb., verificaron diferencias entre los niveles y tipos de lignanos y flavonoides que aparecen en estas especies. Según los autores, el extracto de nudo de *Pinus banksiana* contenía menos lignanos, siendo el nivel de esta sustancia en *Pinus sitchensis* tres veces más alto. Los flavonoides fueron observados en mayor cantidad en *Pinus banksiana*, mientras que los niveles de fenoles fueron similares en ambas especies.

La cantidad de compuestos fenólicos como ligninas, lignanas, estilbenos y flavonoides presentes en el nudo lo caracterizan como un recurso valioso que despierta interés en la industria farmacéutica y alimenticia (Holmbom *et al.*, 2003) por su posible utilización en la producción de los alimentos, productos farmacéuticos y agentes fitosanitarios naturales (Phelan *et al.*, 2009). Los compuestos fenólicos provenientes de extractos de nudos presentan importantes propiedades biológicas medicinales; entre otras, las propiedades anti-tumorales, anti-oxidante y efectos cardioprotectores (Zern y Fernández, 2005). Pietarinen *et al.* (2006), en un estudio sobre los extractos de nudos de madera de *Pinus banksiana* y *Pinus sitchensis*, observaron que los compuestos químicos presentes en los nudos ejercían efectos específicos inmunológicos, citoprotectores e inmunomoduladores en células intestinales humanas. Phelan *et al.* (2009), observaron que los estilbenos presentes en nudos de *Pinus silvestris* L. son los responsables de los efectos antibacterianos, antimicrobianos y citotóxicos que esta especie presenta. Además de los efectos mencionados, potenciales efectos protectores antioxidantes, de inducción de lesión celular y daños en el ADN fueron asociados a los extractos de nudos por Lindberg *et al.* (2004). Estos autores demostraron, incluso, que los nudos en madera de algunas coníferas, además de tener propiedades antioxidantes, contienen estilbenos capaces de favorecer efectos directos de inhibición de la viabilidad y el crecimiento de cultivos celulares. Según los autores, las propiedades antioxidantes se producen por medio de transferencia de electrones, y los estilbenos presentes en los nudos provocan efectos directos de inhibición del crecimiento y oxidación en cultivos de células humanas.

Estilbenos, flavonoides y lignanos demostraron ser compuestos eficaces en la retención de radicales libres dependiendo de la estructura del compuesto (Pietarinen *et al.*, 2006). Las lignanas, que aparecen en forma libre en los nudos, pueden ser fácilmente extraídas con etanol acuoso o incluso con agua, pudiendo ser producidas a gran escala a partir de los nudos en las fábricas de celulosa y papel (Holmbom *et al.*, 2003). Esto facilita la realización de investigaciones orientadas a explicar su bioactividad y proporcionar bases para su aplicación en medicina, nutrición o como antioxidantes naturales y biocidas (Phelan *et al.*, 2009). El 7-hidroxi-matairesinol (HMR), un fuerte antioxidante con propiedad inhibidora del crecimiento de ciertos tumores, es producido y comercializado como suplemento dietético en los Estados Unidos (Holmbom *et al.*, 2003), lo que demuestra una de las infinitas utilidades de los nudos de la madera.

Otro uso de la madera es la fabricación de objetos artesanales que, aún con una pequeña participación en el consumo total de madera (Pérez y Bacha, 2006), es una cultura que se mantiene fuerte con la fabricación de pequeños objetos decorativos y otros artefactos, proporcionando también, según Pompeu *et al.* (2018), mayor visibilidad del componente arbóreo y favoreciendo la sostenibilidad en el ámbito rural. El consumo en este sector va desde el aprovechamiento de

madera aserrada directamente de bosques nativos e implantados, hasta madera de demolición, residuos de madera de la industria del mueble y residuos de poda como fuente de materia prima para artesanos, por ejemplo (Pérez y Bacha, 2006; Guarnieri et al., 2006).

Lo que llama la atención en este sector es el hecho de que ciertos defectos de la madera, que generan irregularidades en un objeto artesanal, se convierten en una situación ventajosa si el artesano utiliza su creatividad (Abreu et al., 2009). Y esto se puede ver en defectos como los nudos de la madera, que varían en diferentes tipos de tamaño, forma, color y posición del nudo en la madera, generando posibilidades y oportunidades para que los artesanos creen nuevos objetos que agreguen valor al producto. Por ejemplo, tanto objetos hechos a mano como artefactos y revestimientos con textura decorativa simulando madera con nudo (Cocchetti y Razera, 2019). Por tanto, según Abreu et al. (2009), un defecto en la madera muchas veces se convierte en un punto de interés en un objeto.

En relación a la madera de *Pinus spp*, su uso también es habitual en el sector de objetos decorativos y artesanales (Pérez y Bacha, 2006; Bartolucci et al., 2020; Savitri et al. 2021), especialmente favorecido por sus características de buena densidad y trabajabilidad (Ladeira et al., 2018).

### 3. CONCLUSIONES

El conocimiento de los procesos fisiológicos de formación e inducción del nudo, así como la comprensión de la composición química y anatómica, son fundamentales para ampliar el entendimiento sobre los mecanismos que influyen en la resistencia de la madera en las zonas de intersección nudo-madera. Eso, combinado con las prometedoras técnicas de detección de nudos, aumenta la capacidad de calcular con mayor precisión las fuerzas que actúan en estas zonas (interfaz nudo-madera), viabilizando nuevas estrategias para reducir los perjuicios causados por la aparición de nudos en las piezas de madera.

Por otro lado, el estudio de los componentes químicos de los nudos apunta, no sólo hacia un mayor aprovechamiento de la madera, sino, especialmente, hacia nuevas fuentes de uso, incluyendo la comercialización del nudo en sí como un producto para el uso en decoración o materia prima para productos artesanales, por ejemplo, con una rentabilidad económica superior a la que ofrece actualmente. Y con posibilidades de uso en industrias farmacéuticas y alimentarias debido a su diferente constitución bioquímica.

### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L. B. D.; L. M. Mendes; J. R. M. D. Silva; L. E. D. R. Paula y F. A. Mori. 2009. Avaliação de resíduos de painéis de madeira gerados por indústrias moveleiras para aproveitamento na confecção de pequenos objetos: estudo de caso. *Ciência e Agrotecnologia* 33: 1747-1751. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000700008>
- Aloni, R. 2013. The role of hormones in controlling vascular differentiation. *Plant Cell Monographs*, 20: 99-139. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4_4)
- Audreu, J. P. y A. Rinnohofer. 2003. Modeling knot geometry in Norway Spruce from industrial CT images. *Computer Science*, 2749: 786-791. [https://doi.org/10.1007/3-540-45103-X\\_104](https://doi.org/10.1007/3-540-45103-X_104)

- Balloni, E. A. y J. W. Simões. 1980. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. *Série Técnica*, 1(3): 16-25.
- Bartolucci, B.; A. D. Rosa; C. Bertolin; F. Berto; F. Penta y A. M. Siani. 2020. Mechanical properties of the most common European woods: a literature review. *Frattura e Integrità Strutturale* 14(54): 249-274. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.18>
- Brasil. 1991. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 12.297: *Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral. Medição e quantificação de defeitos - Procedimento*. Disponible en: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/6299/nbr12297-madeira-serrada-de-coniferas-provenientes-de-reflorestamento-para-uso-geral-medicao-e-quantificacao-de-defeitos-procedimento>
- Brasil. 2002a. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 12.551: *Madeira serrada - Terminologia*. Disponible en: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/8308/nbr12551-madeira-serrada-terminologia>
- Brasil. 2002b. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 14.806: *Madeira serrada de eucalipto - Requisitos*. Disponible en: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/21889/nbr14806-madeira-serrada-de-eucalipto-requisitos>
- Buksnowitz, C.; C. Hackspiel; K. Hofstetter; U. Müller; W. Gindl; A. Teischinger y J. Konnerth. 2010. Knots in trees: strain distribution in a naturally optimised structure. *Wood Science and Technology* 44: 389-398. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0352-4>
- Carreira, M. R. y A. A. Dias. 2005. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus* sp. plantadas no Brasil. *Scientia Forestalis* 67: 78-87.
- Cecchetti, F. y D. Razera. 2019. A madeira redesenhada: considerações sobre o design de superfície no mobiliário planejado brasileiro. *Design e Tecnologia* 9(19): 77-86. <https://doi.org/10.23972/det2019iss19pp77-86>
- Eklöf, S.; C. Åstot; J. Blackwell; T. Moritz; O. Olsson y G. Sandberg. 1997. Auxin-cytokinin interactions in wild-type and transgenic tobacco. *Plant Cell Physiology* 38: 225-235. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a029157>
- Evans, J. 1992. *Plantation Forestry in the Tropics*. New York: Oxford, 403 p.
- Foley, C. 2001. A three-dimensional paradigm of fiber orientation in timber. *Wood Science and Technology* 35: 453-465. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002260100112>
- Gava, M. 2005. *Viabilidade técnica e econômica da produção de componentes construtivos para habitação social utilizando madeira serrada de pinus de terceira classe de qualidade*. (Dissertação de Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 233p. Disponible en: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-24102005-110841/en.php>
- Grundberg, S. y A. Grönlund. 1997. Simulated grading of logs with an x-ray log scanner-grading accuracy compared with manual grading. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12(1): 70-76. <https://doi.org/10.1080/02827589709355386>
- Guarnieri, P.; D. D. J. D. S Dutra; R. N. Pagani; K. Hatakeyama y L. A. Pilatti. 2006. Obtendo competitividade através da logística reversa: estudo de caso em uma madeireira. *Journal of Technology Management & Innovation* 1(4): 121-130.
- Hoadley, R. B. 2000. *Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology*. USA: The Taunton Press, 293 p.

- Holmbom B.; C. Eckerman; P. Eklund; J. Hemming; L. Nisula; M. Reunanen; R. Sjöholm; A. Sundberg; K. Sundberg y S. Willför. 2003. Knots in trees - A new rich source of lignans. *Phytochemistry Reviews*, 1(2): 331-340. <https://doi.org/10.1023/B:PHYT.0000045493.95074.a8>
- Jungnikl, K.; J. Goebels; I. Burgert y P. Fratzl. 2009. The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions. *Trees*, 23(3): 605-610. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0305-9>
- Ladeira, L. A.; C. C. A. Pereira; L. C. Couto y A. B. D. Reis. 2018. Determinação das propriedades físicas da madeira de pinus. sp. *Brazilian Applied Science Review* 2(7): 2244-2251. <https://doi.org/10.34115/basr.v2i7.637>
- Lam, F.; J. D. Barrett y S. Nakajima. 2005. Influence of knot area ratio on the bending strength of Canadian Douglas fir timber used in japanese post and beam housing. *Journal of Wood Science*, 51(1): 18-25. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0619-6>
- Lindberg, L. E.; S. M. Willför y B. R. Holmbom. 2004. Antibacterial effects of knotwood extractives on paper mill bacteria. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 31(3): 137-147. <https://doi.org/10.1007/s10295-004-0132-y>
- Lukacevic, M. y J. Füssl. 2014. Numerical simulation tool for wooden boards with a physically based approach to identify structural failure. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(4): 497-508. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0803-y>
- Mäkinen, H. 1999. Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(8): 1216-1224. <https://doi.org/10.1139/x99-06>
- Martín, M. H. C.; O. A. Molina y M. A. Garcia. 2002. Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería Revista Académica* 6(1): 29-38. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46760104.pdf>
- Melo, D. R.; D. M. Stangerlin; C. H. S. D. Menezzi; A. Darci; D. A. Gatto y L. Calegari. 2010. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 5(1): 67-73. <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a515>
- Mohan, S. K.; P. Venkatachalapathy y P. Sudhakar. 2014. Hybrid optimization for classification of the wood knots. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 63(30): 774-780. Disponible en: <http://www.jatit.org/volumes/Vol63No3/25Vol63No3.pdf>
- Montagu, K. D.; D. E. Kearney y R. G. B. Smith. 2003. The biology and silviculture of pruning planted eucalyptus for clear wood production - a review. *Forest Ecology and Management*, 179: 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00579-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00579-0)
- Napoli, C. A.; C. A. Beveridge y K. C. Snowden. 1999. Reevaluating concepts of apical dominance and the control of axillary bud outgrowth. *Current Topics in Developmental Biology* 44: 127-169. [https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(08\)60469-X](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(08)60469-X)
- Nicolini, E.; B. Chanson y F. Bonne. 2001. Stem growth and epicormic branch formation in understorey beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Botany* 87: 737-750. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1398>
- Oscarsson, J.; A. Olsson y B. Enquist. 2012. Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces. *Wood Science and Technology*, 46(4): 593-610. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0429-8>
- Perez, P. L. y C. J. C. Bacha. 2006. Mercado de madeira serrada. *Agroanalysis* 26(8): 21-23.
- Phelan, M.; S. A. Aherne; A. Wong y N. M. O'Brien. 2009. Bioactive properties of wood knot extracts on cultured human cells. *Journal of Medicinal Food* 12(6): 1245-1251. <https://doi.org/10.1089/jmf.2008.0125>

- Pietarinen, S. P.; S. M. Willför; M. O. Ahotupa; J. E. Hemming y B. R. Holmbom. 2006. Knot wood and bark extracts: strong antioxidants from waste materials. *Journal of Wood Science* 52(5): 436-444. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0780-1>
- Polli, H. Q.; G. G. D. Reis; M. D. G. F. Reis; B. R. Vital; J. E. M. Pezzopane y I. D. C. I. Fontan. 2006. Qualidade da madeira em clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden submetido a desrama artificial. *Revista Árvore* 30(4): 557-566. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000400008>
- Pompeu, G. D. S. D. S.; O. R. Kato; J. V. D. O. Moura y M. C. Maciel. 2018. Manejo dos sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Pará: Utilização dos resíduos de poda. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 13(2): 217-228. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i2.5604>
- Rocha, M. F. V.; L. R. Costa, L. J. Costa; A. C. C. D. Araújo; B. C. D. Soares y P. R. G. Hein. 2018. Wood knots influence the modulus of elasticity and resistance to compression. *Floresta e Ambiente* 25(4): e20170906. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.090617>
- Rosso, F. y P. Ninin. 1998. Variabilidad de los defectos de trozas de la especie teca (*Tectona grandis*) en diferentes densidades arbóreas, en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Ticoporo, Barinas-Venezuela. *Revista Florestal Venezolana* 42(2): 103-112.
- Samson, M. 1993. Modelling of knots in logs. *Wood Science and Technology*, 27: 429-437. <https://doi.org/10.1007/BF00193865>
- Savitri, S.; R. Safitri y G. Rachmat. 2021. Pine wood products and sustainability. *Prosiding ISBI Bandung* 1(1): 203-210. <http://dx.doi.org/10.26742/pib.v1i1.1497>
- Schmitz, G. y K. Theres. 1999. Genetic control of branching in Arabidopsis and tomato. *Plant Biology* 2: 51-55. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(99\)80010-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(99)80010-7)
- Scolforo, J. R. S.; F. W. Acerbi Júnior; A. D. D. Oliveira y R. Maestri. 2001. Simulação e avaliação econômica de regimes de desbastes e desrama para obter madeira de *Pinus taeda* livre de nós. *Ciência Florestal* 11(1): 121-139. <https://doi.org/10.5902/19805098500>
- Shimizu-Sato. y H. Mori. 2001. Control of outgrowth and dormancy in axillary buds sae. *Plant Physiology* 127: 1405-1413. <https://doi.org/10.1104/pp.010841>
- Slater, D.; R. S. Bradley; P. J. Withers. y A. Roland Ennos. 2014. The anatomy and grain pattern in forks of hazel (*Corylus avellana* L.) and other tree species. *Trees* 28: 1437-1448. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1047-5>
- Sousa, R. M. L. 2012. *Avaliação experimental da estabilidade dimensional de elementos em pinho bravo e madeira tratada termicamente*. (Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis), Escola de Engenharia, Universidade do Minho - Braga, Portugal, 65p. Disponible en: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/24768>
- Spatz, H. C. y B. heckes. 2013. Oscillation damping in trees. *Plant science* 207: 66-71. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.02.015>
- Takenaka, A. 2000. Shoot growth responses to light microenvironment and correlative inhibition in tree seedlings under a forest canopy. *Tree Physiology* 20: 987-991. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.14.987>
- Tong, Q.; I. Duchesne; D. Belley; M. Beaudoin y E. Swift. 2013. Characterization of knots in plantation white spruce. *Wood and Fiber Science* 45: 84-97. Disponible en: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/526>
- Viquez, E. y D. Pérez. 2005. Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(3): 381-390.

- Wang, X.; J. Ma y Q. Yang. 2013. Experimental research and finite element analysis on mechanical properties of pre-stressed laminated strand lumber. *Journal of Building Structures* 34: 149-157. Disponible en: <http://www.jzjgxb.com/EN/Y2013/V34/I2/149>
- Willför, S.; J. Hemming; M. Reunanen y B. Holmbom. 2003. Phenolic and lipophilic extractives in Scots pine knots and stem wood. *Holzforschung* 57(4): 359-372. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.054>
- Zern, T. L. y M. L. Fernandez. 2005. Cardioprotective effects of dietary polyphenols. *The Journal of Nutrition* 135: 2291-2294. <https://doi.org/10.1093/jn/135.10.2291>
- Zhang, S. Y.; G. Chauret; D. E. Swift y I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 945-952. <https://doi.org/10.1139/x05-307>

