

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la madera en el sector de la construcción es un hecho cada vez más generalizado debido a sus ventajas en cuanto a aspectos técnicos, estéticos y económicos. En la actualidad, gracias a la mayor concienciación social y a la legislación vigente, últimamente las obras de conservación y rehabilitación de edificios antiguos con estructura de madera han ido ganando terreno en el mercado, haciéndose indispensable que este campo se especialice y tecnifique lo suficiente para asegurar y garantizar el estado de conservación del patrimonio que hemos heredado con garantías.

La madera es un material que puede degradarse debido a la acción de agentes bióticos y abióticos, por ello es necesario conocer su capacidad de resistencia en cada momento. Con este fin se han ido realizando distintos ensayos a lo largo de los años.

Legalmente, la madera aserrada estructural se comercializa en lotes previamente clasificados por resistencia, habiéndose redactado diferentes normativas nacionales y europeas que pretenden recoger las bases para el diseño y cálculo de las estructuras en construcciones en madera. De esta forma se consigue que la madera se encuentre con unas características homogéneas que puedan ofrecer una garantía a la hora de trabajar y comercializar con ella.

En la evaluación de estructuras existentes, ya sea en obras de rehabilitación o de consolidación, las técnicas no destructivas acústicas (vibraciones inducidas o ultrasonidos), pueden resultar, en muchos casos, de gran utilidad en la toma de decisiones (Conde, 2003; Casado *et al*, 2008). La aplicación de estas técnicas para la estimación de las propiedades mecánicas, requiere conocer la velocidad de propagación de las ondas a través del material, y su densidad, con el fin de deducir el módulo de elasticidad dinámico según la ecuación  $E_d = V^2 \times \rho$ , donde  $V$  es la velocidad y  $\rho$  la densidad del material (Acuña, 2008). La velocidad resulta fácil de obtener con el equipo adecuado, pero la determinación de la densidad en piezas situadas en una estructura resulta complicada.

Se podrían utilizar valores medios recogidos de la bibliografía técnica, suponiendo que se conozca la especie, pero en numerosas ocasiones la especie es desconocida, y además, debido a la variabilidad de comportamiento de la madera dentro de una misma especie, sería un dato muy impreciso.

La densidad de la madera es una de las propiedades físicas que mejor se relaciona con las características resistentes del material. Esto hace que su determinación sea de gran ayuda para poder establecer correctamente los valores característicos del material. Pero dicha propiedad varía de forma importante entre las zonas altas y bajas del tronco del árbol, entre las zonas interiores y exteriores del árbol, por la cantidad de agua que contenga (es decir, por su humedad), por el grado de ataque que pueda haber sufrido, etc.

Los métodos que normalmente se utilizan para su determinación realizan un análisis puntual de la pieza, por lo que siempre, y como buena previsión, habrá de tomarse ese valor

hallado como mero indicativo de la zona adyacente donde se haya realizado el análisis. Por lo que la extrapolación de ese valor al resto de la pieza sólo se podrá justificar atendiendo a la homogeneidad particular del elemento ensayado en cuestión y de su estado de conservación.

La densidad básica o relativa de la madera tiene un efecto importante sobre el rendimiento y calidad del producto final y se considera como la propiedad de la madera más importante para casi todos los productos maderables derivados de las especies forestales (Einspahr *et al*, 1969). Además, para calcular la productividad total en biomasa de un rodal primero se debe conocer la densidad promedio de la madera (Zobel y Talbert, 1984). Por todo lo anterior, resulta de gran importancia desarrollar métodos rápidos, simples y precisos para la estimación de la densidad de la madera en especies forestales.

Como sabemos, la densidad viene expresada como la relación que existe entre la masa y el volumen de un cuerpo, aunque en realidad la propiedad física que se utiliza cuando nos referimos a la densidad de la madera es el peso específico, que relaciona el peso y el volumen:

$$\text{Peso específico o densidad } (\rho) = \text{Peso } (P) / \text{Volumen } (V)$$

Tanto el peso como el volumen varían dependiendo de la cantidad de agua (humedad) que contenga la madera, por lo que la determinación del peso específico lleva implícita la necesaria determinación de la humedad.

Sin embargo, como un elemento en servicio no puede ser desmontado para pesarlo y para medir su volumen, es necesario utilizar algún tipo de técnica no destructiva que nos permita estimar el valor de su densidad. Para ello se utilizan dispositivos que miden la dureza, resistencia o velocidad de propagación de ondas por el material, que está muy relacionado con la densidad. El penetrómetro es uno de estos equipos portátiles, consistente en un pequeño cilindro del que sale una aguja que penetra en la madera por la fuerza que le comunica un muelle. Este valor es registrado y de él se infiere el valor de la densidad.

La relación entre la resistencia a la penetración y la densidad y resistencia de la madera ha sido investigada con anterioridad arrojando resultados prometedores (Rammer *et al*, 2004), (Walter *et al*, 2005), llegando a la conclusión de que resulta una metodología muy útil junto con otros sistemas de medición indirecta como los ultrasonidos para la estimación del módulo de elasticidad del material (Divos *et al*, 1997), (Divos *et al* 1998). Más concretamente, la relación entre la densidad de la madera y el penetrómetro ha sido extensamente estudiada para la clasificación de árboles en pie desde finales de los años 70, encontrándose en la mayor parte de los casos importantes relaciones estadísticas (Greaves *et al*, 1996), (Watt *et al*, 1996), (Raymond *et al*, 1998), (Wang *et al*, 1999), (Silva *et al*, 2000), (López *et al*, 2002). Sin embargo, apenas hay referencias acerca de su aplicación en la estimación de la densidad de madera aserrada estructural.

El objeto de este trabajo es comprobar la validez de la técnica no destructiva de penetrómetro, para la estimación de la densidad de la madera aserrada de varias especies. Para ello se procederá a comparar el método de clasificación de la madera mediante ensayos

semidestructivos con penetrómetro "PILODYN" con los datos reales de densidad de las distintas especies de madera estructural con las que vamos a trabajar.

Así se pretende completar la escueta base de datos presente actualmente sobre el empleo de esta técnica para madera aserrada, así como aportar resultados nuevos sobre el funcionamiento en especies aún no ensayadas.

## **2. ANTECEDENTES**

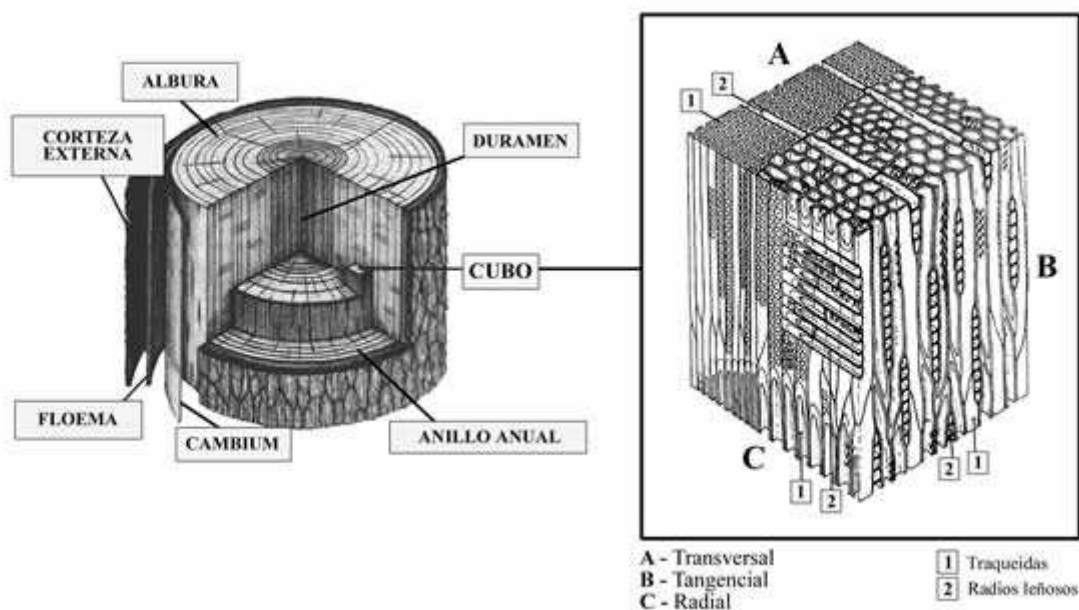
## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ANATOMÍA DE LA MADERA

Para comprender los distintos tipos de estudio de la madera, primero debemos conocer su composición básica.

La madera o xilema es la parte sólida del árbol, está situada por debajo de la corteza (formada por floema). Es un material heterogéneo y anisotrópico, es decir; está constituido por distintos tipos de células y su comportamiento físico-mecánico es distinto en cada una de estas zonas. Por ello en los estudios anatómicos de la madera se diferencian tres planos distintos, en los que aparecen distintas estructuras:

- ❖ Corte Transversal: perpendicular al eje del árbol.
- ❖ Corte Radial: paralelo a los radios o perpendicular a los anillos de crecimiento.
- ❖ Corte Tangencial: tangencial a los anillos de crecimiento o perpendicular a los radios.



**Figura 1.-** Los cortes anatómicos y los elementos principales de la madera (Torres, 2011)

A su vez existen diferencias anatómicas entre la madera de las gimnospermas y la de las angiospermas (Fig. 2 y 3).

### 2.1.1. Estructura de la madera de Gimnospermas

La madera de gimnospermas presenta una estructura bastante homogénea. Sus principales elementos estructurales son los siguientes:

1. Traqueidas axiales.

Son células alargadas y estrechas, de extremos más o menos puntiagudos, que ocupan el 95 % del volumen de madera. Estos elementos celulares tienen una longevidad muy corta, y es que una vez diferenciadas a partir de las células iniciales fusiformes del cambium; pierden su contenido celular, transformándose en tubos huecos de paredes lignificadas que desempeñan la función de conducción y sustentación del leño. Para que se produzca la circulación de sustancias en el leño, desde las raíces a las hojas, por las partes periféricas de la albura, las paredes de estas células presentan puntuaciones areoladas, a través de las cuales los líquidos pasan de una célula a otra.

2. Traqueidas radiales.

Tienen la misma naturaleza que las traqueidas axiales, pero con diferente orientación y con puntuaciones areoladas de menor tamaño, con forma de paralelepípedo, que se encuentran asociadas a los radios (radios heterogéneos). Normalmente forman sus márgenes inferior y superior y más raramente su interior. Siendo su presencia carácter identificativo de ciertas especies de los géneros *Picea* sp. y *Pinus* sp. Su principal función es la conducción transversal de los nutrientes del leño y el sostén del vegetal. Sus paredes internas, frecuentemente, presentan espesamientos irregulares típicos (espesamientos dentados o dientes) de gran valor diagnóstico.

3. Canales resiníferos.

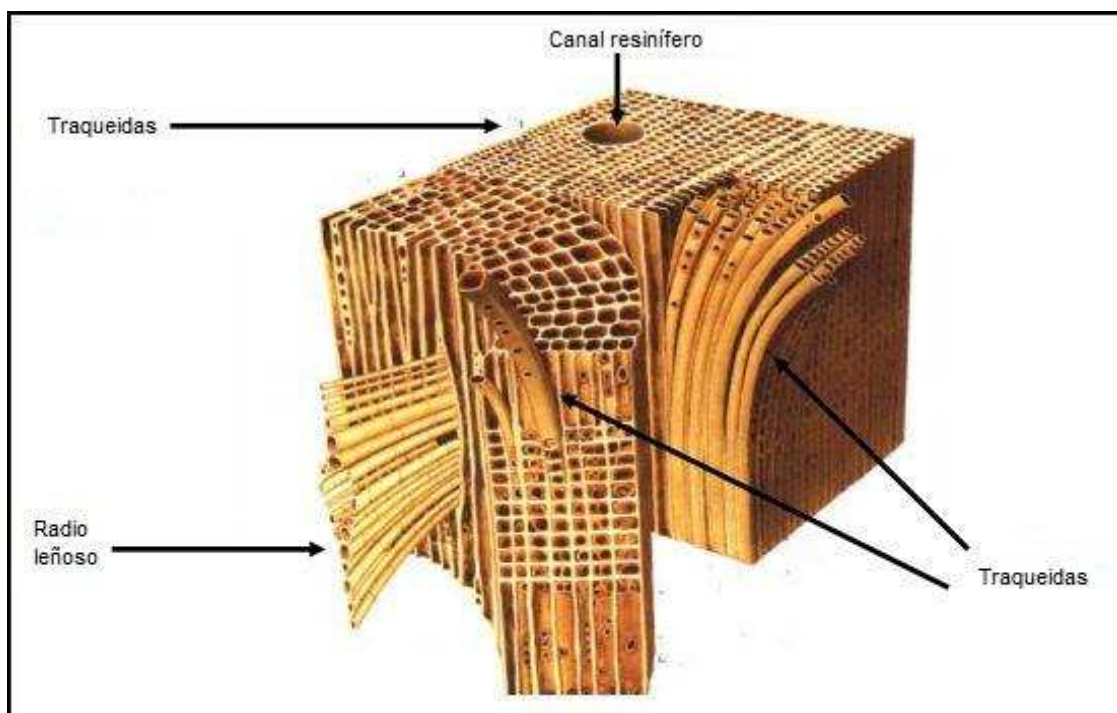
Se trata de espacios intercelulares que vierten resinas producto de su secreción. Constituyen un elemento importante en la diferenciación de las maderas, pues en algunas especies están siempre presentes (*Pinus* sp., *Picea* sp.), y en otras están ausentes (*Juniperus* sp., *Cupressus* sp.). Además sus diámetros y abundancia varían apreciablemente entre unas especies y otras.

Como resultado de heridas al árbol le pueden surgir canales resiníferos traumáticos. Estos canales presentan una distribución especial y características que los diferencian de los canales normales; estos últimos aparecen irregularmente en el leño, mientras que los canales resiníferos traumáticos aparecen en fajas regulares en los lugares correspondientes a la época en que se produjo la herida que los originó.

En este principio se basa la explotación de resina en árboles vivos y que sirve de materia prima en la fabricación de tintes, barnices, insecticidas, etc.

4. Células epiteliales.

Son células de parénquima axial especializadas para la producción de resinas, que circundan los canales resiníferos, formando un epitelio. Pueden presentar paredes más o menos espesas y lignificadas que sirven como característica diferencial.



**Figura 2.** Aspecto tridimensional de la madera de una conífera. (Universidad de la República, Uruguay, s.f.)

### 2.1.2. Estructura de maderas de angiospermas dicotiledóneas

La estructura interna de estos vegetales es más especializada y compleja que las coníferas. A continuación se representan los principales elementos estructurales:

#### 1. Vasos.

Únicamente aparecen en las angiospermas. Se trata de un conjunto de células que forman una estructura tubiforme cuya función no es otra que la de transportar líquidos. Para ello los elementos vasculares poseen unas perforaciones en sus extremidades, que dependiendo de su forma se clasifican en:

- **Simples:** presenta una sola y gran perforación, se presentan con mayor frecuencia que los otros tipos y pueden caracterizar a familias enteras.
- **Escarariformes:** numerosas perforaciones en una misma placa, dispuestas en series paralelas.
- **Reticuladas:** perforaciones de una misma placa dispuestas en forma de red.
- **Foraminadas:** las perforaciones de la placa son casi circulares.



Además poseen unas punteaduras intervasculares que sirven para realizar el intercambio de líquidos de vaso a vaso.

En la sección transversal, los vasos reciben el nombre de poros, y su disposición, distribución, abundancia y tamaño poseen un gran valor diagnóstico.

## 2. Parénquima axial.

Desempeña la función de almacenamiento en el leño. Sus células se destacan de las demás por presentar paredes delgadas, no lignificadas, punteaduras simples y por su forma rectangular y fusiforme en los planos longitudinales.

Hay dos tipos de parénquima: apotraqueal y paratraqueal. El primero, a su vez, puede presentarse de forma difusa (en agregados) o marginal (en bandas).

## 3. Fibras.

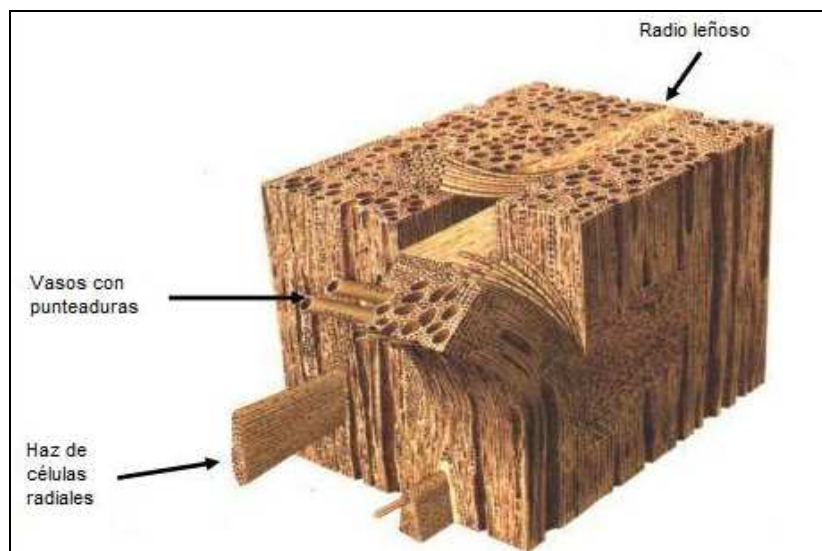
Son células existentes solamente en Latifoliadas, constituyendo el mayor porcentaje de su madera y con función única de sustentación. Siendo alargadas y estrechas, de extremidades afiladas que se parecen ligeramente a las traqueidas de Coníferas.

Se clasifican en: fibrotraqueidas y fibras libriformes. La base de la distinción de ellas es la naturaleza de las punteaduras, las fibrotraqueidas poseen punteaduras areoladas y las fibras libriformes punteaduras simples.

## 4. Radios.

Los radios, formados por parénquima radial, tienen la misma función que los de las Coníferas: almacenamiento y conducción transversal de las sustancias nutritivas. Presentan gran variedad en forma, tamaño y número de células que los componen. Por este motivo, junto con el parénquima axial (vertical) es uno de los elementos más eficaces en la diferenciación de maderas de Latifoliadas.

Por un lado pueden ser homogéneos (formados por un único tipo de células) o heterogéneos (formados por más de un tipo de células). Por otro lado, en cuanto al número de células dispuestas a lo ancho del radio, pueden ser uniseriados (constituidos por una hilera de células en la sección tangencial) o multiseriados (formados por más de una hilera de células en la sección tangencial).



**Figura 3.** Aspecto tridimensional de la madera de una angiosperma dicotiledónea. (Universidad de la República, Uruguay, s.f.)

## 2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Son aquellas que determinan su comportamiento ante los distintos factores que intervienen en el medio ambiente normal, sin producir ninguna modificación química en su estructura.

- **Anisotropía:** la madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que reconsidere. Esto hace que sea necesario referenciar el plano o la sección considerada. La madera, es más resistente a los esfuerzos axiales que tangenciales, siendo también de diferente comportamiento a la dirección radial (Fernández-Golfín, 2000). Por tanto, el análisis de cualquier propiedad deberá ser efectuado en esas dos direcciones: la radial y la tangencial. La necesidad de considerar valores diferentes para la propiedad según esas dos direcciones representa la principal diferencia respecto de otros materiales estructurales como el hormigón y el acero.

- **Heterogeneidad:** se puede decir que la madera es un material heterogéneo, puesto que los diferentes elementos anatómicos que la forman, se pueden combinar de forma distinta según la especie de madera considerada, pudiendo incluso existir diferencias dentro de la misma especie según sea su procedencia.

- **Higroscopicidad:** la madera es un material higroscópico que presenta una marcada afinidad por el agua, que hace que permanezca en equilibrio dinámico con las condiciones higrotérmicas del medio en el que se encuentre, es decir, que tiende a absorber o a perder agua según las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire. De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

- **Humedad:** el contenido de humedad de la madera se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de la masa anhidra. Dado que la masa se

determina mediante pesadas, esta definición resulta equivalente si se utiliza el peso en lugar de la masa. El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente el más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a todos los procesos de transformación de la madera, por ello en nuestro estudio sólo trabajamos con muestras a una misma humedad.

· **Hinchazón y merma:** la variación del contenido en humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Cuando aumenta su contenido se hincha, mientras que cuando disminuyese contrae o merma. Estos movimientos sólo tienen lugar cuando su contenido en humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras, que tiene lugar aproximadamente con un 30% de humedad.

A partir de ahí sólo se produce un aumento de peso y su volumen permanece constante. Para analizar el fenómeno de la hinchazón y merma, debe de tenerse en cuenta los aspectos de la anisotropía de la madera, la inercia higroscópica y la variabilidad de las distintas especies de madera.

· **Densidad:** se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad. Generalmente el contenido de humedad de referencia es el 12%. La densidad depende de la especie y es muy variable. Sus valores abarcan desde los 300 kg/m<sup>3</sup> de las especies ligeras como la madera de balsa, hasta los 1200 kg/m<sup>3</sup> de las maderas pesadas como el guayacán o el lapacho (AITIM, 1994).

· **Dureza:** la dureza es la resistencia que opone la madera a la penetración de ciertos cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos entre otros. Está relacionada con la densidad y tiene una marcada importancia en su relación con la dificultad de su trabajo. Las maderas se clasifican según su dureza en blandas, semiblandas, semiduras y duras.

## 2.3. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES ANALIZADAS EN EL ESTUDIO

### Amaranto o Nazareno (*Peltogyne* sp.)

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

El hábitat del amaranto se encuentra en Centroamérica y en la región tropical de América del Sur (desde México, a lo largo de Centroamérica, hasta alcanzar el sur de Brasil, Sao Paulo). Existen en América, aproximadamente unas 20 especies del género *Peltogyne*, de las cuales el *P. pophyrocardia*, *P. venosa*, *P. pubescens* y *P. densiflora*, tienen una especial importancia comercial. A pesar de su amplia área de distribución natural, sus masas forestales son escasas, sin embargo su producción y su exportación son estables.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura varía del rosa pálido al blanco grisáceo y el del duramen es casi blanco en el momento de su corta, que se va convirtiendo paulatinamente en

un violeta más o menos oscuro al contacto con el aire. Los radios leñosos son poco visibles y de tamaño medio.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 1.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de amaranto

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	830-880	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	156-194
Contracción	Nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	16900-17100
Coef. Contracción Volumétrica (%)	13,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	80
Coef. Contracción tangencial (%)	6,7-7,5	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	10,5
Coef. Contracción radial (%)	4,5-5,0	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	15,2-18,8
Dureza	Dura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	6,8

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil pero requiere utilizar equipos de gran potencia debido a su dureza. Es una madera apta para la obtención de chapas mediante corte a la plana pero se desaconseja para el desenrollo.

#### ❖ APLICACIONES

Madera con un amplio abanico de posibilidades, como puede ser el sector de la ebanistería y mobiliario, chapas para recubrimientos decorativos, escultura, construcción naval, carpintería exterior, interior y de armar, madera laminada, tornería, instrumentos musicales, mangos de herramientas, mesas y tacos de billar, mobiliario de jardín, aparatos de gimnasia, esquís, juguetes. Se usa principalmente para aplicaciones decorativas debido a su llamativo color violeta. En EE.UU. es una de las maderas más apreciadas para la confección de ataúdes de lujo.

### **Bubinga (*Guibourtia demeusei* J. Léonard)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

El bubinga se encuentra localizado en África Central, principalmente en Camerún y Gabón. Sus masas forestales son importantes, permaneciendo estable su producción y su exportación.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blancuzco o gris rojizo y el del duramen es pardo rojizo-rosado viejo. La madera de albura está claramente diferenciada. Presenta numerosas vetas delgadas y discontinuas de color violáceo, rosado o rojo y algunas vetas más anchas y difusas de color pardo. La fibra puede ser recta o ligeramente entrelazada, algunas veces también puede ser ondulada. El grano varía de fino a medio.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 2.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de bubinga

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	700-910	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	140-165
Contracción	Nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	12000-16265
Coef. Contracción Volumétrica (%)	14,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	66-76
Coef. Contracción tangencial (%)	7,9-8,6	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	-
Coef. Contracción radial (%)	5,1-5,3	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	9,3-12,6
Dureza	Dura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	5,0-9,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil. Siendo una de las maderas apta para la obtención de chapa mediante corte a la plana, aunque no se dispone de información práctica sobre su aptitud al desarrollo.

❖ APLICACIONES

Mobiliario y ebanistería (de lujo), chapas para recubrimientos decorativos, carpintería de exterior, interior y de armar, traviesas, tornería y fondos de vehículos y de contenedores.

Es una madera muy empleada para decoración y estética por la disposición y vistosidad de sus vetas, tiene un cierto parecido al Palisandro.

**Cerejeida (*Amburana cearensis* A.)**

❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el sur y el oeste de la cuenca del Amazonas (Paraguay, Bolivia, Perú, Argentina y Brasil). Sus masas forestales naturales son escasas, aunque su producción es importante y su exportación es estable.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera es beige amarillo o marrón amarillo, que a veces puede presentar vetados. La madera de albura está poco diferenciada del duramen. Los radios leñosos son finos y poco visibles, siendo la fibra recta aunque a veces puede ser ligeramente entrelazada. El grano varía de medio a basto.

La madera tiene un aroma agradable particular, que recuerda al de la vainilla. Aunque la madera no produce secreciones presenta un aspecto ceroso al tacto.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 3.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de cerejeira

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	550-650	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	81
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	8800
Coef. Contracción Volumétrica (%)	7,6	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	45
Coef. Contracción tangencial (%)	4,1	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	-
Coef. Contracción radial (%)	2,3	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	-
Dureza	Blanda	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	-

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994) y "Center for Wood Anatomy Research"

El aserrado es fácil. Presenta aptitudes positivas para la obtención de chapa tanto por desenrollo como por corte a la plana.

❖ APLICACIONES

Sobre todo en mobiliario y ebanistería, aunque también se usa como chapas para recubrimientos decorativos, carpintería exterior e interior, construcción naval, tornería, talla y escultura.

**Etimoé (*Copaifera salikounda* Heck.)**

❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el este y en el centro de África. Sus masas forestales, su producción y su exportación son muy escasas.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera varía del marrón ligeramente rojizo al marrón gris. La madera de albura está claramente diferenciada. La fibra puede ser recta o ligeramente entrelazada. El grano varía entre fino y medio.

Habitualmente la madera presenta bolsas de resina.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 4.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de etimoé

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	710	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	115
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	14560
Coef. Contracción	0,53	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	68

Alumno: Ignacio Cañas Gutiérrez  
 UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS  
 Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

Volumétrica (%)			
Coef. Contracción tangencial (%)	7,5	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	64
Coef. Contracción radial (%)	4,5	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	-
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	-

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994) y "Center for Wood Anatomy Research"

Utilizado para la obtención de chapa tanto por desenrollo como por corte a la plana.

#### ❖ APLICACIONES

Tablero contrachapado, chapas para recubrimientos decorativos, carpintería interior y exterior, y construcción de barcos.

#### **Jatoba (*Hymenaea courbaril* L.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra principalmente en América del Sur (desde sur de México hasta el norte de América del Sur: Brasil, Bolivia, Perú) y también en el Caribe y en las Antillas. Existen pocas masas forestales, pero su producción y exportación son importantes. Se encuentra Incluida en el Apéndice II del Convenio CITES, así como en la lista roja de la IUCN con la categoría de vulnerable aunque existe jatoba certificada por el FSC.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blanco rosada y el del duramen varía del beige pardo rosado al pardo rojo. A veces está finalmente veteado y puede presentar un brillo lustroso. La madera de albura está claramente diferenciada. Los radios leñosos son visibles y finos. La fibra es recta, aunque a veces puede presentar fibra entrelazada. El grano varía de fino-medio.

Puede presentar ligeras tensiones internas e incrustaciones pétreas (cristales).

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 5.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de jatoba

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	955-970	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	160
Contracción	Nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	23460
Coef. Contracción Volumétrica (%)	0,59	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	97-107
Coef. Contracción tangencial (%)	7,3-7,8	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	11,0-14,0
Coef. Contracción radial (%)	3,7-3,9	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	17,0-19,0

Dureza	Dura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	6,2
--------	------	---------------------------------------	-----

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994) y "Center for Wood Anatomy Research"

El aserrado es fácil. No es una madera apta para desenrollo, pero presenta una buena aptitud para obtención de chapa mediante corte a la plana, que es muy apreciada en el mercado de la madera.

#### ❖ APLICACIONES

Mobiliario y ebanistería, chapas para recubrimientos decorativos, carpintería interior y exterior, mangos de herramientas, tornerías, talla y escultura, construcción naval, tonelería e instrumentos musicales.

Las especies que poseen una alta durabilidad natural se pueden utilizar en aplicaciones donde exista una humedad permanente.

#### **Lenga (*Nothofagus pumilio* Poepp.et Endl.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en América del sur, principalmente de Chile.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera varía del blanco rosado de la albura, al amarillo rosado del duramen. Presenta la fibra recta y el grano fino.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 6.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de lenga

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	540	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	82
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	9800
Coef. Contracción Volumétrica (%)	0,42	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	48
Coef. Contracción tangencial (%)	3,2	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	6,4
Coef. Contracción radial (%)	2,1	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	-
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	5,5

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil. El secado es lento, con riesgos de atejado. Cepillado y encolado fácil. Presenta aptitudes positivas para la obtención de chapa tanto por desenrollo como por corte a la plana.



❖ APLICACIONES

Mobiliario y ebanistería fina, de interior, talla, torneados y muebles curvados. Chapas para recubrimientos decorativos. Carpintería de huecos y revestimientos, interior: puertas, tarimas, frisos, molduras, rodapiés...

**Talí o Elondo (*Erythrophleum ivorense* A. Chev.)**

❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el oeste, en el centro y en el este de África. Se encuentra en la selva siempre verde de Guinea, Gabón y Congo, donde forma grandes masas, aún así está incluida en la lista roja de la IUCN como vulnerable ya que proviene de bosques primarios que no cuentan con el certificado FSC. Su producción y exportación es muy escasa.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura varía del blanco-amarillo rosáceo y el del duramen del pardo-amarillento al pardo rojizo, que se va oscureciendo en función de su exposición a la luz, con lo que la madera de albura está claramente diferenciada y en la madera en rollo ocupa un espesor de 3 a 6 cm. Los anillos de crecimiento son poco visibles y cuando son anchos subrayados por una veta fina de color marrón. La fibra es muy entrelazada siendo grueso el grano.

El polvo de aserrado y mecanizado puede causar irritaciones en las vías respiratorias, mucosas y la piel de algunas personas.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 7.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de tali

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	890-960	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	120-177
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	19490
Coef. Contracción Volumétrica (%)	11,5	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	75-86
Coef. Contracción tangencial (%)	8,3-9,2	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	17,0
Coef. Contracción radial (%)	5,8	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	10,0
Dureza	Muy dura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	5,9-8,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994) y "Center for Wood Anatomy Research"

Presenta buenas aptitudes para la obtención de la chapa por desenrollo.

❖ APLICACIONES

Carpintería exterior, interior y de armar, obras hidráulicas, postes, puentes, traviesas, muebles de jardín y tornería.

### **Abedul (*Betula pubescens* Ehrh.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en casi toda Europa, desde España hasta Islandia o Suecia, exceptuando Grecia y Portugal. Sus masas forestales, su producción y su exportación son estables.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera varía del blanco amarillento al blanco anaranjado pálido. La madera de albura no se distingue del duramen. La fibra es recta y el grano es fino. Su aspecto o apariencia puede cambiar debido a la acción del insecto *Agromyza carbonaria*, que ataca el cámbium y origina marcas oscuras. Sin embargo, y sorprendentemente, las chapas de madera que se obtienen de los troncos atacados por el insecto son muy apreciadas, ya que las desviaciones de la fibra originan ondulaciones y flameados en las chapas de madera.

Se debe de tener precaución ya que el polvo producido por la madera puede causar irritaciones en la piel.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 8.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de abedul

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	640-670	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	120-144
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	13300-16200
Coef. Contracción Volumétrica (%)	11,4-17,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	42-60
Coef. Contracción tangencial (%)	0,31	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	52,6
Coef. Contracción radial (%)	0,24	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	11,8-14,2
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	7,5-10,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

En cuanto a las propiedades tecnológicas, esta madera presenta buenas aptitudes para la obtención de la chapa por desenrollado y mediante corte a la plana.

#### · APLICACIONES

Empleado para la fabricación de tablero contrachapado, chapas para recubrimientos decorativos, carpintería de calidad, muebles, tornerías y escultura, artículos deportivos, pasta de papel y postes.

### **Arce plateado (*Acer saccharum* Marsh.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Este arce se presenta de forma natural en el este de EE.UU. y Canadá. Sus masas forestales, su producción y su exportación son estables.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blanco con tonalidades rojizas y el del duramen marón pálido con tonalidades rojizas. La fibra es recta, aunque ocasionalmente puede aparecer ondulada, siendo el grano fino.

Capas de madera de gran valor por la presencia de los "ojos de perdiz".

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 9.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de arce

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	630-700	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	91-109
Contracción	Poco nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	11200-12600
Coef. Contracción Volumétrica (%)	14,0-15,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	46-62
Coef. Contracción tangencial (%)	9,0-10,0	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	4,1-4,4
Coef. Contracción radial (%)	5,0	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	12,0-16,0
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	6,2-6,6

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es muy fácil. Se trata de una madera apta para la obtención de chapa por desenrollo y mediante corte a la plana.

#### ❖ APLICACIONES

Empleada en suelos de madera industriales, mobiliario, chapas para recubrimientos decorativos, rodillos para máquinas para la industria textil, elementos de piano, elementos para la fabricación de zapatos, artículos deportivos y tornería.

Su principal característica es su gran resistencia a la abrasión y al desgaste, lo que la convierte en especialmente adecuada en pavimentos de uso intensivo o pesado.

Hay que tener en cuenta el aprovechamiento milenario de su savia como "jarabe de arce", consistente en la concentración y filtrado de la savia para obtener este dulce producto. En tal caso la calidad de la madera disminuye.

#### **Chopo (*Populus A. Chev.*)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se trata de una especie muy cosmopolita, que se encuentra formando masas agrupadas sobre todo en zonas de ribera, con disponibilidad de agua. Disponibilidad de grandes existencias.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

En general el color de esta madera suele ser amarillo pálido M-519 (UNE 48.103), aunque a veces su tonalidad varía, según se trate de madera de arbolado joven o viejo. Muy homogénea y de grano fino, presenta, a veces, en sus caras longitudinales finas vetas pardas. Es madera porosa, pero, al igual que otras de este mismo género, Los poros no son visibles a simple vista por su pequeño diámetro. Igualmente ocurre con los radios leñosos, que por ser muy estrechos tampoco son visibles en ninguna sección.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 10.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de chopo

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	420-480	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	88,3
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	74500
Coef. Contracción Volumétrica (%)	14,3	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	36,3
Coef. Contracción tangencial (%)	2,77	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	8,6
Coef. Contracción radial (%)	7,41	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	-
Dureza	Muy blanda	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	3

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

Presenta buenas aptitudes para la obtención de la chapa a la plana y por desarrollo.

#### ❖ APLICACIONES

Muy estimada en embalajes en general, es materia prima autorizada en el código Alimentario Español para la confección de embalajes destinados a estar en contacto con los alimentos. Se emplea en carpintería, en general, y también suele emplearse en ebanistería económica, especialmente en armazones de sillones e interiores de muebles. Estando completamente seca también se emplea en tornería y talla. Una de sus principales aplicaciones es para la fabricación de pasta de papel. La manufactura de fósforos y palillos de dientes consume una buena cantidad de esta madera.

#### **Plátano (*Platanus hybrida* Brot.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Amplia distribución de sus masas forestales, se encuentra en Asia y Europa, principalmente en el sur. Sus masas forestales son importantes; su producción y explotación son estables.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura varía del blanco al amarillo claro y el del duramen es marrón rojizo, con lo que existe una diferencia importante entre albura y duramen. Los radios leñosos son visibles, muy anchos, muy llamativos y decorativos. La fibra es entrelazada y el grano varía de fino a medio.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 11.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de plátano

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	490-610	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	97-120
Contracción	Poco nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	10300
Coef. Contracción Volumétrica (%)	14,1	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	42-63
Coef. Contracción tangencial (%)	8,0	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	2,0
Coef. Contracción radial (%)	5,0	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	9,8-12,0
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	6,3-6,9

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

Presenta unas buenas aptitudes para la obtención de chapa mediante corte a la plana.

❖ APLICACIONES

Empleado en chapas para recubrimientos decorativos, mobiliario, tornería, marquetería y mangos de herramientas.

**Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.)**

❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra naturalmente en el este de Estados Unidos, aunque se ha introducido en otros países.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera es marrón-dorado, presenta la albura diferenciada del duramen y un marcado contraste entre madera de verano y de primavera. Fibra recta.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 12.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de robinia

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	690-720	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	138
Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	10558
Coef. Contracción Volumétrica (%)	20,1	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	38,8
Coef. Contracción tangencial (%)	10,3	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	17,5
Coef. Contracción radial (%)	6,0	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	17,3
Dureza	Dura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	-

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

Buenas aptitudes para corte a la plana, aunque difícil mecanizado. En el encolado y acabado no existen problemas.

#### ❖ APLICACIONES

La madera se utiliza en carretería, ebanistería, tornería, etc. para hacer muebles, juegos para niños al aire libre y parqué. Tiene una elevada resistencia y una durabilidad natural muy buena. Se usa también como leña para hacer fuego o estacas.

#### **Tilo europeo (*Tilia platyphyllos Scop.*)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en toda Europa. Sus masas son estables, aunque su producción y su exportación son escasas.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera es blanco-amarillo pálido en verde, que se convierte en marrón pálido una vez que se ha secado. La madera de albura no se diferencia del duramen y los anillos de crecimiento están poco marcados.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 13.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de tilo

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	520-560	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	88-105
Contracción	Poco nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	7000-11000
Coef. Contracción Volumétrica (%)	8,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	43-53
Coef. Contracción tangencial (%)	6,0	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	6,7
Coef. Contracción radial	5,0	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	4,4

(%)			
Dureza	Muy blanda	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	4,5-5,5

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

Presenta buenas aptitudes para la obtención de la chapa mediante corte a la plana.

#### ❖ APLICACIONES

Mobiliario y ebanistería, talla y escultura, objetos de adorno y decoración, pasamanos y hormas para zapatos. Su cualidad más importante es su gran resistencia a la aparición de fendas y su facilidad de trabajo en todas las direcciones, por lo que es muy apreciada en ebanistería y escultura, más concretamente en la imaginería española, donde se ha empleado desde hace muchos años.

#### **Alerce europeo (*Larix decidua* Miller)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el centro de Europa, principalmente en los Alpes, los Carpetas, Suiza, Austria; y en el oeste de Rusia. Se ha introducido su cultivo en el Reino Unido (s. XVII), en el norte y en el oeste de Europa. Sus masas forestales, su producción y su exportación son escasas.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blanco amarillento y el del duramen es pardo rojizo. Los anillos de crecimiento están bien marcados y su contorno puede ser ligeramente ondulado. La fibra es recta y el grano fino.

Presenta numerosos canales resiníferos y la madera de duramen suele ser muy resinosa. Es un madera nudosa, que contiene taninos, que tiene un fuerte olor a resina (que se mantiene después de su secado), que resiste la acción de los ácidos y que cuando se almacena en verde está expuesta a decoloraciones. En algunas personas puede producir irritaciones en la mucosa.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 14.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de alerce

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	670-650	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	88-99
Contracción	Nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	10600-14500
Coef. Contracción Volumétrica (%)	12,0-15,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	45-62
Coef. Contracción tangencial (%)	6,5	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	-
Coef. Contracción radial (%)	3,5	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	8,8-10,9
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	5,0-7,5

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil, aunque la presencia de resina puede embotar las sierras y provocar su calentamiento. Presenta buenas aptitudes para la obtención de chapa por desarrollo, aunque apenas se desenrolla, y mediante corte a la plana, siendo este último el método que más se utiliza.

❖ APLICACIONES

Carpintería de armar, estructuras de madera laminada, carpintería interior y exterior, chapas para recubrimientos decorativos, ebanistería y postes.

**Pino de Oregón o Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziessi* Franco)**

❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en Norteamérica y se ha introducido su cultivo en el Reino Unido, Nueva Zelanda y Australia. Sus masas forestales, su producción y su exportación son importantes.

❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la albura es blanquecino con tonalidades pardos o rojizos y el del duramen varía considerablemente desde el amarillo o amarillo rojizo claro en los árboles con anillos de crecimiento estrecho hasta el rojo anaranjado o rojo oscuro en los árboles con anillos de crecimiento anchos, los cuales están muy marcados por los cambios bruscos de color entre la madera de primavera y la de verano, apareciendo pues la albura claramente diferenciada.

Los radios leñosos son visibles en los cortes radiales y la fibra generalmente es recta, aunque también puede ser ondulada o en espiral. El grano varía de tamaño medio o grueso.

Tiene canales resiníferos y numerosas bolsas de resina, con lo que la madera recién cortada tiene un característico olor a resina, pero distinto al de los pinos. Sus nudos suelen ser sanos y de gran diámetro.

Su aspecto y sus características varían considerablemente en función de las condiciones de crecimiento y de procedencia (a veces se utiliza la denominación "yellow fir" para la madera que tiene un crecimiento más lento y los anillos más estrechos, y el "red fir" para la que tiene un crecimiento más rápido y los anillos más anchos), pero todos se comercializan con el mismo nombre.

❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 15.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de pino de Oregón

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	510-550	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	70-100
Contracción	Poco Nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	11000-13200
Coef. Contracción Volumétrica (%)	11,0-12,5	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	42-68



Coef. Contracción tangencial (%)	7,5	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	3,1
Coef. Contracción radial (%)	4,8	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	7,0-10,2
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	3,7-6,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil. Presenta una buena aptitud para obtención de chapa mediante corte a la plana y por desenrollo.

#### ❖ APLICACIONES

Chapas para recubrimientos decorativos, tableros contrachapados, carpintería de armar, interior y exterior, construcción naval, postes, traviesas, pasta de papel y duelas de toneles.

Se emplea principalmente en construcción debido a su resistencia, ya sea como madera aserrada o en forma de tablero contrachapado.

#### **Pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el Sudoeste de Europa y Norte de Maruecos. Máxima distribución en España, donde forma grandes masas naturales desde las regiones más septentrionales hasta las más meridionales: en Galicia, Sierra del Teleno (Tabuyo del Monte, León), tierra de pinares segoviano-vallisoletanas, Gredos, Cazorla, Segura y Alcazaz.

Sus masas forestales, su producción y exportación son importantes.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blanco amarillento y el del duramen varía del amarillo naranja al rojo asalmonado. La madera de albura está claramente diferenciada. Los anillos de crecimiento son visibles y presentan un fuerte contraste entre la madera de primavera y la de verano. La fibra es recta y el grano varía de medio abasto o grueso.

Presenta numerosos canales resiníferos y la madera suele estar muy impregnada de resina, que le confiere un color rojizo. También presenta numerosos nudos, que pueden tener grandes diámetros.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 16.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de pino resinero

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	530-550	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	78
Contracción	Semierviosa	Módulo de elasticidad	7230

		(N/mm <sup>2</sup> )	
Coef. Contracción Volumétrica (%)	14,5	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	39,0
Coef. Contracción tangencial (%)	7,6	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	6,0
Coef. Contracción radial (%)	4,1	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	9,0
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	3,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es fácil. Presenta una buena aptitud para obtención de chapa mediante desenrollo.

#### ❖ APLICACIONES

Tableros alistonados, tableros contrachapados, carpintería interior, paletas, embalajes, encofrados, pasta de papel y tableros de partículas y de fibras.

Esta especie ha sido y es tradicionalmente empleada en la obtención de resina. Por lo que hay que tener en cuenta que la madera que procede de árboles resinados es de peor calidad.

#### **Pino tea (*Pinus taeda* L.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en el sureste de Estados Unidos (entre Virginia y Texas). Sus masas forestales, su producción y su explotación son importantes.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

La madera de albura tiene un color que varía desde el blanco hasta el amarillo pálido o naranja claro. El duramen se diferencia bastante bien, ya que tiene un color que varia del amarillo anaranjado al marrón rojizo o marrón claro. Los anillos de crecimiento son visibles. La madera de verano forma bandas muy oscuras y la transición entre la madera de primavera y verano es muy brusca y perfilada con un contraste llamativo. Los radios leñosos son muy finos, no visibles a simple vista, excepto cuando se incluyen en un canal resinífero transversal, formando un veteado en la superficie. La fibra es recta. El grano es grueso o basto.

Presenta numerosos canales resiníferos, lo que le confiere una baja densidad a la madera seca. Puede producir irritaciones en la piel. Tiene un fuerte olor a resina que permanece después de que se seca la madera.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 17.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de pino tea

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	400-500	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	74-105

Contracción	Seminerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	11100-14500
Coef. Contracción Volumétrica (%)	12,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	41-58
Coef. Contracción tangencial (%)	7,4-7,7	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	2,7-3,3
Coef. Contracción radial (%)	4,6-5,1	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	7,0-12,5
Dureza	Dura-Semidura	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	6,0-7,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994).

El aserrado es bastante fácil. Presenta una buena aptitud para obtención de chapa por desarrollo.

#### ❖ APLICACIONES

Chapas para recubrimientos decorativos, tableros contrachapados, carpintería de armar y de interior, construcción naval, postes, pasta de papel y papel kraft.

#### **Sequoia roja (*Sequoia sempervirens* Endl.)**

#### ❖ DISTRIBUCIÓN Y EXISENCIAS

Se encuentra en la costa oeste de Norte América, desde Oregon hasta Monterrey, en California. Sus masas forestales son escasas y su producción está muy controlada.

#### ❖ CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El color de la madera de albura es blanco o amarillo claro y el del duramen varía del rojo cereza claro al marrón rojizo oscuro, que cuando se expone a la intemperie se oscurece.

La madera de albura ocupa una franja muy estrecha. Los anillos de crecimiento se distinguen con facilidad por medio de una banda más oscura formada por madera de verano y son muy estrechos. La fibra es muy recta, de hecho esta madera se caracteriza por la gran rectitud de su fibra. El grano suele ser fino, aunque puntualmente y en algunas zonas puede ser basto o grueso.

Puede provocar reacciones alérgicas y asma en algunas personas. Tiene un alto contenido de taninos lo que la convierte en una madera ligeramente corrosiva. Resiste el ataque de los ácidos diluidos. Es poco inflamable y resistente al fuego.

#### ❖ PROPIEDADES DE LA MADERA

**Tabla 18.** Propiedades físico-mecánicas de la madera de sequoia

PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES MECÁNICAS	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	350-450	Flexión estática (N/mm <sup>2</sup> )	50-69
Contracción	Poco nerviosa	Módulo de elasticidad	6500-9200

		(N/mm <sup>2</sup> )	
Coef. Contracción Volumétrica (%)	8,0-10,0	Compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )	29-42
Coef. Contracción tangencial (%)	4,6	Compresión perpendicular (N/mm <sup>2</sup> )	2,9
Coef. Contracción radial (%)	2,4	Cortante (N/mm <sup>2</sup> )	5,6-6,4
Dureza	Blanda	Flexión dinámica (J/cm <sup>2</sup> )	2,5-3,6

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de AITIM (1994) y "Center for Wood Anatomy Research"

El aserrado se realiza con normalidad y presenta buenas aptitudes para la obtención de la chapa por desenrollo y mediante corte a la plana.

#### ❖ APLICACIONES

Carpintería exterior e interior, tablero contrachapado, tuberías y canales, recipientes para productos químicos, cajas de cigarros, ataúdes y postes.

Su corteza se utiliza para la fabricación de tableros de partículas y para filtros. De su raíz y mediante corte a la planta se obtiene chapa de madera conocida como "vavona" que tiene excelentes propiedades de absorción y de aislamiento.

## 2.4. PRINCIPALES MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE MADERA ASERRADA Y SITUACIÓN ACTUAL DE SU NORMATIVA

La calidad de la madera se evalúa en función de los defectos que esta contenga. Los defectos que disminuyen la resistencia son básicamente los nudos, desviación de la fibra, fendas, acebolladuras y gemas; aunque en realidad sería más exacto hablar de singularidades en lugar de defectos de la madera, ya que la mayoría responden a características casi inevitables del proceso de crecimiento del árbol o del propio aserrado (AITIM, 1994).

La evaluación de estas singularidades se realiza mediante las normas de clasificación, que varía en función del país. Los métodos visuales, en la actualidad, son los más extendidos y los mecánicos, de más reciente introducción, permiten automatizar completamente el proceso clasificatorio. Para la determinación de las características mecánicas de la madera se pueden utilizar, por tanto, métodos no destructivos y métodos destructivos.

### 2.4.1. Métodos no destructivos

En este tipo de ensayos, no se lleva a cabo la rotura de la pieza, por lo que no dañan las características ni las propiedades mecánicas de la madera. Los datos aportados por estas técnicas son suficientemente fiables para conocer el estado real de la madera.

La normativa europea permite la utilización de dos tipos de procedimientos para determinar la resistencia de la madera: la clasificación visual y la clasificación mecánica. El más utilizado de los dos procedimientos ha sido la clasificación visual. La clasificación visual, basada en la determinación de la calidad resistente de la madera aserrada a partir de las

singularidades que presentan las vigas, es un método que permite una rápida y económica clasificación de la madera, siendo además una técnica segura para el cliente pero severa para el productor, y por tanto subestima el material.

En la actualidad se buscan ecuaciones que permitan estos cálculos con técnicas sencillas y rápidas, de forma eficaz y fiable, que permitan la determinación de la calidad de la madera aserrada y su uso posterior.

La clasificación mecánica a través de métodos no destructivos (NDT, Non Destructive Testing) viene desarrollándose desde el siglo XX, y trata de identificar las propiedades físicas y mecánicas o defectos de un material o estructura sin modificar sus capacidades de uso. Éstas técnicas son adecuadas para medir algunos parámetros que estén relacionados con las propiedades de la madera (Pellerín & Ross, 2002).

#### 2.4.1.1. Ensayos no destructivos por métodos visuales

La evaluación visual consiste en la observación directa de las singularidades que presenta la madera. Básicamente, la evaluación compara el tamaño de las singularidades respecto a las dimensiones de la pieza evaluada, según se especifica en una norma de clasificación visual (Fernández-Golfín *et al*, 2003). El resultado de la evaluación clasifica el material en calidades asociables con características mecánicas conocidas. Entre las singularidades que más influyen en la pérdida de calidad de los productos estructurales de madera destacan: presencia de nudos, desviaciones de fibra, deformaciones y ataques biológicos.

Es una técnica de evaluación imprescindible para los técnicos antes de adentrarse en otras técnicas no necesariamente más complejas, pero que necesitan inversiones para su implementación en laboratorio, aserradero y obra. Dada la versatilidad y sencillez de esta técnica, es operativa en todos los ámbitos de actuación: laboratorio, industria y rehabilitación de edificios.

En Europa, cada país tiene una norma para las especies que son aprovechadas en su territorio, lo cual implica que en cada país existen diferentes denominaciones para las calidades visuales. Afortunadamente, los esfuerzos de normalización de la UE han conseguido elaborar un lenguaje común a través de las clases resistentes (Norma UNE-EN 338), las cuales definen qué valores mecánicos y físicos mínimos ha de tener un lote de madera al que se le asigna una clase resistente. Por lo tanto cada país ha calculado qué clase resistente le corresponde a cada combinación de calidad y especie y estos resultados se recogen en la norma UNE-EN 1912. Así es más sencillo utilizar madera clasificada visualmente, independientemente del origen de la madera y la clasificación visual utilizada.

Como ejemplos de normas de clasificación más habituales pueden citarse los siguientes:

- En España, 2011. Norma UNE 56544. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural", que define dos calidades: ME-1 y ME-2.

- En Francia, 2007. Norma NF B 52-001. “Reglas de utilización de la madera en la construcción: clasificación visual para su empleo en estructuras para los principales especies coníferas y frondosas”, que define tres calidades: ST-1, ST-11 y ST-111.

- En Italia, 2007. Norma UNI 11203. “Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Terminologia delle configurazioni strutturali e delle parti costituenti”.

- En Alemania, 2001. Norma DIN 4074, Parte 1. “Clasificación de la madera aserrada para su uso estructural”, que define tres calidades: S7, S10 y S13.

- En Australia, 2000. Norma AS 2082.

- En países nórdicos, 1997. Norma INSTA 142. “Reglas nórdicas de clasificación visual de la madera para uso estructural”, que define cuatro calidades: T0, T1, T2 y T3.

- Recomendada por la CEE, 1997. Define tres calidades: S6, S8 y S10.

- En el Reino Unido, 1996. Norma BSI.

- En EEUU y Canadá, 1996. Norma NGRDL y NLGA respectivamente.

- Norma AMERICANA. Define tres calidades: Select, Finish y Commons.

Los elementos utilizados para las clasificaciones son los mismos, es decir, los defectos o anomalías naturales o de aserrado que poseen las piezas. De esta manera es posible obtener un paralelismo en las diferentes clasificaciones para una misma pieza de madera maciza (ver tabla 1).

**Tabla 19.** Correspondencia entre clases resistentes y calidades

NORMA Y PROCEDENCIA	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30
DIN 4074 (abeto, píce, pino silvestre)		S7			S10		S13
INSTA 142 (abeto, píce, pino silvestre)	T0		T1		T2		T3
NGRDL (pinos del Sur de EE UU)							Select
NLGA (abeto sitka Canadá)			Select				
NGRDL y NLGA (pino de Oregón de EE UU)					Select		
UNE 56544 (pino silvestre de España)			ME-2				ME-1
Pino radiata (España)		ME-2	ME-1				
Pino pinaster (España)			ME-2		ME-1		

Fuente: Elaboración propia a partir de normativa de clasificación visual

#### 2.4.1.2. Ensayos no destructivos por métodos instrumentales

A continuación se describen los métodos instrumentales no destructivos utilizados en el presente estudio para la clasificación de la madera y/o el diagnóstico de daños en maderas.

- Xilohigrómetro:

Dada la importancia que la humedad tiene en el comportamiento y propiedades de la madera, una medición fiable de la misma es esencial en cualquier actuación. El xilohigrómetro se utiliza en todos los escenarios para asegurar que las prescripciones establecidas para el contenido de humedad son cumplidas antes de instalar la madera o en rehabilitación para corregir la estimación de la resistencia residual.



**Figura 4.** Equipo xilohigrómetro (serbusamantenimientoindustrial.com)

- Ultrasonidos:

La técnica de ultrasonidos se basa en que la capacidad resistente de la madera se puede determinar a partir de la velocidad de la onda sónica, puesto que la presencia de oquedades, nudos, degradaciones internas, etc., hacen que la velocidad de transmisión de las ondas generadas sea diferente de la que presenta en el material sin defectos.

La velocidad de la onda generada se calcula a partir del tiempo que tarda en recorrer la distancia entre dos sensores (palpador emisor y palpador receptor). Conocida la densidad de la madera se puede calcular el Módulo de Elasticidad Dinámico (MOEd), éste está muy relacionado con el Módulo de Elasticidad Estático (MOE). La onda de frecuencia utilizada se encuentra entre 20 y 500 kHz. Este rango relativamente bajo de frecuencias se usa debido a la gran atenuación de la onda en la madera. La velocidad del sonido y el coeficiente de atenuación se usan como indicadores de la capacidad resistente, y el aumento del tiempo de transmisión entre dos sensores puede localizar defectos.

Las dos técnicas basadas en la onda ultrasónica más comunes son: el método del eco y el método de transmisión.

En el método del eco sólo se utiliza un sensor, que funciona a la vez como transmisor y receptor, ya que sólo se mide la onda reflejada. El tiempo transcurrido, entre la emisión de la onda y el momento en que se recibe la proporción de onda reflejada es menor si la onda es

reflejada por defectos que si es reflejada por el extremo más lejano de la pieza. Es el método más factible en las mediciones "*in situ*" en las que el acceso a ambos lados no es posible.

En método de transmisión se coloca un sensor en cada lado de la pieza que está siendo inspeccionada. Un generador eléctrico de pulsación manda una señal a través del sensor transmisor. Si hay algún defecto en el camino de la onda ultrasónica, parte de esta onda es reflejada. La señal reflejada será recibida por el sensor transmisor, mientras que el receptor recibirá la señal reducida. La proporción de estas dos señales se puede usar para profundizar más en la investigación de los defectos internos.

La variación de la velocidad nos permite detectar defectos que implican cambios en la dirección de la fibra como son los nudos. En definitiva, la velocidad de propagación será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos en la madera, debido a que por ejemplo, las fendas, las desviaciones de la fibra generales o las locales producidas por los nudos, provocan la interrupción de la continuidad de la transmisión de la onda y por tanto retardan su llegada al receptor. Por otro lado, estudios realizados con madera de coníferas (Hermoso, 2003), demuestran que la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas aporta información importante en la evaluación global de las propiedades mecánicas de la madera estructural; en concreto sobre el módulo de elasticidad.

La onda ultrasónica es afectada por numerosos factores ambientales y características de la madera. Los factores más comunes son la especie, posición de la fibra, humedad, el deterioro y los defectos o singularidades de la madera:

- Especie: debido a la estructura interna de cada tipo de madera, cada una posee un rango de velocidades de propagación ultrasónica característica. Este rango será más parecido en madera perteneciente al mismo grupo botánico, o lo que es lo mismo, que la especie sea una conífera o una frondosa.

- Posición de la fibra: las propiedades mecánicas de la madera son diferentes para las direcciones longitudinal, radial y tangencial, de su estructura de crecimiento; igualmente, las velocidades de propagación de la onda en esas tres direcciones difieren entre sí. Así, las velocidades en sentido longitudinal poseen un mayor rango de velocidades, alrededor de 5000 m/s, luego están las normales próximas a los 2000 m/s y, por último, las tangenciales cercanas a los 1500 m/s.

- Humedad: el contenido en humedad, al igual que influye de manera significativa en las propiedades mecánicas, también lo hace en las velocidades de propagación. Para los contenidos de humedad entre el 12 y el 28 %, la velocidad de la onda disminuye con el contenido en humedad. Sin embargo, para madera con humedad superior al 28 % (punto de saturación de la fibra), no hay influencia alguna de la humedad sobre la velocidad, que mantiene un valor constante.

- Deterioro: las pudriciones, las galerías, etc., hacen que la velocidad longitudinal de las ondas ultrasónicas resulta ineficaz para detectar el deterioro, sobre todo en estados iniciales. Al estar dañada la madera, se produce mayor discontinuidad en sentido transversal



que en el longitudinal de la fibra; por ello, la velocidad normal es más sensible a las pérdidas de densidad, de modo que, cuando se produce una pérdida de densidad en la madera debido al deterioro en la misma, descienden los valores de la velocidad normal.

· Defectos y singularidades: los nudos, las fendas, las acebolladuras, las gemas, etc., provocan en general un descenso puntual de los valores de velocidad de transmisión, al suponer una discontinuidad en el material (esto no ocurre en las gemas, por ser un defecto superficial). No ha sido posible valorar cuantitativamente, ya que estas pérdidas de velocidad se producen de manera brusca y puntual, sin zonas de transición (Goia de Oliveira *et al.*, 2002).

En cuanto a las principales ventajas del método podemos destacar:

- Facilidad en la toma de datos.
- Técnica comúnmente empleada, con amplia base de datos.
- Poco peso del equipo, buena manejabilidad
- Precio asequible.

Los principales inconvenientes son:

- Dificultad de lectura en piezas no exentas, de difícil acceso.
- No se detectan singularidades próximas a la zona de lectura.
- Generan resultados aunque las piezas estén rotas, con lo que los datos pueden ser de baja fiabilidad.



**Figura 5.** Equipo de ultrasonidos modelo Sylvatest

- Métodos de vibración:

Esta técnica permite realizar una clasificación de la madera según la normativa UNE-EN 338:2003, basada en la determinación del Módulo de Elasticidad dinámico (MOEd) y la densidad de la madera. Se basa en la medición de la frecuencia de resonancia de la vibración longitudinal producida en un extremo de la pieza y que la atraviesa en su totalidad. Dicha vibración se ve afectada por el contenido y posición de las anomalías como nudos, fendas... etc., dentro de la pieza a estudiar.

La forma mediante la que se produce la vibración en la madera es el golpeo en un extremo de la pieza con un martillo. En el otro extremo, se coloca un micrófono que recoge la frecuencia de la vibración producida. A través de la frecuencia y la densidad obtenida de la pieza, por conocimiento de sus dimensiones, contenido en humedad y peso, se calcula un módulo de elasticidad dinámico (MOEd).

El cálculo del Módulo de Elasticidad longitudinal dinámico procede del análisis del espectro de la frecuencia natural de la vibración paralela a la fibra producida por un pequeño impacto en un extremo de la pieza. Finalmente, la ecuación que permite el cálculo del Módulo de Elasticidad longitudinal dinámico,  $E_{dyn}$ , es la siguiente:

$$E_{dyn} = (2 * L * f_n / n)^2 * \rho$$

Siendo:

$L$  : Longitud total de la pieza.

$f_n$  : Frecuencia de resonancia.

$n$  : Modo de vibración.

$\rho$  : Densidad.

Es importante señalar que la pieza a evaluar no debe estar empotrada por lo que esta técnica se ciñe a su utilización en laboratorio e industria de producción de madera o en control del material a la recepción en obra.



**Figura 6.** Equipo de medición de vibraciones Microsecond Timer, Fakopp

- Termografía:

La técnica de termografía consiste en la medición de temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Utilizando cámaras termográficas o de termovisión, se puede convertir la energía radiada en información sobre temperatura.

Permite detectar con un alto grado de sensibilidad los cambios de temperatura de la pieza, deduciendo así las principales propiedades y características de la misma (López *et. al*, 2013).

Es una técnica poco empleada pero que presenta grandes posibilidades como herramienta de control de plagas, ya que permite localizar las galerías de coleópteros perforadores o termitas debido a que las galerías son huecos de aire que se aprecian con facilidad al contrastar con la temperatura de la madera.

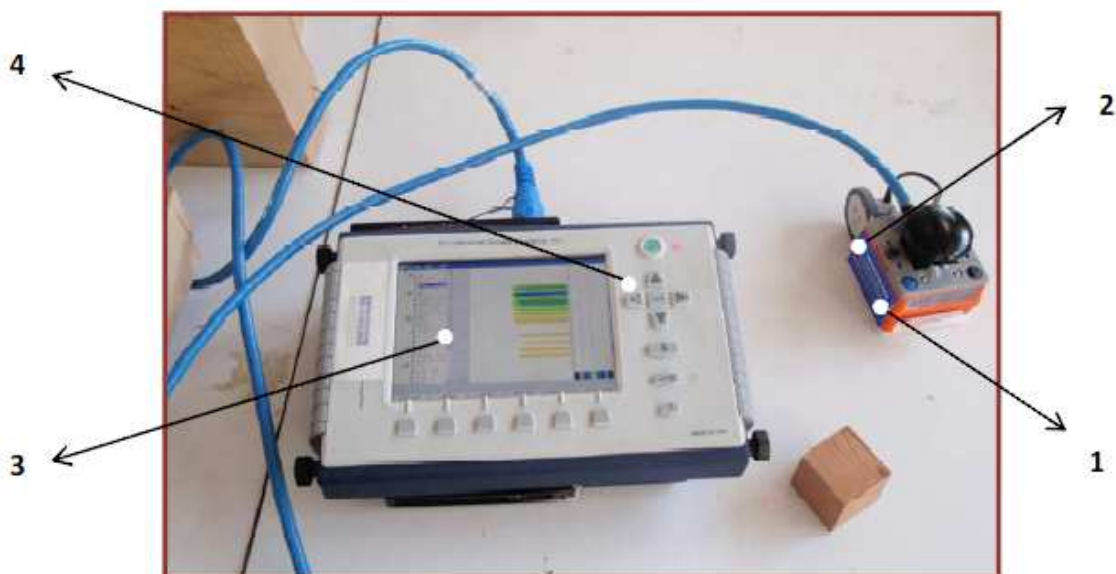


**Figura 7.** Termografía en madera para control de plagas

- Georradar:

La técnica de georradar se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo con frecuencias comprendidas entre los 10 MHz y 2 GHz. Fue diseñada para propagar energía en el subsuelo o cualquier otro medio material. La incidencia de esta energía en las heterogeneidades del medio provoca fenómenos de reflexión, refracción y difracción, que pueden ser detectados por una antena receptora que capta la energía electromagnética tras su propagación por el medio material.

En la actualidad se trabaja en la detección de diferencias de densidad tanto en laboratorio como en estructuras de edificios históricos. Es una herramienta transportable y por tanto, de relativa facilidad de uso en estructuras. Además se puede conocer con exactitud milimétrica la posición de las zonas de acción del ataque de xilófagos, humedad, incluso se pueden generar imágenes tridimensionales de la estructura interna de la madera (Santamaría, 2012).



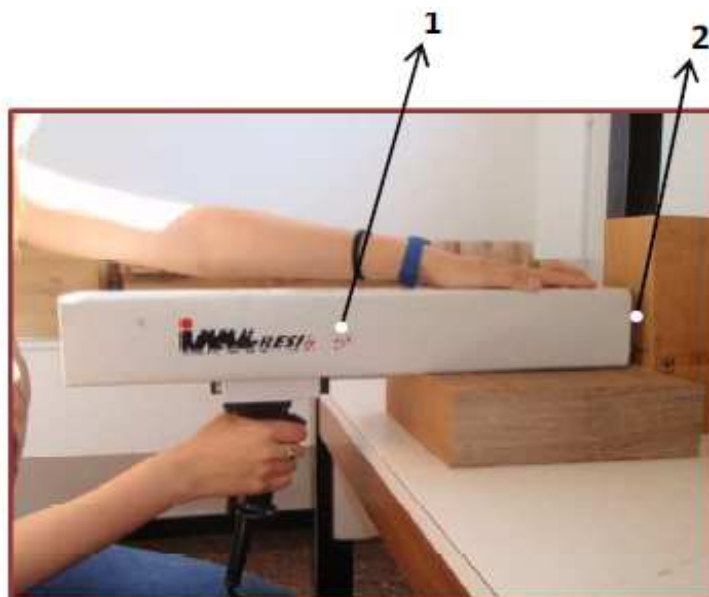
**Figura 8.** Equipo de georradar. (1) Emisor, (2) Receptor, (3) Equipo de visualización, (4) Unidad central. (Abellán & Escudero, 2011)

- Densitómetro:

Conjunto de técnicas orientadas a determinar la densidad de la madera. Se tratan de métodos normalmente sencillos que muestran resultados interesantes, puesto que la densidad es un buen indicador de las propiedades mecánicas de la madera, sin embargo las estimaciones son puntuales y su información debe ser complementada por otros métodos. Los instrumentos más empleados para el cálculo de la densidad son:

- ❖ El **resistógrafo** tiene similar aplicación que el penetrómetro, consiste en un taladro eléctrico que se introduce con velocidad de avance constante en el material ensayado y mide, por medio del consumo de potencia eléctrica, la mayor o menor resistencia ofrecida. Con el tiempo, este instrumento ha sido aligerado para conseguir una relativa facilidad de transporte y uso. El taladro realiza perforaciones en torno a los 3 mm de diámetro. Se utiliza generalmente para verificar el estado de ciertos puntos críticos (Acuña *et. al*, 2011).

El trabajo de mayor profundidad sobre este equipo está expuesto en una tesis doctoral (Capuz, 2003), en el cual se demuestra que la técnica es capaz de "acertar" a discriminar las calidades visuales obtenidas previamente por la UNE 56544; obtiene buenas predicciones de la densidad ( $R^2 > 60\%$ ) en madera libre de defectos y que no es peor que la técnica de ultrasonidos. Además, presenta una aplicación práctica sobre piezas estructurales de un edificio ganadero con resultados aceptables.



**Figura 9.** Equipo resistógrafo. (1) Instrumento de perforación, (2) Aguja perforadora. (Abellán & Escudero, 2011)

❖ El **arrancador de tornillos** consiste en un equipo muy sencillo cuyo principio es contrario a los anteriores. Consiste en extraer un tornillo, previamente introducido en una determinada sección de madera de dimensiones establecidas y situado a una profundidad exacta. De este modo queda registrada la máxima fuerza aplicada al arrancar el tornillo. El aparato consta de un dispositivo de sujeción del tornillo, un transductor que registra la fuerza máxima de arranque, y un husillo, para la extracción del tornillo. Los resultados se relacionan con otros ensayos destructivos y no destructivos, y se estudia su valor como predictor de determinadas propiedades de la madera y de la existencia de daños bióticos no visibles en la superficie de las piezas. Mediante esta técnica, se ha constatado que existe una relación estadísticamente significativa, con un grado de confianza del 95% (sanite.net), entre la densidad media de las viguetas y la fuerza media de arranque obtenida en cada una de ellas.



Figura 10. Equipo de arranque de tornillos (sanite .net)

- ❖ El **penetrómetro** consiste en un instrumento portátil que se emplea para estimar la dureza o capacidad de penetración de una varilla metálica de 1,5 mm de diámetro sobre la madera. La varilla es impulsada mediante un muelle a fuerza constante. En función de la profundidad alcanzada por la varilla (en mm) se pueden estimar valores de dureza y densidad.

Las aplicaciones del penetrómetro a lo largo de la historia han sido varias, desde el campo de la selvicultura y explotaciones (clasificación de árboles en pie y trozas, variación de la especie con la estación, clima, altitud..., variaciones genéticas, etc.), hasta el campo industrial (caracterización de la madera aserrada estructural y derivados), pasando por el de sanidad forestal (detección precoz de enfermedades) o diagnóstico de patologías en madera de construcción). El equipo aparece representado en la figura 12.

Las principales limitaciones y ventajas de dicha técnica se pueden resumir en las siguientes:

- Medida muy local y superficial (máx. de 40 mm de profundidad y 0,25 cm<sup>2</sup> de superficie). Se recomienda realizar varias medidas a lo largo de la pieza y evitar zonas “particulares”.
- Económico (600 – 1000 euros) (Bobadilla *et al.*, 2008)
- Fácil de manejar y mantener. No requiere fuente de energía eléctrica, ni pilas ya que funciona mediante energía mecánica.
- Resultados aceptables como estimador de densidad (con coeficiente de correlación superiores a 0,80), aunque no suficientemente sensible si lo que se desea conocer es el valor exacto de densidad, en cuyo caso puede complementar al estudio realizado con otras técnicas no destructivas.



La densidad puede combinarse con la técnica de ultrasonidos o de vibraciones para calcular el módulo de elasticidad dinámico, que es un buen estimador de la elasticidad real del material.

**Tabla 20.** Técnicas no destructivas más empleadas para determinar distintas propiedades de la madera

Parámetros de Estudio	Técnicas más empleadas	Tipo de método
Defectos de la madera / Daños biológicos	Georradar	Electromagnético
	Termografía	
	Resistógrafo	Mecánico
Módulo de elasticidad dinámico	Ultrasonidos	Acústicos
	Vibraciones	
Densidad	Resistógrafo	Mecánicos
	Penetrómetro	
	Arranque de tornillos	

Fuente: elaboración propia

#### 2.4.2. Métodos destructivos

Los métodos destructivos se fundamentan en la rotura de las piezas para la determinación de sus características. Con este tipo de ensayos se determina el módulo de rotura de las piezas y se calculan sus propiedades físico-mecánicas.

El trabajo en laboratorio se suele realizar mediante la máquina universal (IBERTEST), que determina las características resistentes de la madera como son la resistencia a flexión, módulo de elasticidad, y resistencia a tracción en dirección paralela y perpendicular a la fibra, según la normativa europea EN y la norma española UNE:

- EN 336, 2003. Madera estructural. Dimensiones y tolerancias.
- EN 518, 1996. Madera estructural. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente.
- EN 519, 1998. Madera estructural. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.
- EN 338, 2003. Madera estructural. Clases resistentes.
- EN 384, 2004. Madera estructural. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.
- EN 408, 2004. Madera estructural. Madera estructural y madera laminada.
- EN 1912, 1999. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales.



## 2.5. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE ESTIMACIÓN DE DENSIDADES MEDIANTE PENETRÓMETRO

La herramienta del penetrómetro se empleó por primera vez en la evaluación del estado de los postes de madera usados en tendidos eléctricos (Wilson 1981), sobre todo para la detección de hongos de pudrición en los mismos.

Siendo realizado el primer trabajo de estimación de densidades a finales de la década de los 80, en el cual se obtuvo un coeficiente de correlación entre el nivel de penetración y la densidad de la madera de *Pinus banksiana* Lamb. de  $R^2 = 0,66$  (Villeneuve et al., 1986).

Así mismo, el penetrómetro ha sido utilizado para obtener información en árboles en pie, tanto para determinar la presencia de ataques bióticos como para predecir sus propiedades mecánicas o para seleccionar los árboles que se van a cortar en las claras, o los árboles más interesantes en un estudio de progenies (López, 1995; Wu, 2010).

También se ha utilizado en la realización de inspecciones en los elementos estructurales de edificios existentes con la finalidad principal de determinar la densidad (Watt 1996, Iñiguez et al., 2006, Bobadilla et al., 2009).

Además se ha investigado su relación con los procesos de degradación fúngica también con buenos resultados (Niemz et al., 1998) y su relación con el contenido de humedad de la madera (Smith et al., 1986).

En cuanto al uso de dicha herramienta como determinante de la densidad, se han realizado distintos estudios, muchos de ellos sobre madera en obra o árboles en pie, pero sobre madera aserrada en laboratorio existen muy pocos. A continuación resumiremos los principales estudios realizados.

El penetrómetro ha sido empleado como estimador de densidades en tableros derivados de la madera. De hecho, un reciente estudio ha comprobado varias técnicas no destructivas y ha llegado a la conclusión de que los equipos más fiables para estimar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros de fibra y de partículas son tanto el penetrómetro como el equipo de inducciones vibratorias, y que de entre ambos equipos cabe destacar al primero por su rapidez, ligereza y sencillez a la hora de tomar las mediciones (Pérez, 2012).

Uno de los pocos ensayos realizados sobre madera aserrada consistió en el análisis de 150 muestras de pino radiata, con dos penetraciones por muestra (cara tangencial y radial). Los resultados muestran un valor de penetración ligeramente superior en la cara tangencial que en la radial (12,83 y 12,20 mm. respectivamente). Sin embargo se obtienen unos valores muy bajos en los coeficientes de determinación:  $R^2 = 0,31$ , más aún en el plano tangencial:  $R^2 = 0,19$  (Lecumberri, 2012).

La calidad de los resultados obtenidos en la comparación de las estimaciones de densidad y el nivel de penetración para las especies nacionales de pino silvestre, nigra y radiata (Bobadilla et al, 2007), no parece ser muy elevada, ya que se obtienen unos valores de

densidad, estimados mediante penetrómetro Pilodyn, que no se ajustan de manera muy precisa a los reales (coeficiente de determinación del 52,4%), estimando unos valores medios de densidad algo inferiores a los reales (del 9 al 11%). A pesar de contar con un amplio conjunto muestral, 395 probetas.

Una parte del estudio sobre determinación de propiedades de la madera de pino radiata mediante el empleo de técnicas no destructivas, realizado en madera en obra, consistió en el uso de penetrómetro Pilodyn. En dicho estudio se obtuvieron unos valores de penetración para la cara tangencial y radial de la madera, obteniéndose unos valores medios algo superiores en la dirección tangencial que en la radial. (Bobadilla *et al.*, 2009). Finalmente se obtiene un coeficiente de determinación de la densidad a partir de la penetración muy reducido,  $R^2 = 0,31$ .

Un par de años después, se amplió el estudio entre varias especies de pinos. En dicha investigación se pudo comprobar que la penetración en la cara tangencial era prácticamente igual a la de la cara radial, con unos valores de penetración de 8,5 y 8,3 respectivamente. Además se obtuvo un valor aceptable de  $R^2$  de 0,63.

Resultados aceptables han ido apareciendo en nuestro país, como las predicciones de densidad obtenidas por medio de regresión lineal, con un coeficiente de determinación del 59% (Iñiguez, 2007), donde han sido estudiadas 155 piezas de pino radiata, 120 de pino silvestre y 120 de pino laricio. En todas las muestras fueron tomadas medidas de profundidad de penetración tanto en el plano radial como en el tangencial, finalmente se pudo comprobar que los resultados de penetración no arrojaron ninguna información concluyente sobre la influencia de la dirección de penetración del Pilodyn en la madera (valores medios de 10,3 en la dirección tangencial y 10,0 mm en la radial).

Otro estudio parecido, en este caso sobre el pino resinero, demuestra que la densidad de la madera determinada en laboratorio y el nivel de penetración mediante el dispositivo Pilodyn, presentan una correlación aceptable ( $R^2 = 0,73$ ), lo que indica la susceptibilidad del método como medio estimativo de la densidad (Notivol *et al.*, 2008).

Finalmente, los análisis comparativos de estimación de densidades mediante métodos directos e indirectos, demuestran que el penetrómetro puede ser tan eficiente como los métodos directos pero con un costo de tan sólo el 5 % de éstos. Llegando a alcanzar unos coeficientes de correlación superiores a 0,86 (Harrand, 2007), o de 0,83 para la especie *Eucalytus grandis* (Böthing, 2001).

Aún así, muchos autores proponen la utilización de este instrumento acompañando a otras técnicas no destructivas (Basterra *et al.*, 2005; Lecumberri, 2012).

## **3. OBJETIVOS**

### 3. OBJETIVOS

El presente estudio pretende contribuir en el conocimiento sobre la metodología de estimación de las propiedades físico-mecánicas de la madera mediante técnicas no destructivas, más concretamente en el empleo del penetrómetro como indicador de la densidad. Se pretende profundizar sobre una herramienta cada vez más empleada en los últimos años, pero que tiene escasos estudios en madera aserrada.

Para ello se han fijado los siguientes objetivos:

1.- Obtención de muestras manejables en la que estén representados los tres planos de la madera (corte perpendicular, tangencial y radial) a partir de piezas de mayores dimensiones de madera aserrada.

2.- Obtención de resultados sobre profundidad de penetración en la sección radial y tangencial de cada muestra.

3.- Establecer el grado de fiabilidad o validez del método de penetrómetro "Pilodyn" como estimador de la densidad relativa de la madera en 18 de las especies más utilizadas en construcción.

4- Relación de los resultados extraídos del presente estudio con los obtenidos en estudios publicados anteriormente, con el fin de sacar conclusiones.

5.- Relación entre los resultados obtenidos de la madera de frondosas tropicales y templadas y la madera de coníferas.

## **4. MATERIAL Y MÉTODOS**

## 4. MATERIAL Y MÉTODOS

### 4.1. OBTENCIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

El primer punto a realizar en el laboratorio no es otro que el de obtener las muestras con las que vamos a realizar los posteriores estudios. Para ello se han seleccionado varias piezas de madera aserrada de 18 especies distintas adquiridas por el departamento de Tecnología de la madera de la ETSIIAA de Palencia (Universidad de Valladolid).

Fronosas tropicales:

- Amaranto o Nazareno (*Peltogyne* sp.)
- Bubinga (*Guibourtia demeusei* J. Léonard)
- Cerejeida (*Amburana cearensis* A.)
- Etimoe (*Copaifera salikounda* Heck.)
- Jatoba (*Hymenaea courbaril* L.)
- Lengua (*Nothofagus pumilio* Poepp.et Endl.)
- Talí o Elondo (*Erithrophleum ivorense* A. Chev)

Fronosas boreales o templadas:

- Abedul (*Betula pubescens* Ehrh.)
- Arce plateado (*Acer saccharum* Marsh.)
- Chopo (*Populus euramericana* Dode.)
- Plátano (*Platanus hybrida* Brot.)
- Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.)
- Tilo europeo (*Tilia platyphyllos* Scop.)

Coníferas:

- Alerce europeo (*Larix decidua* Miller.)
- Pino de Oregón o abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco)
- Pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.)
- Pino tea (*Pinus taeda* L.)

- Sequoia roja (*Sequoia sempervirens* Endl.)

Una vez seleccionadas, el protocolo de recogida de datos en laboratorio consistió en marcar a las maderas y posteriormente cortarlas, con la sierra de mesa del Laboratorio de Tecnología de la Madera, en tetraedros más manejables de pequeño tamaño (entre 1 y 3 cm de lado aproximadamente), cuyas caras contienen los tres planos de la madera. De cada especie fueron tomadas 40 muestras, la mitad fueron empleadas para determinar las propiedades de la madera en su plano radial y la mitad restante para el plano tangencial. Es decir, se obtuvieron un total de 720 muestras.

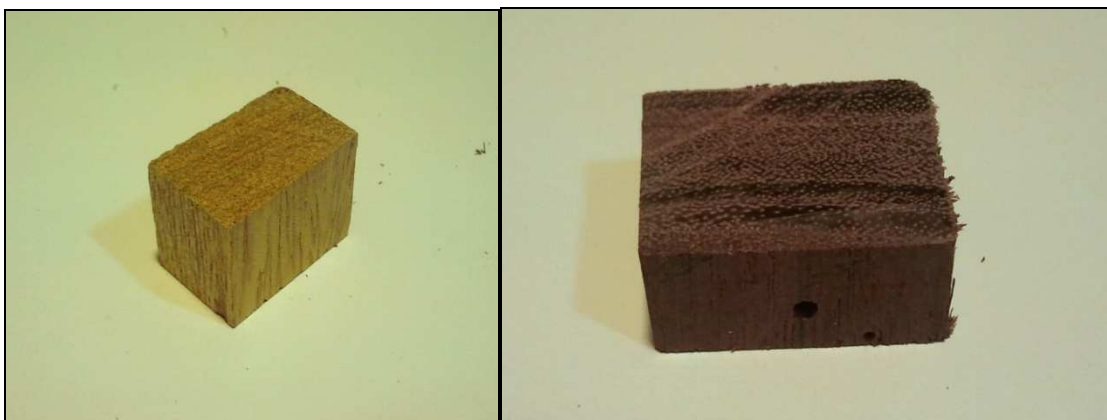


Figura 11. Muestras de los tetraedros una vez cortados.

## 4.2. CÁLCULO DEL NIVEL DE PENETRACIÓN DE LA MADERA

Mediante el penetrómetro fue calculada la resistencia a la penetración de 40 muestras por especie, aprovechando cada muestra para un sólo ensayo, se emplearon 20 muestras para estudiar la resistencia en la sección radial y las otras 20 para la sección tangencial. El utilizado en este trabajo es el equipo Pilodyn. Se trata de un equipo de concepción y manejo muy simples cuyo procedimiento de ensayo consiste en:

- Cargar la varilla metálica mediante una baqueta que trae el propio equipo, para ello se introduce la baqueta cargadora por el Pilodyn empujando la varilla metálica hasta quedar ésta retenida por la acción de un tope en el interior del aparato.

- Retirar la baqueta cargadora del interior del aparato y apretar firmemente contra la superficie a medir, quedando perpendicular a la misma.

- Disparar la varilla metálica percutora sobre la madera, impulsada por la fuerza elástica de un resorte. Para ello simplemente hay que pulsar el gatillo situado en la parte posterior del aparato.

- Una vez que la varilla se ha clavado en la madera, aparece una leyenda numérica en un lateral del equipo, que nos indica la profundidad de penetración de la varilla en la madera, en milímetros. Se debe de realizar sin dejar de presionar el aparato contra la superficie perforada.

El equipo fue diseñado para estimar la densidad y la dureza de la madera tanto aserrada como de árboles en pie y es considerado "no destructivo" ya que únicamente se realiza un pequeño orificio de unos 2,5 mm de diámetro y con una profundidad variable entre 5-20 mm, dependiendo de la resistencia a la penetración que ofrezca la madera. En ningún caso, este orificio causa daños importantes a la madera o al vegetal vivo.



Figura 12. Penetrómetro Pilodyn empleado en el trabajo en laboratorio

### 4.3. CÁLCULO DE LA DENSIDAD RELATIVA MEDIANTE EL MÉTODO EMPÍRICO

En primer lugar se procedió a la medición de los tres lados del tetraedro mediante el calibre. El funcionamiento del calibre es sencillo, consta de dos partes, una fija que lleva una regla graduada con divisiones en centímetros y en milímetros (corresponde al inicio de la medida) y otra parte móvil que lleva incorporado una segunda regla llamada "nonio" (marca el final de la medida, los decimales). Dispone de una ruleta que empuja la parte móvil de la herramienta contra la pared de la muestra, arrastrando a esta contra la parte fija, marcando así la medida muy precisa (con un error de 25 micrómetros).

Esta herramienta tiene la ventaja de ser más precisa y de fácil manejo que el escalímetro graduado, aunque es importante que la muestra tenga un corte perpendicular, puesto que de lo contrario se puede magnificar el error.

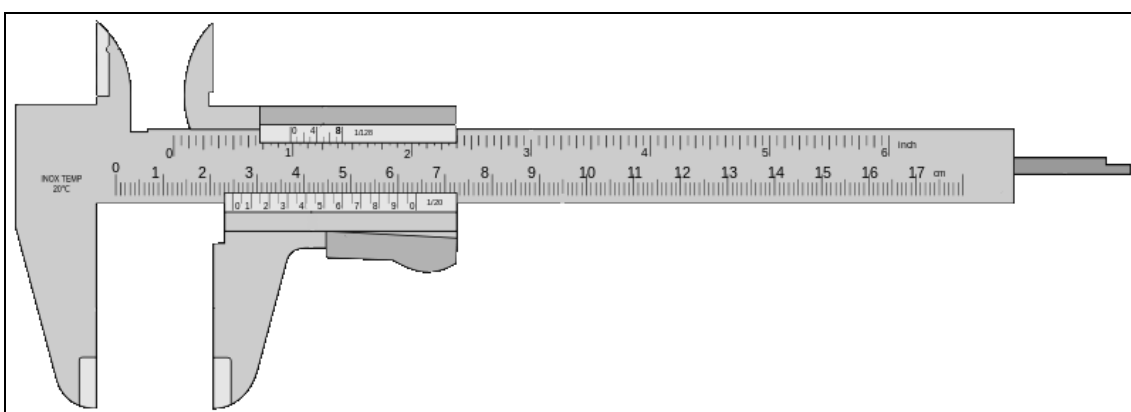


Figura 13. Representación de calibre. Fuente: modificado de Gómez, S.M. (2006)

Una vez leídas las medidas de cada lado del tetraedro obtendremos su volumen en verde (Vv),



$$Vv = l_1 * l_2 * l_3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

En tercer lugar se procederá al pesado de los tetraedros, primero se calcula el peso en húmedo y, posteriormente, el peso en seco o anhidro ( $P_o$ ), previo secado de las maderas durante al menos 24 horas en estufa a 100°C de temperatura.



**Figura 14.** Estufa empleada en el laboratorio de maderas

Para el pesado se empleó la balanza analítica del laboratorio de maderas, con una precisión de 0,1 miligramos.

Además se utilizó un desecador, cuyas sales se encargan de mantener a las muestras en su estado anhidro, evitando así que los tetraedros de madera seca se carguen de la humedad ambiental.



**Figura 15.** Balanza analítica empleada en el trabajo de laboratorio

Con los datos de peso anhidro ( $P_o$ ) y volumen verde ( $V_v$ ) se obtuvo el valor de densidad básica de la madera ( $\rho_b$ ) de cada tetraedro, según la fórmula:

$$\rho_b = P_o / V_v \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Así como la humedad de la madera ( $H$ ) mediante los datos de peso en húmedo ( $P_h$ ) y peso en seco ( $P_o$ ):

$$H = (P_h - P_o) / P_o * 100 \text{ (\%)}$$

#### 4.4. ANÁLISIS DE DATOS

El procedimiento empleado para el procesado de los datos fue el siguiente:

En primer lugar se recogieron los datos en tablas que más tarde se digitalizaron mediante el software "Excel 2007". Este programa nos permite manejar los datos y disponerlos de forma correcta.

Más tarde se pasaron estas tablas al software "STATGRAPHICS CENTURIÓN XV versión 15.2.06" que nos permite realizar una gran variedad de análisis estadísticos, tanto descriptivos como comparativos o predictivos, con el conjunto de variables obtenidas en laboratorio.

Lo primero fue realizar un resumen estadístico con el fin de describir los valores medios de las variables a analizar (penetración, densidad y humedad).

A continuación se procedió al análisis comparativo mediante comparación de los valores obtenidos por especie para los ensayos de penetración y densidad. Este proceso se repite comparando entre grupos taxonómicos (frondosas y coníferas) así como entre tipos de dirección de penetración en la madera (radial y tangencial).

Una vez realizado el análisis comparativo se procedió a realizar el análisis predictivo mediante correlación entre los valores de penetración y densidad, con el fin de interpretar las diferencias y similitudes existentes entre las dos propiedades. Se utilizaron regresiones simples para conocer el coeficiente de correlación y calcular el nivel de validez del método de penetración Pilodyn como estimador de la densidad de la madera. Por último se realizó un Modelo Lineal Generalizado (MLG) para cada uno de los ensayos incluyendo, además de la densidad, la especie como factor categórico y de esta manera comprobar si existe dependencia de la especie para los cálculos de densidad.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en el estudio respecto a las variables de densidad, penetración y humedad para cada especie.

- Profundidad de penetración (mm)
- Densidad (g / cm<sup>3</sup>)
- Humedad (%)

#### 5.1.1. Penetración

A continuación aparecen los datos de la variable profundidad de penetración por especies, en forma de tabla. En ella se muestran valores de: número de muestras analizadas (N), media, coeficiente de variación en % (C.V.), valor máximo (Máx.) y valor mínimo (Mín.).

**Tabla 21.** Análisis general de los valores de penetración por especie

ESPECIE	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
Amaranto	40	8,925	5,609	10,5	8,0
Bubinga	40	5,85	8,699	7,0	5,0
Cerejeira	40	11,325	7,384	13,0	10,0
Etimoe	40	8,838	8,632	10,0	7,0
Jatoba	40	6,125	6,337	7,0	5,5
Lenga	40	13,1	8,478	16,0	11,0
Tali	40	8,55	9,803	10,5	7,0
Abedul	40	9,563	7,221	12,0	8,5
Arce	40	7,45	5,438	8,5	7
Chopo	40	12,813	12,766	16,0	10,0
Pátano	40	9,738	6,041	11,0	8,5
Pseudoacacia	40	9,3	7,078	10,5	8,0
Tilo	40	11,875	6,925	13,5	10,0
Alerce	40	14,075	12,580	17,0	11,5
Pseudotsuga	40	17,589	4,813	19,0	15,5
Pino resinero	40	16,563	8,706	19,0	14,0
Pino tea	40	13,288	21,824	18,5	9,5
Sequoia	40	19,3	15,871	24,0	15,0

En primer lugar hay que señalar que el tamaño muestral para cada especie es de 40. Con lo que se puede asegurar que disponemos de un número de muestras suficiente para

obtener unos resultados suficientemente válidos. Por otro lado, se puede observar que los valores medios de penetración oscilan entre los 5,85 mm de la bubinga y los 19,3 mm de la sequoia, siendo las especies con nivel de penetración mayor las pertenecientes al grupo taxonómico de las coníferas, dato probablemente relacionado con la densidad de las mismas. En cuanto a los coeficientes de variación para la penetración por especies podemos destacar al chopo y alerce, con valores superiores al 10%, pero sobre todo a la sequoia y pino tea con coeficientes de variación superiores al 15%, todos ellos coinciden en tener unos valores medios de penetración elevados, superiores a 12 mm.

**Tabla 22.** Análisis general de los valores de penetración por especie según dirección del corte

ESPECIE	Dirección	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
Amaranto	Radial	20	8,7	3,438	9,0	8,0
	Tangencial	20	9,15	6,167	10,5	8,5
Bubinga	Radial	20	5,85	7,892	7,0	5,0
	Tangencial	20	5,85	9,646	7,0	5,0
Cerejeira	Radial	20	10,825	4,804	12,0	10,0
	Tangencial	20	11,825	6,759	13,0	10,0
Etimoe	Radial	20	8,5	8,952	10,0	7,0
	Tangencial	20	9,175	6,680	10,0	7,5
Jatoba	Radial	20	6,15	7,028	7,0	5,5
	Tangencial	20	6,1	5,704	7,0	5,5
Lenga	Radial	20	13,125	6,756	15,0	11,5
	Tangencial	20	13,05	9,701	15,5	11,0
Tali	Radial	20	8,025	6,848	9,0	7,0
	Tangencial	20	9,075	8,245	10,5	8,0
Abedul	Radial	20	9,325	5,004	10,5	8,5
	Tangencial	20	9,8	8,177	12,0	9,0
Arce	Radial	20	7,525	5,044	8,0	7,0
	Tangencial	20	7,375	5,767	8,5	7,0
Chopo	Radial	20	12,375	14,05	16,0	10,0
	Tangencial	20	13,25	10,847	16,0	10,5
Pátano	Radial	20	10,0	4,588	11,0	9,0
	Tangencial	20	9,475	6,285	10,5	8,5
Pseudoacacia	Radial	20	9,25	8,132	10,5	8,0
	Tangencial	20	9,35	6,035	10,5	8,5
Tilo	Radial	20	12,35	4,754	13,5	11,5
	Tangencial	20	11,4	6,613	13,0	10,0
Alerce	Radial	20	12,8	6,872	14,0	11,5
	Tangencial	20	15,325	9,749	17,0	12,5
Pseudotsuga	Radial	20	17,025	3,498	18,0	15,5

	Tangencial	20	18,15	3,696	19,0	17,0
Pino resinero	Radial	20	15,9	7,329	18,5	14,5
	Tangencial	20	17,225	8,182	19,0	14,0
Pino tea	Radial	20	11,075	8,7	13,0	9,5
	Tangencial	20	15,5	15,838	18,5	10,0
Sequoia	Radial	20	18,25	15,988	23,5	15,0
	Tangencial	20	20,35	14,262	24,0	16,0

El número total de muestras, por cada tipo de corte de la madera, pertenecientes a cada una de las especies es igual a 20, con lo que se puede asegurar que la cantidad de muestras estudiadas es suficiente para obtener unos resultados aceptables tanto para la dirección transversal como para el radial. Además, del análisis descriptivo de los datos, se puede observar que el nivel de penetración medio para la dirección radial oscila entre los valores de 5,85 mm de la especie bubinga y los 18,25 mm de la sequoia, especies protagonistas también en cuanto a la dirección tangencial ya que presentan los valores extremos de 5,85 mm (bubinga) y 20,35 mm (sequoia), valores muy distantes entre sí, casi cuatro veces superior el nivel de penetración en la sequoia que en la bubinga. Por último cabe destacar que los valores de penetración según la dirección de la misma en la madera no varían mucho, excepto en las especies chopo, pino tea y sequoia. Siendo la sequoia la especie que presenta valores más dispares tanto en la dirección radial como en la tangencial (C.V. próximos a 15%), el pino tea también presenta un valor de C.V. próximo a 15% para la dirección tangencial, mientras que el chopo lo presenta en la radial.

### 5.1.2. Densidad

En la siguiente tabla aparecen los datos de la variable densidad por especies. Las variables estadísticas estudiadas son las mismas que para el nivel de penetración.

**Tabla 23.** Análisis general de los valores de densidad por especie

ESPECIE	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
Amaranto	40	0,756	6,988	0,799	0,604
Bubinga	40	0,806	2,833	0,864	0,765
Cerejeira	40	0,614	2,543	0,663	0,586
Etimoe	40	0,540	3,726	0,586	0,502
Jatoba	40	0,955	3,355	1,037	0,898
Lenga	40	0,441	7,390	0,513	0,389
Tali	40	0,910	1,250	0,930	0,900
Abedul	40	0,547	4,143	0,579	0,497
Arce	40	0,728	2,503	0,788	0,700
Chopo	40	0,380	3,529	0,414	0,340
Plátano	40	0,591	1,813	0,615	0,569
Pseudoacacia	40	0,695	2,742	0,743	0,644

Tilo	40	0,470	4,884	0,546	0,415
Alerce	40	0,508	10,843	0,580	0,432
Pseudotsuga	40	0,442	1,548	0,467	0,430
Pino resinero	40	0,448	2,169	0,463	0,418
Pino tea	40	0,544	8,038	0,615	0,457
Sequoia	40	0,354	13,956	0,411	0,281

El conjunto muestral es suficiente para realizar un análisis descriptivo de la densidad por especies, ya que el número de muestras analizadas por especie es de 40. Como se puede apreciar en la tabla, las especies estudiadas abarcan un amplio abanico de densidades, habiendo especies con valores muy bajos como la sequoia y el chopo (0,354 y 0,380 g / cm<sup>3</sup> respectivamente), y otras con elevados valores como la Jatoba y el Tali (0,955 y 0,910 g / cm<sup>3</sup> respectivamente). Generalmente las muestras de cada especie presentan unos valores de densidad muy parecidos, salvo en el alerce, cuyo C.V. es próximo al 10% y en la sequoia, con un C.V. del 14%.

Por otro lado los valores medios de densidad obtenidos parecen estar dentro o próximos a los estándar para la especie, salvo los de etimoe (540 g / cm<sup>3</sup>), que son bastante inferiores a los teóricos (710 g / cm<sup>3</sup>), según los datos de AITIM y de "Center for Wood Anatomy Research". Esto no quiere decir que los valores sean incorrectos, sino más bien que, probablemente, el conjunto de muestras analizadas en el estudio pertenecen al mismo árbol el cual tenga una menor densidad que la media debido a causas genéticas, factores ecológicos o gestión de la masa, o a la posición de la muestra dentro del árbol (Espinoza, 2004).

### 5.1.3. Humedad

Para los valores de humedad no se ha hecho separación por especies debido a que todas ellas proceden del laboratorio de maderas, donde la humedad ambiental es constante e igual para cada especie. Esa poca variabilidad viene reflejado por el coeficiente de variación de 9,055 %, < 10%. El número total de muestras analizadas ha sido de 719 y el valor medio de la humedad para la totalidad de muestras es de 6,6 %.

## 5.2. ESTADÍSTICA COMPARATIVA

En este apartado se exponen los resultados obtenidos del análisis comparativo entre las características más importantes, a nuestro entender, correspondientes a las variables penetración y densidad de cada especie.

Lo primero que haremos en el análisis comparativo es realizar, en cada uno de los ensayos, una prueba de homocedasticidad. Las poblaciones que vamos a analizar deben de superar esta prueba para poder realizar el análisis ANOVA, de no ser así habría que realizar otro tratamiento estadístico. Para superar la prueba de homocedasticidad, las poblaciones deben cumplir las exigencias de: independencia, normalidad e igualdad de varianzas.

De los tres supuestos anteriores aceptamos los dos primeros debido a que se tratan de muestras independientes entre sí y a que sus valores cumplen o se asemejan a una



distribución normal. Para verificar la hipótesis de igualdad de varianzas utilizaremos el Test de Levene; mediante este test obtendremos el P-valor que determina la relación existente entre las varianzas de las distintas especies. En caso de obtener un P-valor superior a 0,05 diremos que se trata de una hipótesis positiva, y por tanto podemos afirmar que las varianzas de las distintas especies son iguales entre sí. En caso contrario hablaríamos de hipótesis nula y supondremos que las varianzas son distintas entre sí ya que existiría una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar.

Una vez realizado el test tendremos dos casos posibles: verificación de varianzas positiva, en cuyo caso realizaremos un análisis de varianzas ANOVA atendiendo a los valores medios, y verificación de varianzas negativa, en cuyo caso realizaremos un análisis Kruskal-Wallis atendiendo a los valores de las medianas.

## 5.2.1. Penetración

### 5.2.1.1. Por especies

A continuación procedemos a realizar el análisis comparativo entre las distintas especies estudiadas en cuanto al nivel de penetración de las mismas.

**Tabla 24.** Prueba de Levene para el nivel de penetración

	Prueba	P-Valor
Levene	33,6269	0,0

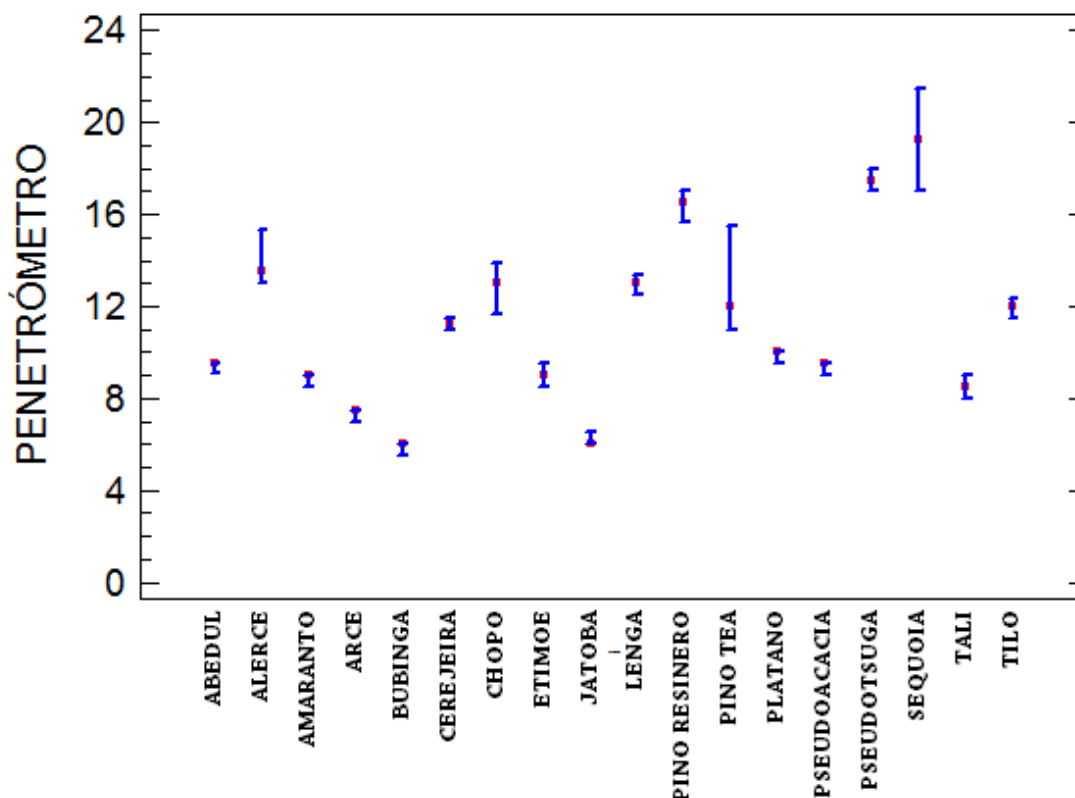
Como el P-valor es inferior a 0,05 no cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es negativa. Por ello pasamos a realizar un análisis de la mediana.

**Tabla 25.** Prueba de Kruskal-Wallis para el nivel de penetración por especie

Especie	Tamaño Muestra	Rango Promedio
ABEDUL	40	279,675
ALERCE	40	540,487
AMARANTO	40	215,963
ARCE	40	107,537
BUBINGA	40	34,325
CEREJEIRA	40	417,1
CHOPO	40	488,837
ETIMOE	40	213,45
JATOBA	40	47,525
LENGA	40	508,637
PINO RESINERO	40	624,013
PINO TEA	40	492,238
PLATANO	40	300,025
PSEUDOACACIA	40	256,438
PSEUDOTSUGA	40	658,462
SEQUOIA	40	666,212
TALI	40	188,387
TILO	40	449,688

Estadístico = 660,36 Valor-P = 0,0

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.



**Figura 16.** Gráfico de medianas para el nivel de penetración

En el gráfico anterior se puede observar como las cuatro especies con un mayor valor de la mediana para la variable penetración pertenecen al grupo taxonómico de las coníferas, produciéndose generalmente una mayor dispersión de datos en estas especies, y es que las cinco especies con una mayor variabilidad de resultados están entre las 7 primeras en cuanto a nivel de penetración.

Finalmente se puede observar una gran diferencia entre los niveles de penetración de las distintas especies, con unos valores medianos extremos de 6 y 19,5 mm pertenecientes a las especies jatoba y sequoia respectivamente.

### 5.2.1.2. Penetración por grupo taxonómico

En este subapartado se realizará el análisis comparativo entre las distintas especies estudiadas en cuanto al nivel de penetración y el grupo taxonómico al que pertenece cada especie.

**Tabla 26.** Prueba de Levene para el nivel de penetración por grupo taxonómico

	Prueba	P-valor
Levene	15,1571	0,000098963

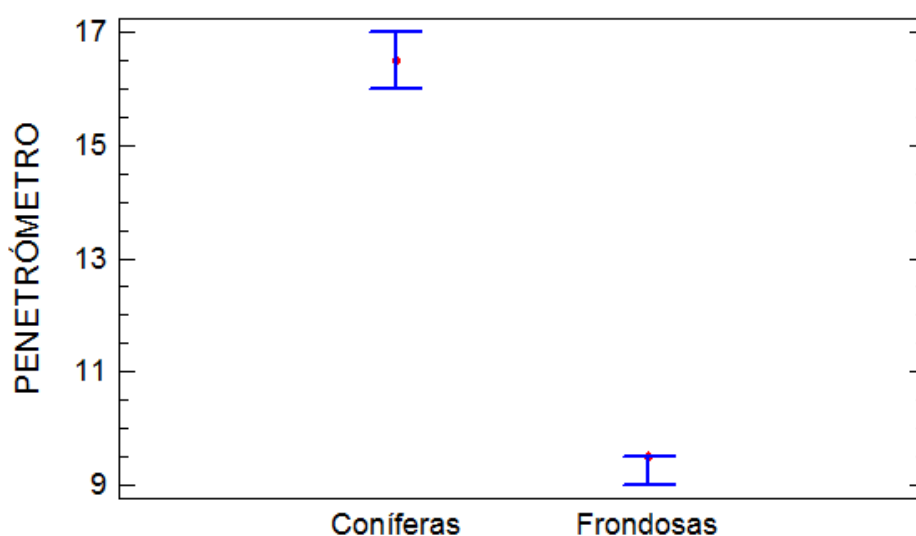
Como el P-valor es inferior a 0,05 no cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es negativa. Por ello pasamos a realizar un análisis de la mediana.

**Tabla 27.** Prueba de Kruskal-Wallis para el nivel de penetración por grupo taxonómico

Grupo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Conífera	200	596,283
Froncosa	520	269,814

Estadístico = 356,715 P-valor = 0,0

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de los distintos grupos taxonómicos, con un nivel de confianza del 95%.



**Figura 17.** Gráfico de medianas para el nivel de penetración por grupo taxonómico

Se puede apreciar una gran diferencia entre los valores medianos de penetración según grupo taxonómico. Las coníferas presentan un valor mediano de penetración muy superior al de las frondosas, 16,5 frente a los 9,5 mm respectivamente.

### 5.2.1.3. Penetración por tipo de corte

A continuación procedemos a realizar el análisis comparativo entre las distintas especies estudiadas en cuanto a la dirección de la penetración perpendicular al plano radial o tangencial.

**Tabla 28.** Prueba de Levene para el nivel de penetración por tipo de corte

	Prueba	P-valor
Levene	8,36269	0,00383015

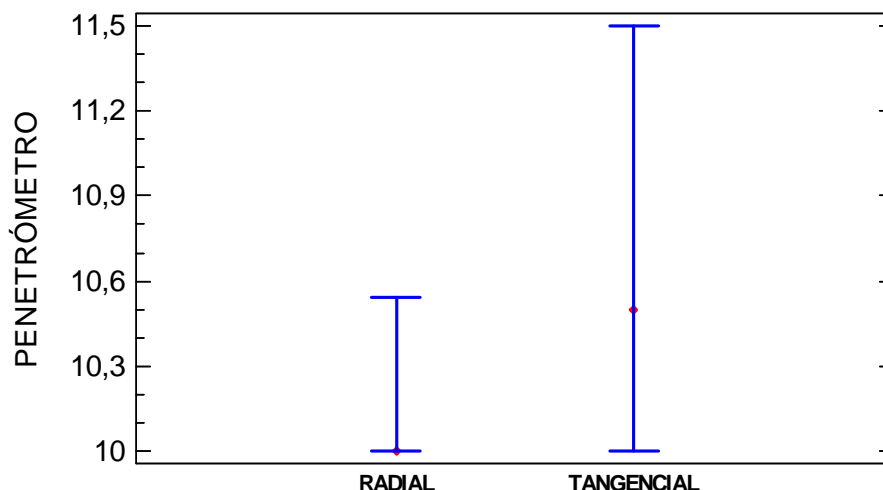
Como el P-valor es inferior a 0,05 no cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es negativa. Por ello pasamos a realizar un análisis de la mediana.

**Tabla 29.** Prueba de Kruskal-Wallis para el nivel de penetración según dirección

Dirección	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Radial	360	343,176
Tangencial	359	376,87

Estadístico = 4,74161 P-valor = 0,0294385

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.



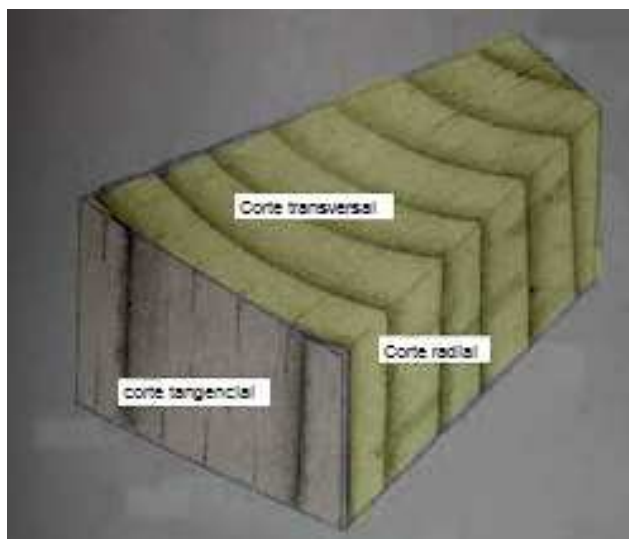
**Figura 18.** Gráfico de medianas para el nivel de penetración según dirección

Se puede observar una pequeña diferencia en el valor de la mediana para la variable penetración según el tipo de corte de la madera donde se realice el ensayo. Produciéndose una mayor penetración en la dirección tangencial que en la radial, con unos valores medianos de 10,5 y 10,0 mm respectivamente.

Los valores de penetración obtenidos en la dirección radial (perpendicular al corte tangencial) son ligeramente menores que en la dirección tangencial (perpendicular al corte radial), debido a que en la dirección radial, la varilla percutora debe de atravesar perpendicularmente los anillos de crecimiento, con la pérdida de fuerza que supone los cambios de densidades de las distintas capas. Sin embargo, la penetración en dirección tangencial no experimenta esos cambios bruscos en las propiedades de la madera, si bien la varilla tiene la posibilidad de penetrar exclusivamente a través de una zona de madera temprana o de primavera (madera menos resistente a la penetración) o la de penetrar exclusivamente por madera tardía o de verano (madera más compactada y más resistente a la penetración), aunque lo más probable, debido a la proporción del tipo de madera en el árbol (Figura 18) es que atravesase madera temprana.

De esta manera podemos justificar que los valores medianos de penetración en la dirección tangencial sean algo superior a los de la dirección radial. Además, por otro lado, se puede observar una mayor variabilidad de resultados en cuanto a la penetración en la dirección tangencial que en la radial, debido a la posibilidad de atravesar únicamente madera

temprana o tardía en cada ensayo. Siendo siempre atravesada ambos tipos de madera en la dirección radial del corte.



**Figura 19.** Representación tipos de corte de la madera, así como proporción entre madera de verano (oscuro) y de primavera (claro). Fuente: elaboración propia

### 5.2.1.3. Penetración por tipo de corte según grupo taxonómico

Los resultados obtenidos del análisis comparativo entre la variable penetración y la dirección de la misma en la madera queda un poco incompleta debido a que no se ha tenido en cuenta el grupo taxonómico de la muestra. Por ello se ha decidido realizar un análisis que compare la penetración con la dirección de la penetración en la madera, según el tipo de madera que sea.

En primer lugar centraremos el análisis en el grupo de las coníferas y posteriormente estudiaremos los casos de las frondosas para intentar sacar conclusiones.

- Coníferas:

**Tabla 30.** Prueba de Levene para el nivel de penetración por dirección en la madera y grupo taxonómico conífera

	Prueba	P-valor
Levene	3,51079	0,0624435

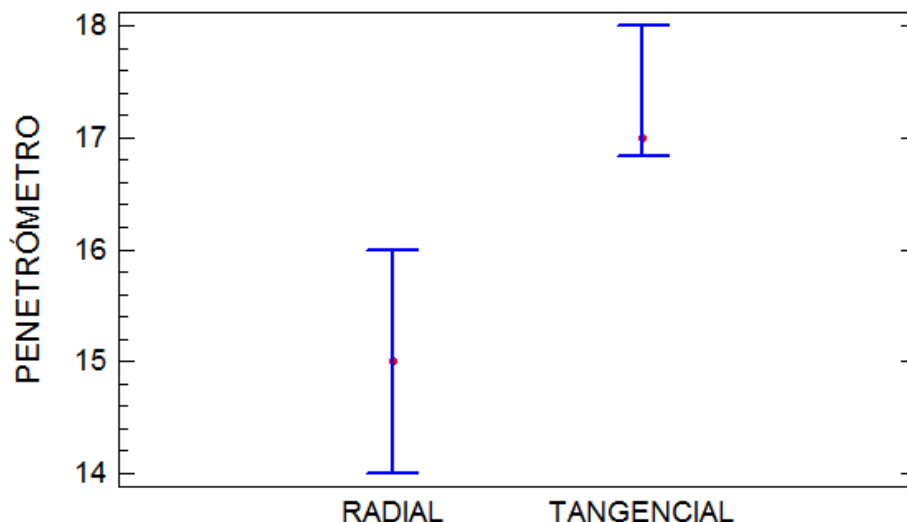
Como el P-valor es inferior a 0,05 no cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es negativa. Por ello pasamos a realizar un análisis de la mediana.

**Tabla 31.** Prueba de Kruskal-Wallis para el nivel de penetración según dirección en la madera y coníferas

Corte	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Radial	100	77,495
Tangencial	100	123,505

Estadístico = 31,7619 P-valor = 1,7428E-8

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.



**Figura 20.** Gráfico de medianas para el nivel de penetración según dirección en la madera y grupo taxonómico conífera

En el grupo de las coníferas, se puede observar una diferencia acusada en el valor de la mediana para la variable penetración según el tipo de corte de la madera donde se realice el ensayo. Produciéndose una mayor penetración en la dirección tangencial que en la radial, con unos valores medianos de 15 y 17 mm respectivamente.

- Frondosas:

**Tabla 32.** Prueba de Levene para el nivel de penetración por dirección en la madera y grupo taxonómico frondosa

	Prueba	P-valor
Levene	0,0634591	0,80121

Como el P-valor es igual a 0,80121, muy superior a 0,05 no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel de confianza del 95%. Es decir, se cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es positiva. Por ello pasamos a realizar un análisis de varianzas ANOVA.

**Tabla 33.** Tabla ANOVA para penetración por dirección en la madera y grupo taxonómico frondosa

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	F-razón	P-valor
Entre grupos	6,35817	1	6,35817	1,14	0,2855
Intra grupos	2881,39	518	5,56252		
Total (Corr.)	2887,75	519			

Puesto que el P-valor de la F-razón es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de penetración para la dirección radial y tangencial de la madera, con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 34.** Pruebas de múltiples rangos para el nivel de penetración por su dirección en la madera

Corte	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Radial	260	9,38654	x
Tangencial	260	9,60769	x

Como se puede observar los valores medios de penetración para ambos tipo de corte de la madera se agrupan en grupos homogéneos.

Finalmente se puede concluir con que los resultados de los análisis comparativos entre las dos variables estudiadas, según el tipo de madera (conífera o frondosa), confirman unas diferencias estadísticamente significativas. Siendo en el grupo frondosas no significativas dichas relaciones penetración-dirección de corte, sin embargo en el grupo coníferas se aprecia una clara diferencia en el comportamiento de la madera ante la penetración si esta se produce en la dirección radial o tangencial.

Una de las posibles razones puede estar en la distribución de las especies, puesto que todas las coníferas ensayadas viven en zonas con estaciones claramente diferenciadas, presentando unos anillos de crecimiento muy marcados, con una gran diferencia entre la madera temprana y tardía. Sin embargo, buena parte de las especies de frondosas analizadas en el estudio viven en zonas con climas más templados o tropicales, en los que apenas hay diferencias estacionales, por ello la madera de muchas de estas frondosas apenas presentan diferencias entre madera temprana y tardía. Esta homogeneidad aparece reflejada en los resultados, en los que no aparecen diferencias significativas en los valores de penetración para la dirección radial y tangencial.

## 5.2.2. Densidad

### 5.2.2.1. Por especies

**Tabla 35.** Prueba de Levene para la densidad

	Prueba	P-valor
Levene	20,6321	0,0

A continuación procedemos a realizar el análisis comparativo entre las distintas especies estudiadas en cuanto a su densidad.

Como el P-valor es inferior a 0,05 no cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, con lo que la prueba de homocedasticidad es negativa. Por ello pasamos a realizar un análisis de la mediana.

**Tabla 36.** Prueba de Kruskal-Wallis para la densidad por especie

Especie	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Abedul	40	330,25
Alerce	40	275,725

Amaranto	40	570,275
Arce	40	543,45
Bubinga	40	614,0
Cerejeira	40	455,025
Chopo	40	43,45
Etimoe	40	316,425
Jatoba	40	697,2
Lenga	40	158,0
Pino resinero	40	165,8
Pino tea	40	332,3
Platano	40	414,325
Pseudoacacia	39	506,359
Pseudotsuga	40	138,025
Sequoia	40	42,175
Tali	40	661,8
Tilo	40	219,075

Estadístico = 685,753 P-valor = 0,0

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

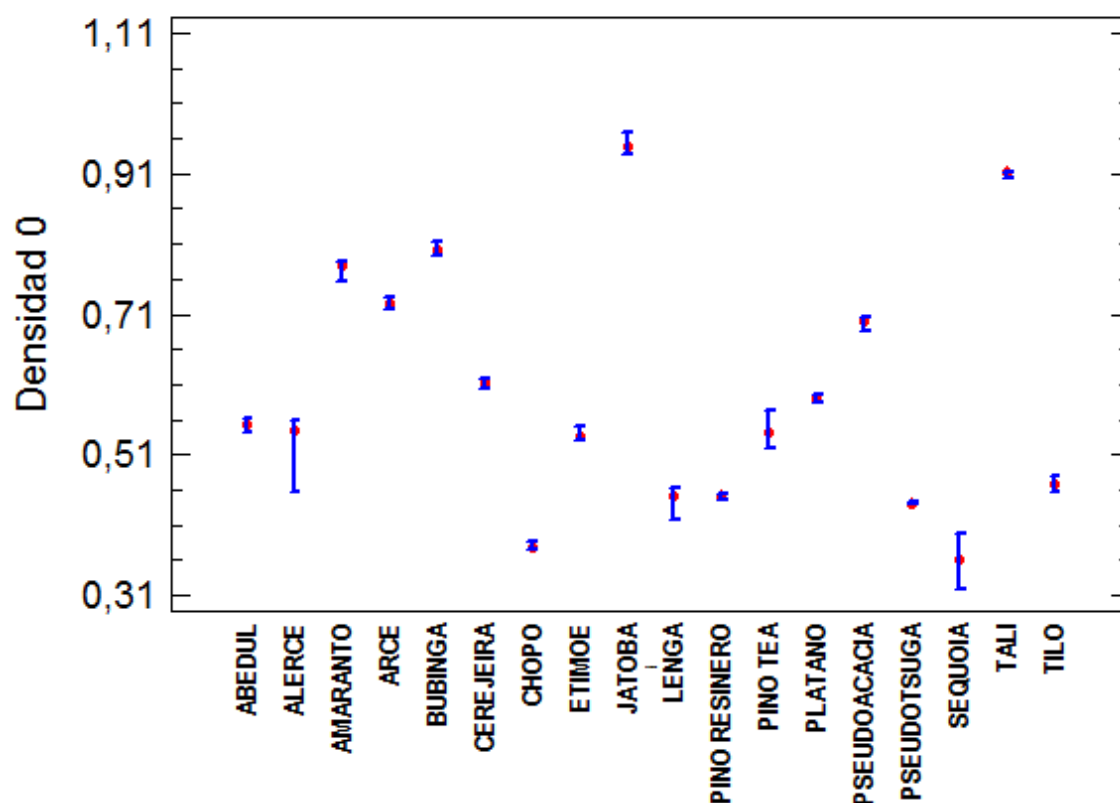


Figura 21. Gráfico de medianas para la densidad por especies

En el gráfico anterior se puede observar como las ocho especies con un mayor valor de la mediana para la variable densidad pertenecen al grupo taxonómico de las frondosas, más concretamente, las cuatro especies con mayor valor mediano de densidad son frondosas tropicales.



Finalmente se puede observar como en el estudio se han tratado especies con un amplio abanico de densidades, desde maderas muy densas como la jatoba, con valores medianos de  $0,95 \text{ g / cm}^3$  hasta maderas muy poco densas como la sequoia, con valores medianos de  $0,36 \text{ g / cm}^3$ . Curiosamente estas dos especies han sido las que presentan unos valores extremos de penetración, siendo la jatoba la especie más densa y con una menor capacidad de penetración y la sequoia la que presenta menor densidad y mayor profundidad de penetración. Así se evidencia la inversa relación entre ambas propiedades.

### 5.3. ESTADÍSTICA PREDICTIVA

#### 5.3.1. Regresión penetración – densidad

A continuación se realizará un análisis en el que trataremos de establecer la relación existente entre los valores de penetración obtenidos y los valores de densidad. Para ello utilizaremos el método de regresión simple.

El tipo de modelo utilizado en el estudio de la regresión ha sido el de Y inversa debido a que es el que mejor se ajusta a las variables penetración-densidad, cuya representación aparece en la Figura 22.

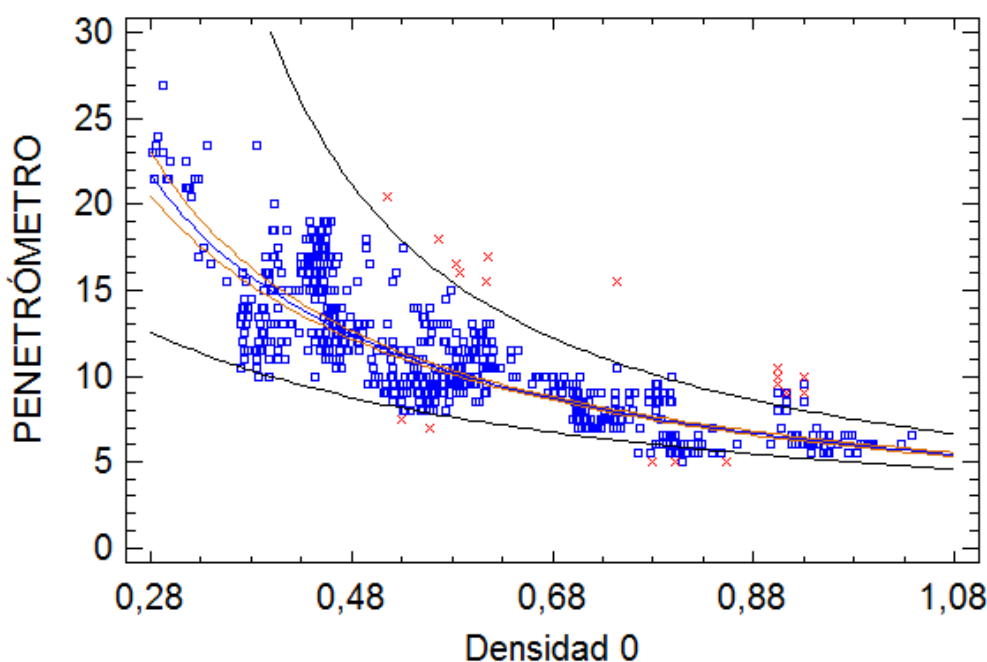


Figura 22. Modelo ajustado para la relación penetración y densidad

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Penetración} = 1 / (-0,00239679 + 0,173074 * \text{Densidad } 0)$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables:

Tabla 37. Análisis de varianza para la relación penetración y densidad

Fuente	Suma de	Gl	Cuadrado	F-razón	P-valor
--------	---------	----	----------	---------	---------

Alumno: Ignacio Cañas Gutiérrez  
 UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS  
 Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

	cuadrados		medio		
Modelo	0,559711	1	0,559711	1917,36	0,0000
Residuo	0,192374	659	0,000291918		
Total (Corr.)	0,752085	660			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de penetración y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05, podemos afirmar que hay indicios para una posible correlación de las dos variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

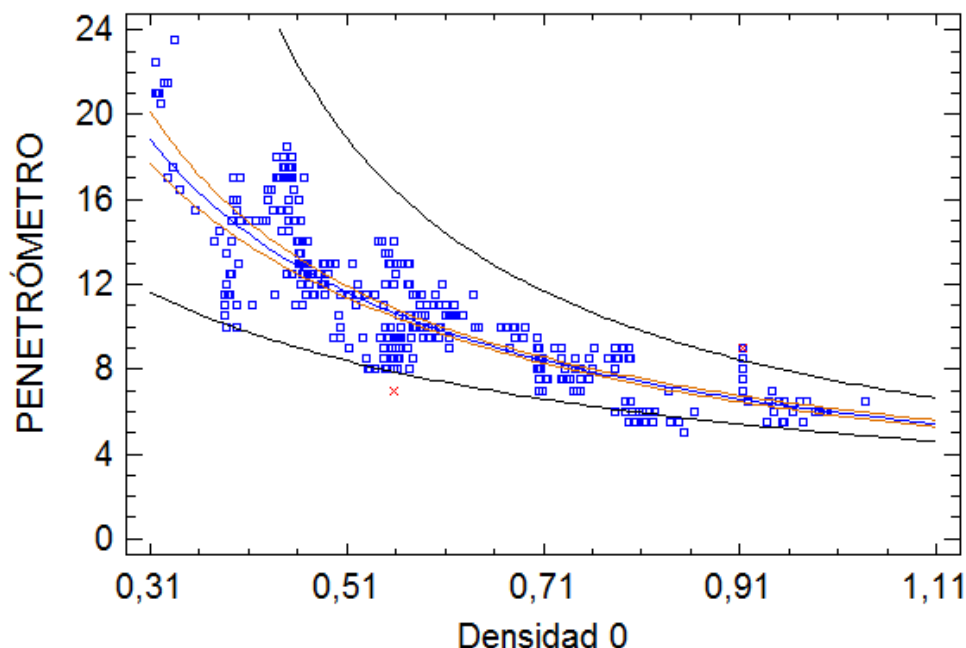
- Coeficiente de correlación = 0,8627
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,3825 %

El coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 74 % de la variabilidad entre penetración y densidad.

Para intentar obtener una información extra se ha decidido realizar esta misma regresión según las propiedades anatómicas y fisiológicas de las especies estudiadas. Para ello, el tipo de modelo empleado en el conjunto de regresiones va a ser el mismo: el de Y inversa.

### 5.3.2. Regresión penetración – densidad según la dirección de penetración en la madera

#### 5.3.2.1. Dirección radial



**Figura 23.** Modelo ajustado para la relación penetración y densidad en la dirección radial

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Penetración} = 1 / (0,00233994 + 0,164013 * \text{Densidad } 0)$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables:

**Tabla 38.** Análisis de varianza para la relación penetración y densidad para la dirección radial

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Modelo	0,285872	1	0,285872	1011,88	0,0000
Residuo	0,100293	355	0,000282516		
Total (Corr.)	0,386165	356			

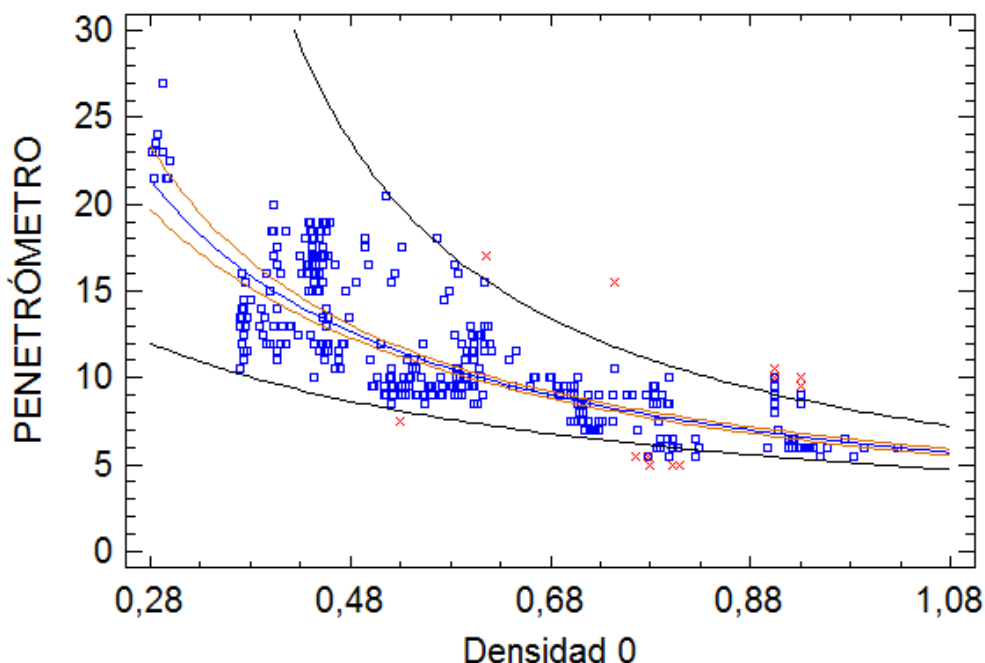
Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de penetración y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05, podemos afirmar que hay indicios para una posible correlación de las dos variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

- Coeficiente de correlación = 0,8604
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 73,9553 %

El coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 74 % de la variabilidad entre penetración y densidad.

### 5.3.2.2. Dirección tangencial



**Figura 24.** Modelo ajustado para la relación penetración y densidad en dirección tangencial

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Penetración} = 1 / (0,00177065 + 0,160891 * \text{Densidad } 0)$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables:

**Tabla 39.** Análisis de varianza para la relación penetración y densidad para la dirección radial

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Modelo	0,269545	1	0,269545	778,65	0,0000
Residuo	0,119429	345	0,000346171		
Total (Corr.)	0,388974	346			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de penetración y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05, podemos afirmar que hay indicios para una posible correlación de las dos variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

- Coeficiente de correlación = 0,8324

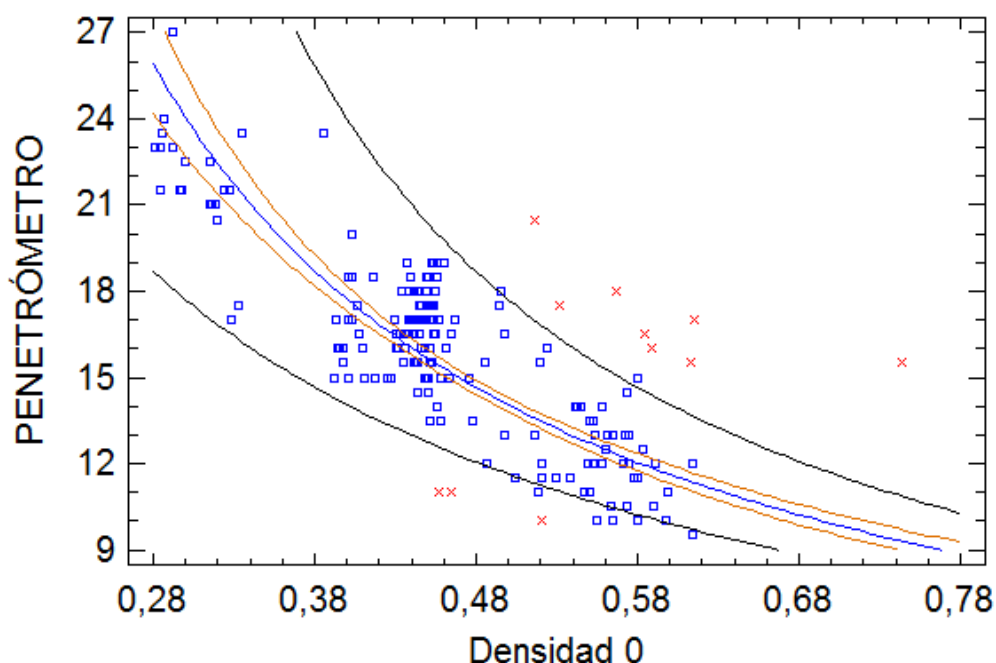
· R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 69,2964 %

El coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 69 % de la variabilidad entre penetración y densidad.

Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión lineal entre penetración y densidad, según la dirección en la que la varilla percutora atravesó la madera, muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación moderadamente fuerte entre ambas variables. Sin embargo, en la dirección radial se obtiene un R<sup>2</sup> superior que en la tangencial (74 y 69 % respectivamente).

### 5.3.3. Regresión penetración – densidad según grupo taxonómico

#### 5.3.3.1. Grupo taxonómico coníferas



**Figura 25.** Modelo ajustado para la relación penetración y densidad en coníferas

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Penetración} = 1 / (-0,00290421 + 0,14829 * \text{Densidad } 0)$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables:

**Tabla 40.** Análisis de varianza para la relación penetración y densidad en coníferas

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Modelo	0,0230198	1	0,0230198	414,86	0,0000
Residuo	0,00971046	175	0,0000554883		
Total (Corr.)	0,0327302	176			

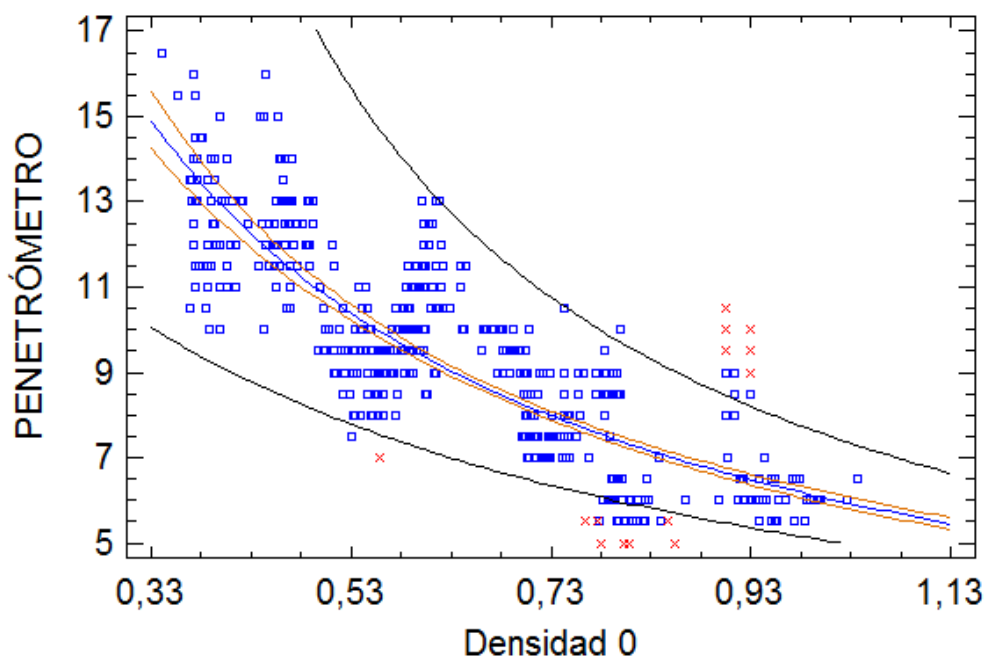
Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de penetración y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05, podemos afirmar que hay indicios para una posible correlación de las dos variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

- Coeficiente de correlación = 0,8386
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 70,1623 %

El coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 70 % de la variabilidad entre penetración y densidad para las coníferas.

### 5.3.3.2. Grupo taxonómico frondosas



**Figura 26.** Modelo ajustado para la relación penetración y densidad en frondosas

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{Penetración} = 1 / (0,0192342 + 0,145252 * \text{Densidad } 0)$$

A continuación se muestra la tabla del análisis de varianza para la relación establecida entre estas variables:

**Tabla 41.** Análisis de varianza para la relación penetración y densidad en frondosas

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-razón	P-valor
Modelo	0,282987	1	0,282987	1048,72	0,0000

Residuo	0,128175	475	0,000269842		
Total (Corr.)	0,411162	476			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de penetración y la variable densidad, el P-valor se encuentra por debajo del 0,05, podemos afirmar que hay indicios para una posible correlación de las dos variables con un nivel de confianza del 95%.

Los valores que se desprenden de esta regresión son los siguientes:

- Coeficiente de correlación = 0,8296
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 68,7606 %

El coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 69 % de la variabilidad entre penetración y densidad para el grupo taxonómico de las frondosas.

Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión lineal entre penetración y densidad, según la dirección en la que la varilla percutora atravesó la madera, muestra unos resultados muy similares. En ambos casos se obtiene una relación moderadamente fuerte entre nivel de penetración y valor de la densidad. Por otro lado el coeficiente de determinación  $R^2$  también presenta valores muy similares (70 y 69 % para coníferas y frondosas respectivamente).

#### 5.3.4. Modelo General Lineal

A partir del análisis predictivo mediante el Modelo General Lineal, obtenemos la siguiente ecuación de regresión:

$$\text{Densidad} = 1,11341 + 0,051017 * I1 (1) - 0,0101044 * I2 (1) - 0,0435853 * \text{Penetración}$$

Donde:

·  $I1 (1) = 1$  si Grupo taxonómico = Coníferas,  $-1$  si Grupo taxonómico = Frondosas, 0 de lo contrario.

·  $I2 (1) = 1$  si Dirección = Radial,  $-1$  si Dirección=Tangencial, 0 de lo contrario.

A continuación se resumen los resultados del ajuste del Modelo General Lineal, que relaciona a la densidad anhidra con otros tres factores predictivos como son el nivel de penetración, dirección de la penetración en la madera y grupo taxonómico.

**Tabla 42.** Análisis de Varianza para Densidad 0

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	F-razón	P-valor
Modelo	13,9983	3	4,66609	425,79	0,0000
Residuo	7,82449	714	0,0109587		
Total (Corregido)	21,8228	717			

Como el P-valor es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la densidad y los factores predictivos con un nivel de confianza del 95%, con lo que el modelo es significativo.

A continuación vamos a comprobar el nivel de significancia estadística de cada factor.

**Tabla 43.** Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	F-razón	P-valor
Grupo taxonómico	0,634524	1	0,634524	57,90	0,0000
Dirección madera	0,0715495	1	0,0715495	6,53	0,0106
Penetración	8,88684	1	8,88684	810,94	0,0000
Residuo	7,82449	714	0,0109587		
Total (corregido)	21,8228	717			

El P-valor más alto corresponde a la dirección de la varilla al penetrar la madera, cuyo valor es de  $0,0106 < 0,05$ , con lo que la dirección de la madera es un factor significativo, aunque, si cabe, algo menos que el resto.

## 5.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL MARCO GLOBAL

En la actualidad se han realizado pocos estudios de estimación de densidades mediante penetrómetro. Hay alguno más sobre madera en obra o árboles en pie, pero ambas técnicas son algo distintas debido a la elevada humedad de las muestras y a la poca precisión que muchas veces presentan los datos tomados en obras en pie, en las que es muy importante no dañar la estructura.

A continuación nos disponemos a comparar los resultados con los obtenidos en otros estudios similares al presente, en los que se ha trabajado con alguna de las 18 especies analizadas.

En cuanto al pino resinero, en España se ha publicado un estudio relacionando la penetración del Pilodyn con la densidad (Notivol *et al.*, 2008), los resultados obtenidos han sido muy similares a los obtenidos en el presente estudio: coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del 0,73, frente al  $R^2$  medio de nuestro estudio de 0,74. Obteniéndose además unos valores medios de penetración próximos a 16,3 mm, muy similares a los obtenidos en nuestro estudio (16,6 mm) y unos valores medios de densidad de  $0,513 \text{ g / cm}^3$ , algo superior a los nuestros ( $0,448 \text{ g / cm}^3$ ). El penetrómetro parece, a expensas de más estudios, un método fiable para dicha especie.

La densidad estimada mediante Pilodyn para chopo por la Universidad de La Plata, Argentina, obtuvo un coeficiente de correlación bastante bajo ( $R^2 = 0,56$ ), en cuanto a los resultados cabe destacar el valor medio de densidad que fue  $0,370 \text{ g / cm}^3$ , el nivel de penetración medio que fue 14 mm (Monteoliva, 2011). Estos valores medios de densidad coinciden con los obtenidos en nuestro estudio ( $0,380 \text{ g / cm}^3$ ), sin embargo los de penetración son algo más altos ( $12,8 \text{ g / cm}^3$ ).





## **6. CONCLUSIONES**

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio representan una base de datos amplia en cuanto al empleo de la herramienta Pilodyn como estimador de la densidad debido al elevado número de muestras analizadas en él (un total de 720 muestras), así como por la diversidad de muestras: un total de 18 especies (7 frondosas de climas templados, 6 frondosas de climas tropicales y 5 coníferas) con datos para cada tipo de corte (dirección radial y tangencial de la madera). Contribuyendo así al escaso registro presente para madera aserrada a nivel nacional.

Existe una diferencia significativamente acusada en cuanto a la profundidad de penetración por especies, presentando sus valores una distribución homogénea con coeficientes de variación inferiores al 10%, salvo en 5 especies situadas además entre las 7 especies con mayor penetración. Esto nos sugiere que la variación de resultados depende del nivel de penetración.

Las coníferas presentan valores más elevados de penetración, con una diferencia de hasta el 27%.

La dirección de penetración de la varilla en la madera apenas influye en su profundidad, sin embargo, al analizar los grupos taxonómicos por separado, se descubre que en frondosas no existen diferencias estadísticamente significativas mientras que en coníferas la penetración en dirección tangencial es mayor que en radial. Existiendo así una dependencia en cuanto al nivel de penetración y dirección de la misma únicamente en coníferas.

En el presente trabajo no se ha realizado una estimación de la precisión del penetrómetro por especies, sino por muestras de varias especies empleadas en la industria de la madera actualmente, con distintas características anatómicas y fisiológicas como se puede observar en el amplio abanico de densidades presente, especies como sequoia y jatoba con valores de 0,354 y 0,955 g / cm<sup>3</sup> respectivamente.

Se comprueba la dependencia de la variable densidad según la taxonomía de la muestra, siendo frondosas las 8 especies más densas y, más concretamente, frondosas tropicales las 4 especies más densas.

La determinación de esta densidad mediante penetrómetro ha demostrado ser válida. Las relaciones entre las variables regresoras de penetración y densidad reportan unos valores de R<sup>2</sup> ajustado superiores a 74%, así como un coeficiente de determinación medio superior al 86%, resultados que justifican su utilización como estimador de densidades con garantías, siempre y cuando se emplee para piezas concretas o para valores aproximados de varias piezas, teniendo presente que los ensayos de penetración son "ensayos puntuales" y no deben servir para validar una pieza estructural en su conjunto. A ello se añade la ventaja de resultar un ensayo factible de realizar en obra, por sus características de mantenimiento y portabilidad.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Abellán, E; Escudero, O. (2011). "Caracterización de la madera de mobila por medio de las técnicas no destructivas del resistógrafo y del georradar". Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación. Proyecto Fin de Grado.

Acuña, L.; Basterra, L. A.; Casado M. (2011). "Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species".

Acuña, L. (2008) "La madera como material. Conceptos básicos Técnicas de diagnóstico no destructivo en estructuras de madera".

AITIM (1994). "Guía de la madera". AITIM. Madrid.

Bobadilla, I.; Esteban, M.; Íñiguez, G.; Arriaga, F.; Ballarín, D.; Palacios, J. (2007). "Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad".

Bobadilla, I.; Íñiguez, G.; Arriaga, F. (2008). "Técnicas no destructivas para el diagnóstico de la madera estructural: nuevas aplicaciones en rehabilitación y restauración". Seminario impartido en Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), Cuenca.

Bobadilla, I.; Íñiguez, G.; Arriaga, F. (2009). "Técnicas no destructivas en la madera I: El penetrómetro". *Boletín de información técnica AITIM*, no 260, pp. 66-71.

Böthing, S. (2001). Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay, Silvia Böthing. *Informe de investigación*. 5.

Capuz, R. (2003). "Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas". Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación. Tesis doctoral.

Casado, M; Acuña, L; Basterra, L.A.; Relea, E. (2008). "Clasificación de madera estructural de *Pinus pinaster* mediante técnicas vibratorias". *En Jornadas de Investigación en Construcción*, (2do. 2008, Madrid. ES). Actas. ES, S.E. S.p.

Conde, M. (2003). "Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra Arn.*" Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral.

Divos, F; Tanaka, T. (1997). "Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. Published in International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood", *Holz Forschung*. Vol. 51, nº 5. pp. 467-471

Divos, F.; Tanaka, T.; Nagao, H.; Kato, H. (1998). "Determination of shear modulus on construction size timber". *Wood science and technology*. Vol. 32 (6), pp. 393-402.

Einspahr, D.W.; Van Buijtenen, J. P.; Peckham, J. R. (1969). "Pulping characteristics of ten-year loblolly pine selected for extreme wood specific gravity". *Sil. Gen.* 18(3):57-61.

Espinoza, J (2004): "Gradiente de variación de la densidad de la madera en árboles de *Gmelina aborea* en Venezuela". IV Congreso Forestal Venezolano. Barinas, Venezuela. 56 pp.

Fernández-Golfín, JI; Díez, R; Hermoso, E; Mier, R. (2003). "Manual de clasificación de madera". Ciudad, ES, AITIM. S. p. (ISBN 84-87381-26-X).

Fernández-Golfín, J. L. (2000). La madera de la Construcción, Cap. 1 "Propiedades elastomecánicas de la madera", pp. 5-45. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

Greaves, BL; Borralho, N. M.; Raymond, C. A.; Farrington, A. (1996). "Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*". *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 26 (9), pp. 1643-1650.

Gómez, S. M. (2006). "Procedimientos de mecanizado". Editorial Paraninfo.

Harrand, L. (2007). "Parámetros genéticos en características de crecimiento y densidad de la madera en progenies de *Eucalyptus grandis*" Tesis doctoral Campus Montecillo, Texcoco, edo. de México.

Hermoso, E. 2003. "Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L". Tesis doctoral. U.P.M.

Iñiguez, G. (2007). "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural". Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral.

Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Bobadilla, I.; Esteban, M., R. (2008). "Grading by non-destructive techniques and assessment of the mechanical properties of large cross section coniferous sawn timber for structural use. En: *Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan*, pp. 1-8.

Lecumberri, J. (2012). "Clasificación estructural de la madera de *Pinus radiata*" D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural".

López, J. A. (1995). "Ajuste preliminar del Pilodyn 6J Forest para estimar densidad de la madera de *Eucalyptus grandis*". *6º Reunión de comunicaciones científicas y técnicas. UNNE*. Resúmenes. pp: 77.

López, G.; Basterra, L. A.; Acuña, L. (2013). "Estimation of wood density using Infrared Thermography".

López, J. A.; Staffieri, G. M. (2002). "Correlaciones genéticas entre Pilodyn y densidad de la madera de *Pinus elliotii* var. *elliotii* en la Mesopotamia Argentina". *Novenas Jornadas Técnicas Forestales*. INTA-FCF-MEYRNRYT-Eldorado, Misiones, Argentina.

Monteoliva, S. (2011). "Determinación de densidad de la madera de sauces con pilodyn: calibración". Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina.

Niemz, P.; Kucera, L.J.; Bernatowicz, G. (1998). "Investigation of the spruce wood quality degraded by the brown-rot fungi". *Drevarsky Vyskum*. Vol. 43 (1), pp.1-12.

Notivol, E.; Gil, L. A.; Pardos, J. A. (2008). "Una metodología para la estimación de la densidad de la madera de árboles en pie y de su grado variabilidad en *Pinus pinaster* Ait." *Forest Systems*, 1(1), 41-47.

Pérez, A. (2012). "Estimación de parámetros de calidad sobre tableros derivados de la madera a partir de ensayos no destructivos".

Rammer, Douglas R. Zelinka, Samuel L. (2004). "Review of End Grain Nail Withdrawal Research". USDA. FPL-GTR-151, pp. 28.

Raymond C.A., Muneri A., MacDonald A.C. (1998). "Non-destructive sampling for basic density in *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*". *Appita Journal*. Vol. 51 (3), pp. 224-228.

Santamaría, J. O. (2012). "Aplicación de la técnica no destructiva del georradar, a la detección de la actividad de la termita en madera aserrada *Pinus pinaster* Ait. de uso estructural".

Silva J.C.E., Borralho N.M.G., Wellendorf H., (2000). "Genetic parameter estimates for diameter growth, pilodyn penetration and spiral grain in *Picea abies* (L.)" *Karst. Silvae Genetica*, Vol. 49 (1).

Smith, S.M.; Morrell, J.J. (1986). "Correcting pilodyn measurement of Douglas fir for different moisture levels". *Forest Products Journal*. Vol. 36 (1), pp.45-46.

Villeneuve, M; Grey, J. (1986). "Estimación de densidad en rodajas de *Pinus banksiana* mediante penetrómetro".

Walter, I. T.; Norton, B.; Lavery, D. J.; Chapman, M. J. (2005). "Screw ingress torque as a non-destructive determinant of timber compressive strength". *Proceedings of the 14 th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.*, pp. 144-145.

Wang, T.; Aitken, S. N.; Rozenberg, P.; Carlson M. R. (1999): "Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships". *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 29, pp. 434-445.

Watt, M. S.; Garnett, B.T.; Walker J. C. (1996). "The use of the Pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine". *Forest Products Journal*. Vol. 46 (11-12), pp. 101-106.

Wilson; James, B. (1981). "Pole inspection using the pilodyn". En: *Proceedings of the 7th Wood Pole Institute*. Fort Collins, Colorado.

Wu, S. J. (2010). "Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of Eucalyptus clones". *Journal of forestry research*, vol. 21, no. 1, p. 68-72.

Zobel, B. J.; Van Buijtenen J. P. (1989). "Wood variation, its causes and control". Springer-Verlag. 363 p.

### **Páginas Web consultadas:**

Diagnóstico, saneamiento y conservación de estructuras de madera [en línea]. Disponible en World Wide Web: <<http://www.sanite.net/estimacion-de-la-densidad-mediante-arranque-de-tornillos/>> [Última consulta: 12-03-13].

Serbusa Mantenimiento industrial [publicado el 15-08-12, en línea]. Disponible en World Wide Web: <<http://serbusamantenimientoindustrial.com/diagnostico-rehabilitacion-y-mantenimiento-en-edificios-con-estructura-de-madera/>> [Última consulta: 11-07-13].

Comercial de Ingeniería daga S.L. Penetrómetro Pilodyn [en línea] Madrid. Disponible en World Wide Web: <<http://www.dagasl.es/PILODYN.pdf>> [Última consulta: 12-03-13].

Fakopp Enterprise, non invasive testing of tres [en línea] Hungary. Disponible en World Wide Web: <<http://www.fakopp.com/site/microsecond-timer>> [Última consulta: 12-03-13].



# ANEJO I. ESTADÍSTICA

## ANEJO I. ESTADÍSTICA

### I.I. DATOS DE PENETRACIÓN

#### Amaranto

Sesgo Estandarizado	2,89699
Curtosis Estandarizada	2,25384

Gráfico de Dispersión

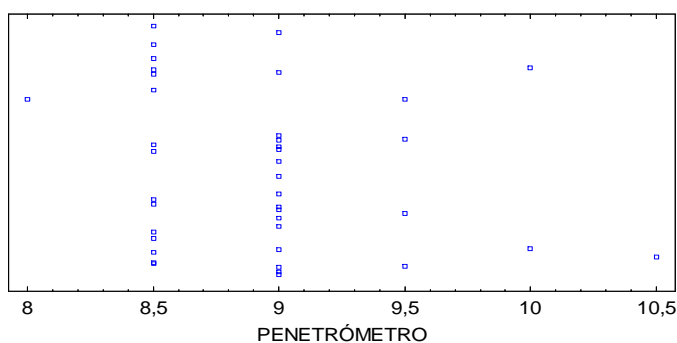


Gráfico de Caja y Bigotes

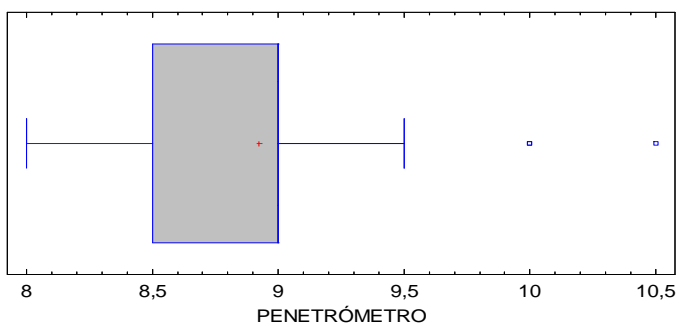
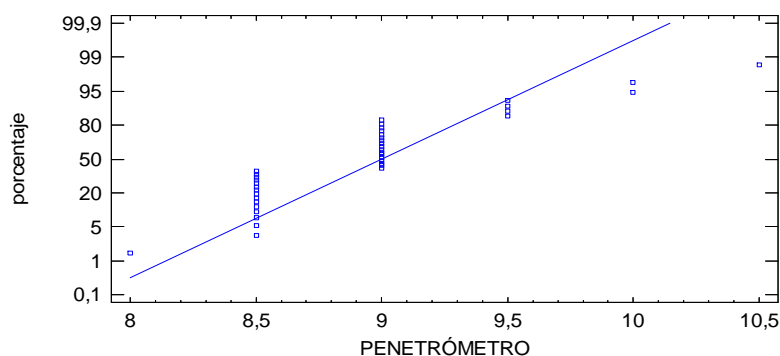


Gráfico de Probabilidad Normal



#### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	64,55	1,84027E-8
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,870102	0,000143507

## Bubinga

Sesgo Estandarizado	0,888363
Curtosis Estandarizada	-0,23218

Gráfico de Dispersión

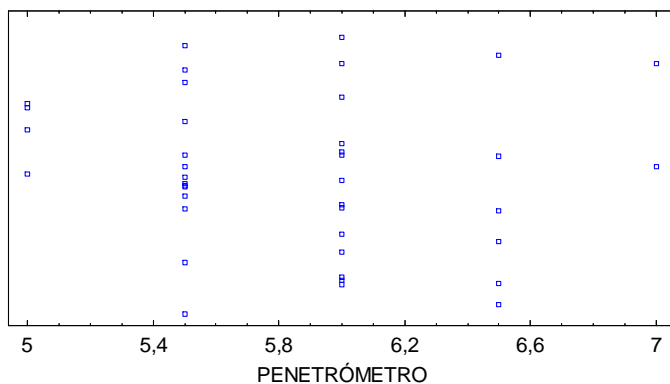


Gráfico de Caja y Bigotes

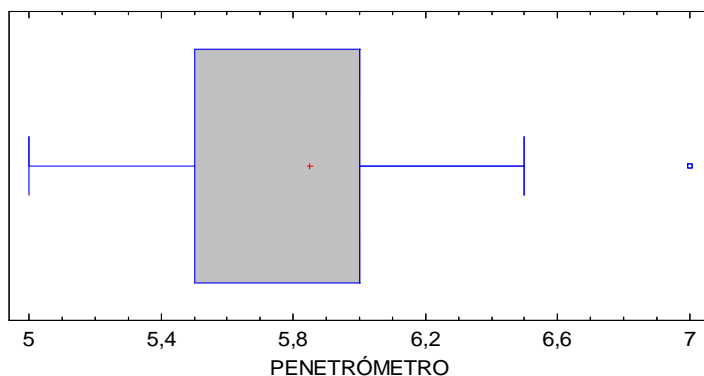
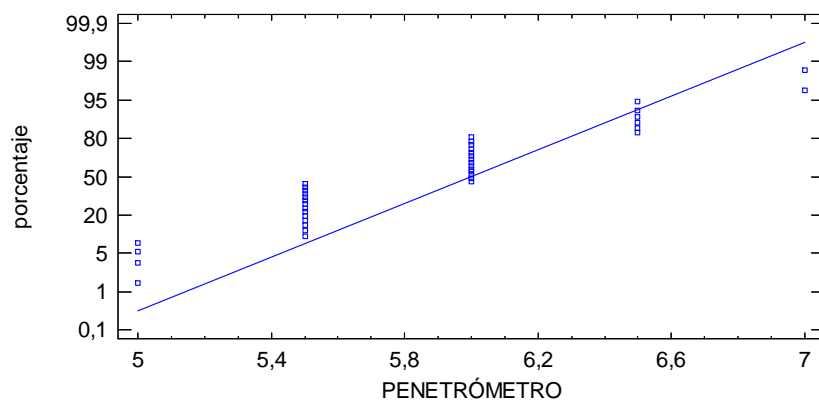


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,0	0,686036
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,944378	0,068217

## Cerejeira

Sesgo Estandarizado	1,16579
Curtosis Estandarizada	-0,643267

Gráfico de Dispersión

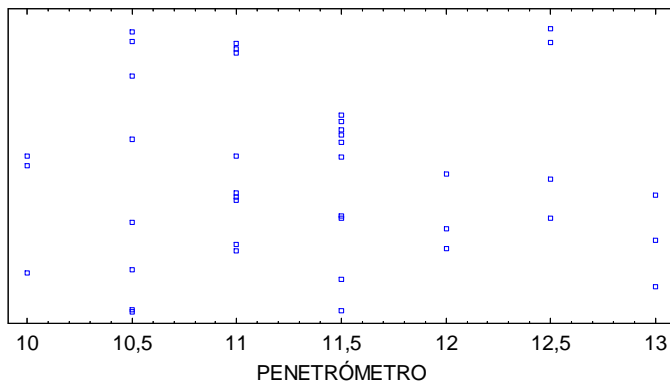


Gráfico de Caja y Bigotes

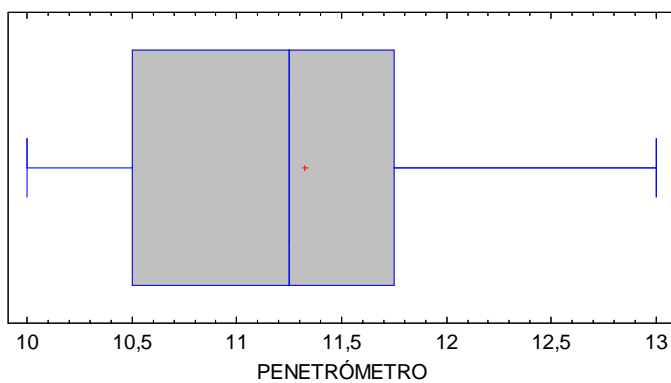
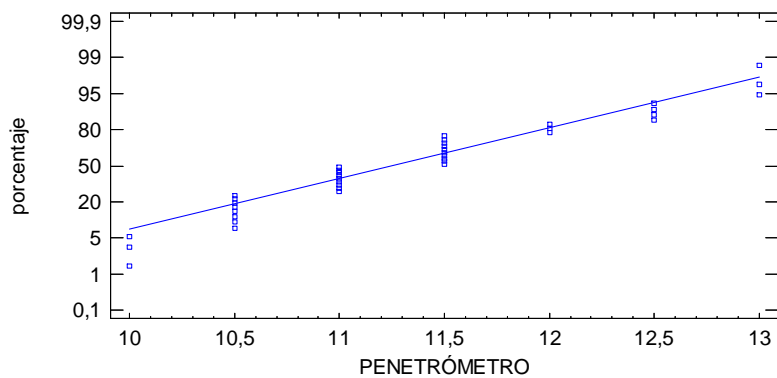


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	18,65	0,178759
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,946292	0,0798677

## Etimo

Sesgo Estandarizado	-0,493009
Curtosis Estandarizada	-0,823137

Gráfico de Dispersión

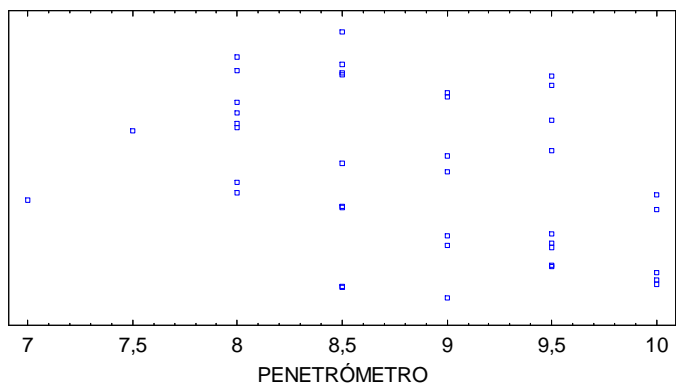


Gráfico de Caja y Bigotes

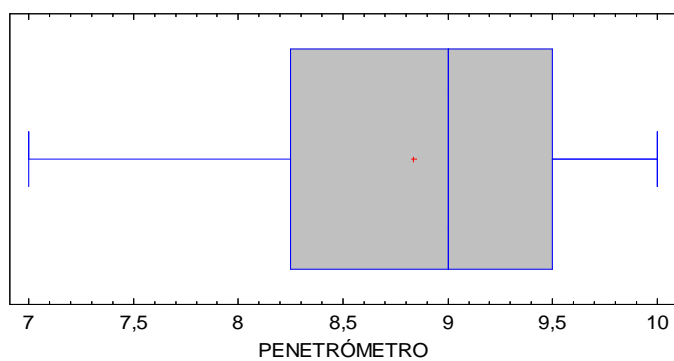
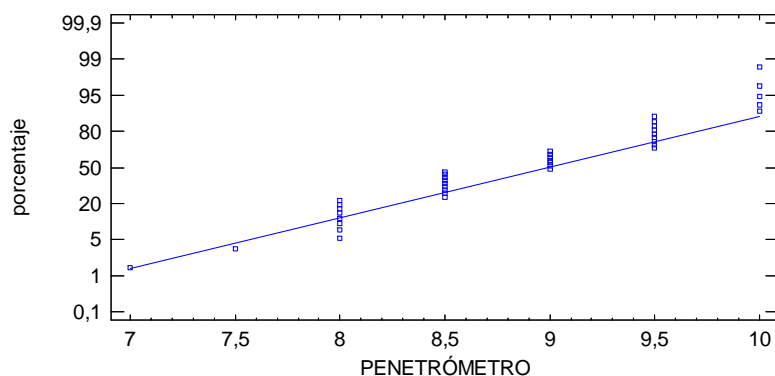


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,25	0,361281
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974241	0,600751

## Jatoba

Sesgo Estandarizado	0,558718
Curtosis Estandarizada	-0,225137

Gráfico de Dispersión

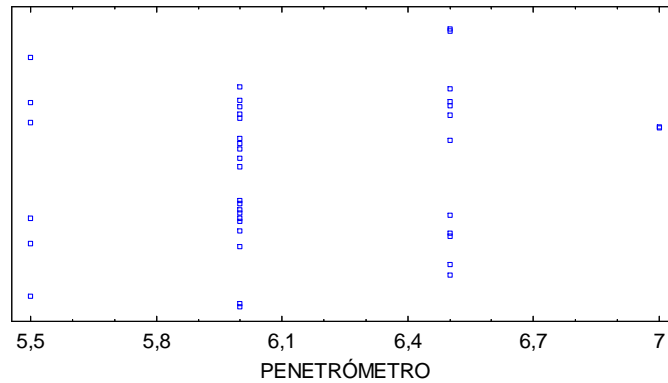


Gráfico de Caja y Bigotes

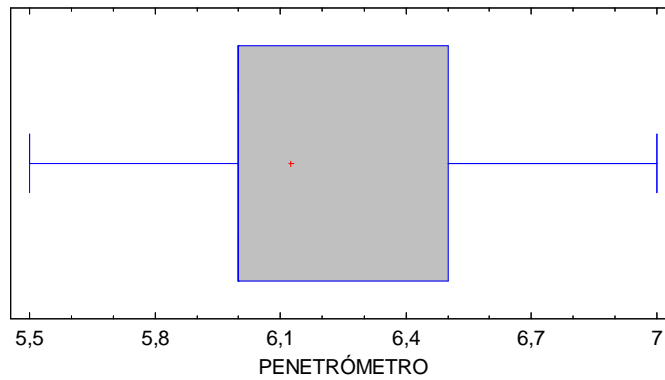
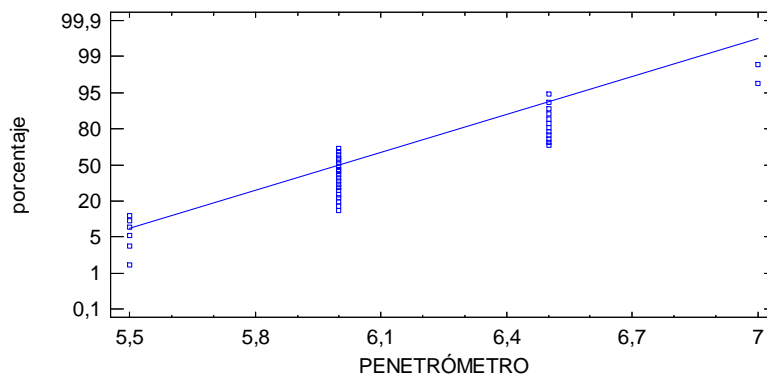


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,25	0,361281
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,96009	0,237229

## Tali

Sesgo Estandarizado	0,667032
Curtosis Estandarizada	-0,547156

Gráfico de Dispersión

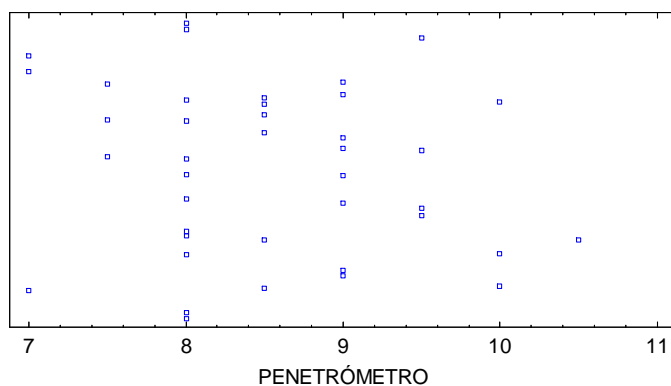


Gráfico de Caja y Bigotes

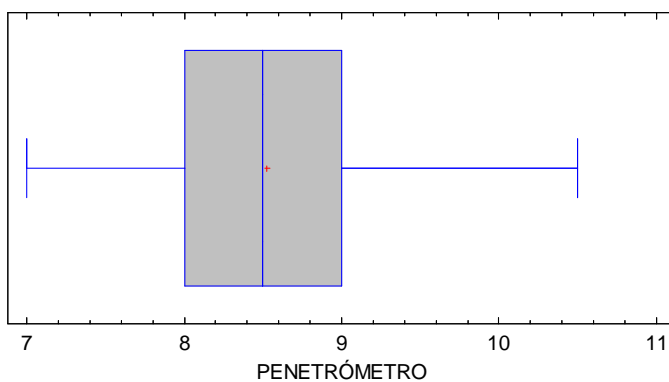
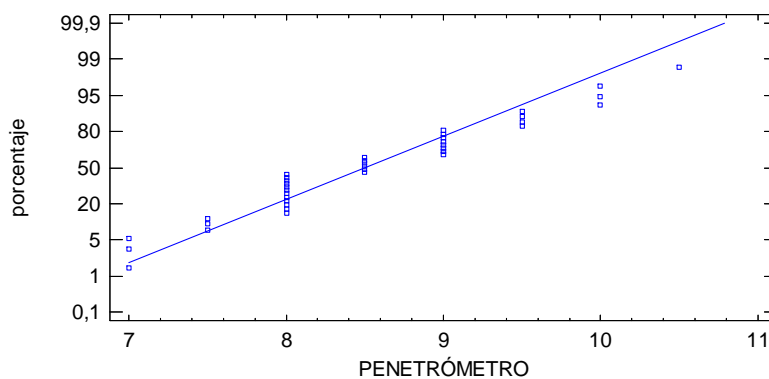


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	17,8	0,216042
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,931439	0,0230539

## Abedul

Sesgo Estandarizado	2,32634
Curtosis Estandarizada	0,952681

Gráfico de Dispersión

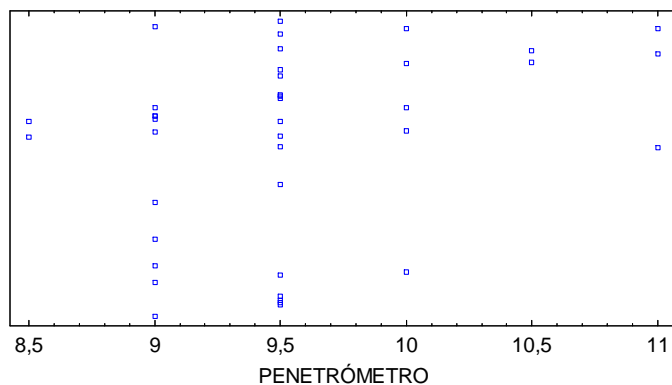


Gráfico de Caja y Bigotes

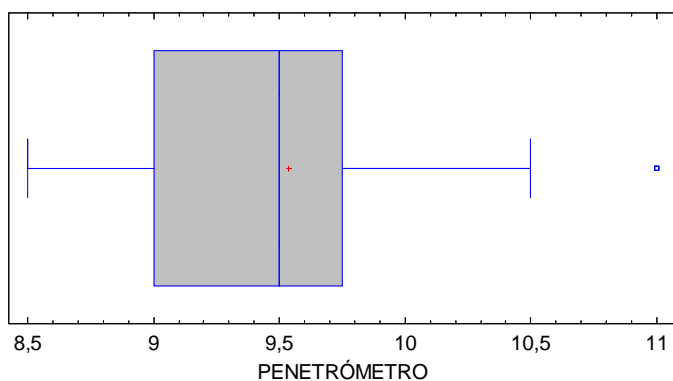
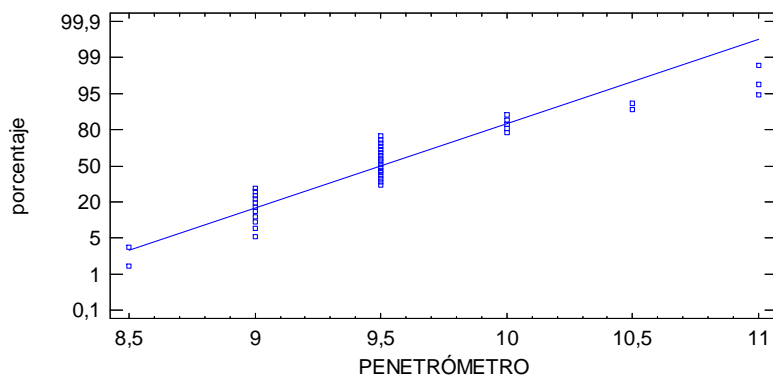


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,95	0,258852
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955487	0,167018



## Arce

Sesgo Estandarizado	1,27371
Curtosis Estandarizada	-0,574087

Gráfico de Dispersión

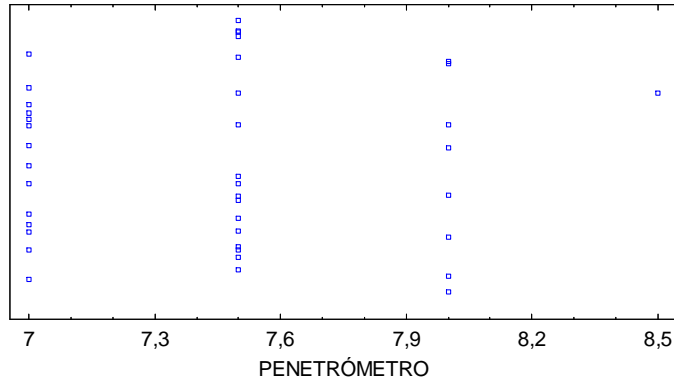


Gráfico de Caja y Bigotes

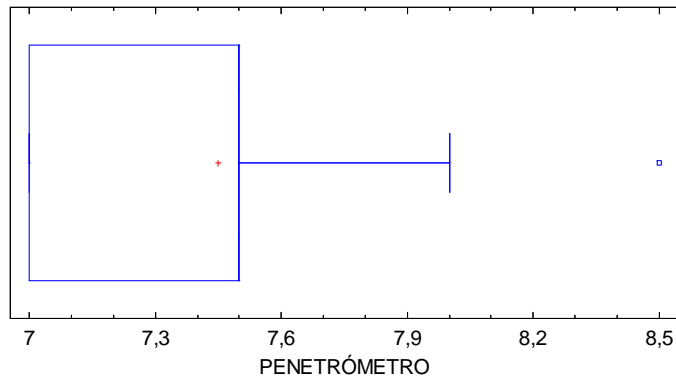
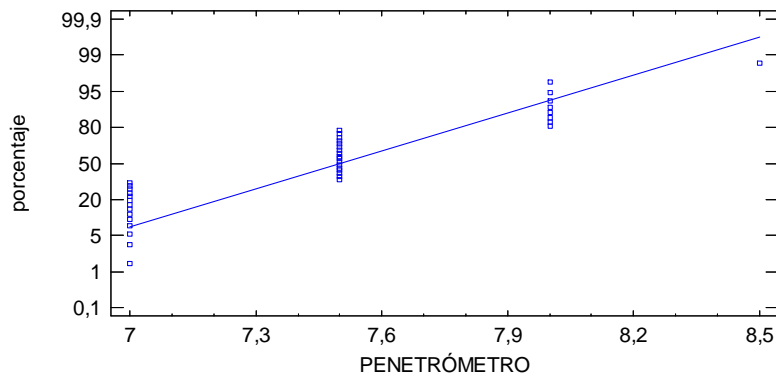


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,3	0,811366
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963445	0,30289

## Chopo

Sesgo Estandarizado	0,561992
Curtosis Estandarizada	-0,80554

Gráfico de Dispersión

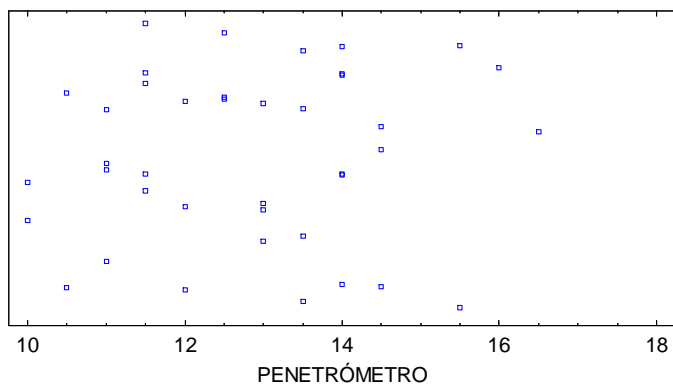


Gráfico de Caja y Bigotes

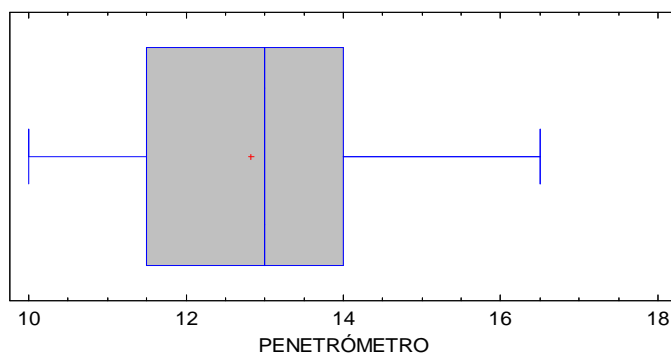
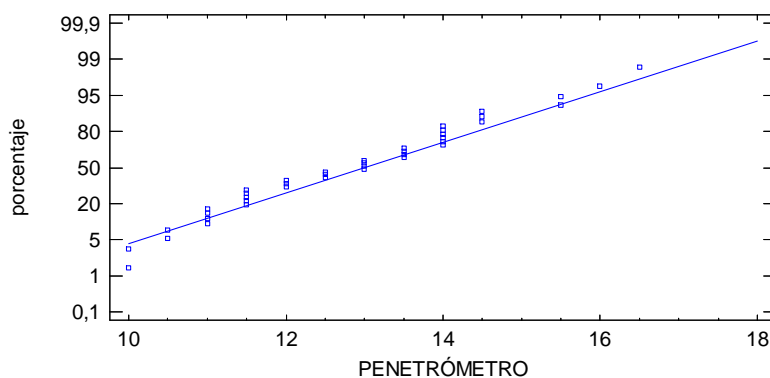


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	28,85	0,0109495
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,94234	0,0576155

## Plátano

Sesgo Estandarizado	-0,607856
Curtosis Estandarizada	-0,503195

Gráfico de Dispersión

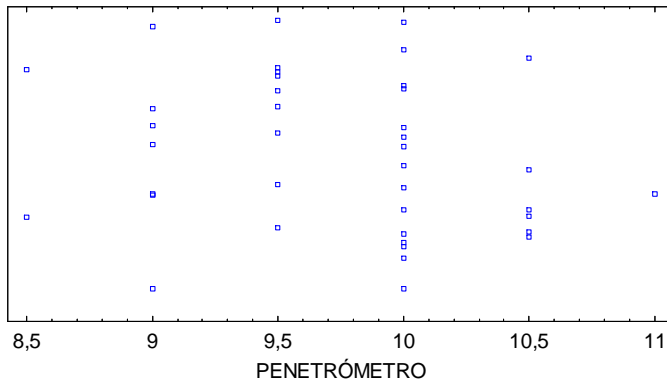


Gráfico de Caja y Bigotes

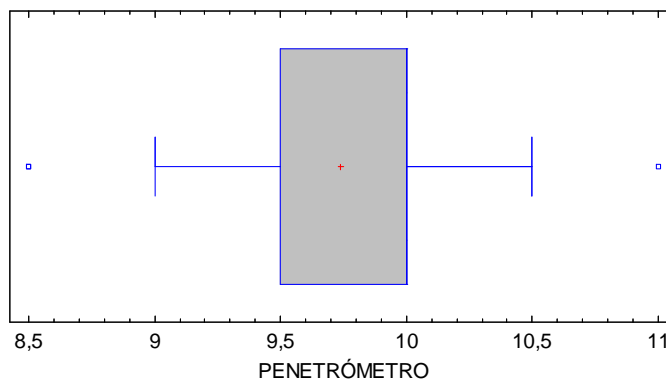
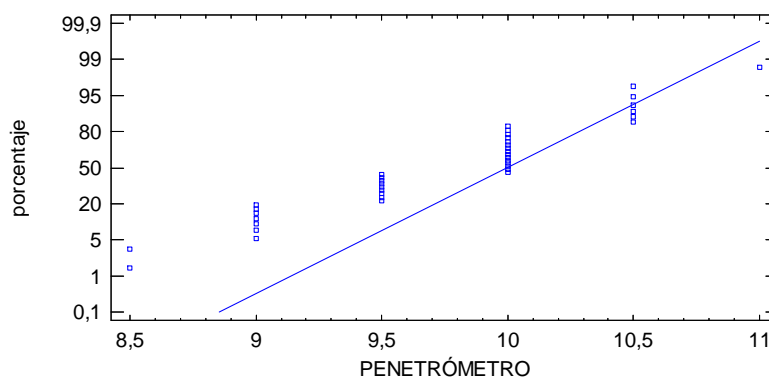


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	13,55	0,483745
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,968707	0,432813

## Pseudoacacia

Sesgo Estandarizado	-0,315154
Curtosis Estandarizada	-1,05955

Gráfico de Dispersión

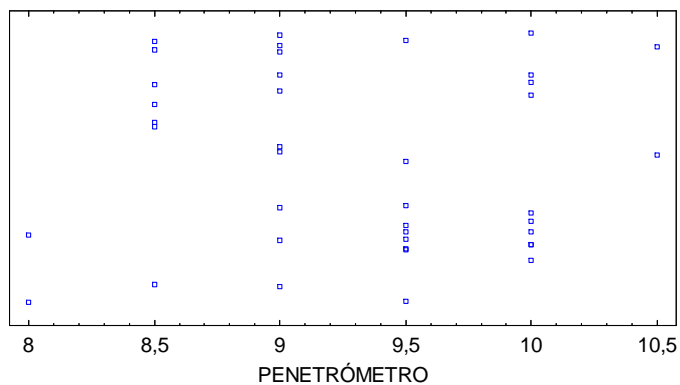


Gráfico de Caja y Bigotes

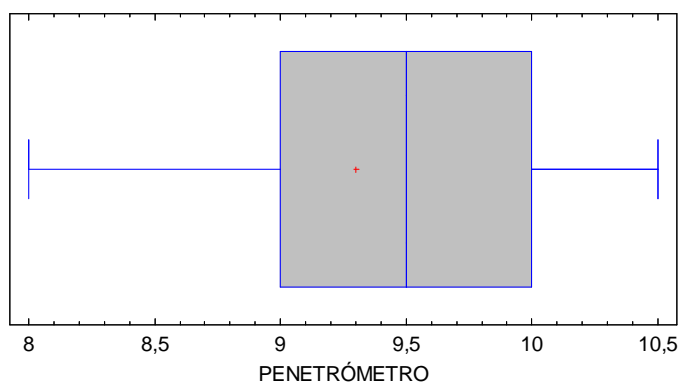
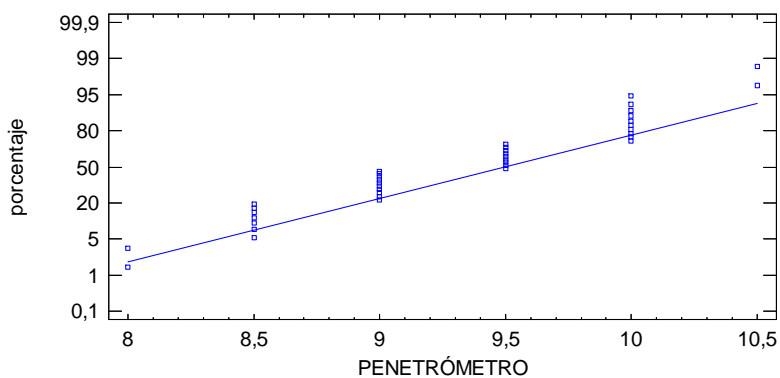


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	20,7179	0,109082
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,970424	0,4925

## Tilo

Sesgo Estandarizado	-0,787083
Curtosis Estandarizada	-0,422207

Gráfico de Dispersión

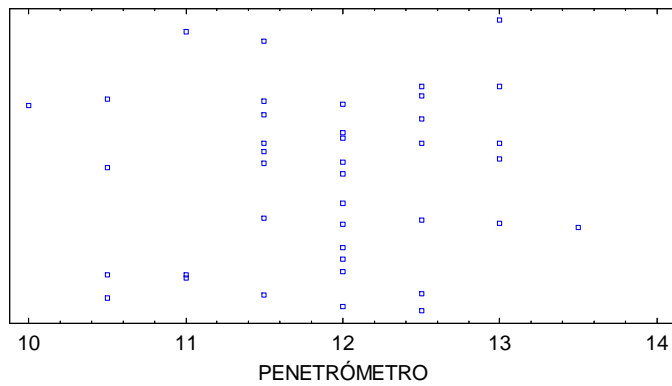


Gráfico de Caja y Bigotes

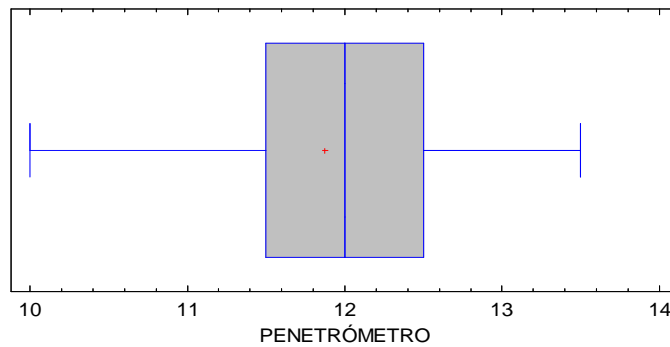
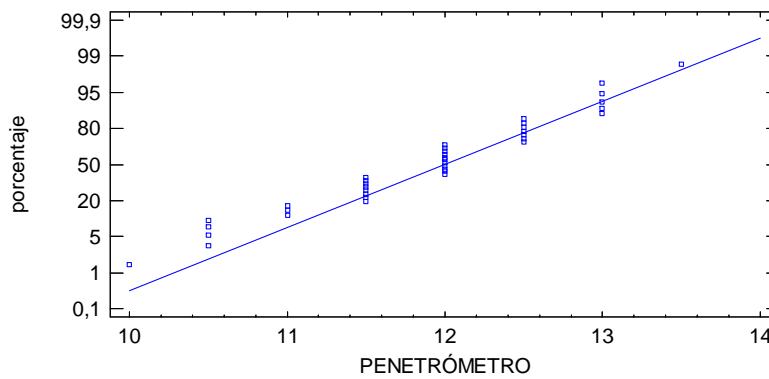


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	19,5	0,14671
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,980895	0,8123

## Alerce

Sesgo Estandarizado	0,741869
Curtosis Estandarizada	-1,14531

Gráfico de Dispersión

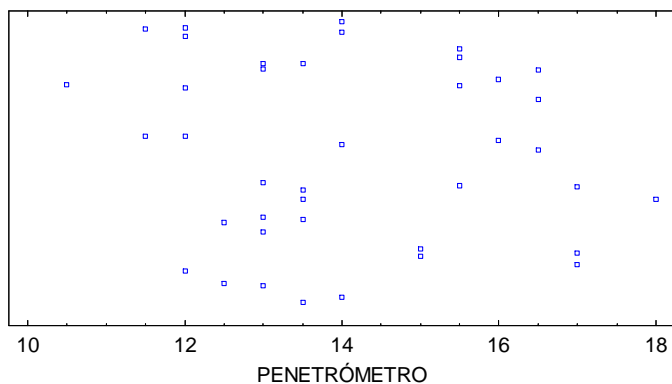


Gráfico de Caja y Bigotes

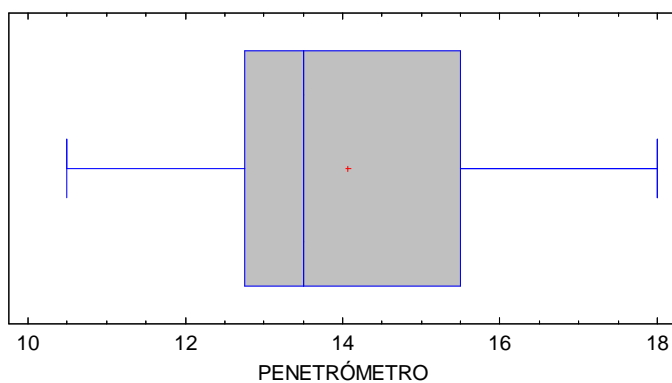
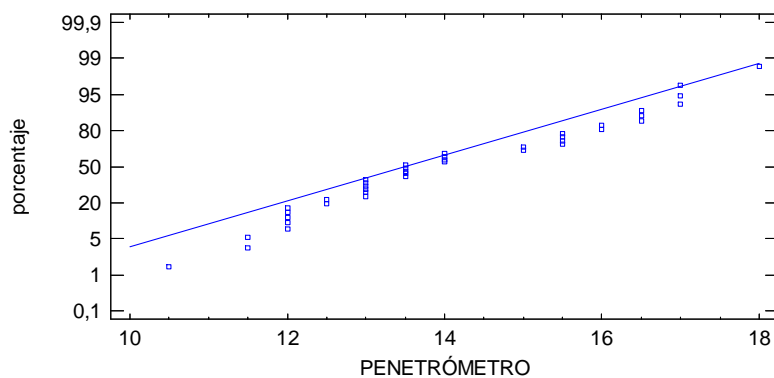


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	51,8	0,00000303988
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,837846	0,0000118924

## Pseudotsuga

Sesgo Estandarizado	-0,14214
Curtosis Estandarizada	-0,28187

Gráfico de Dispersión

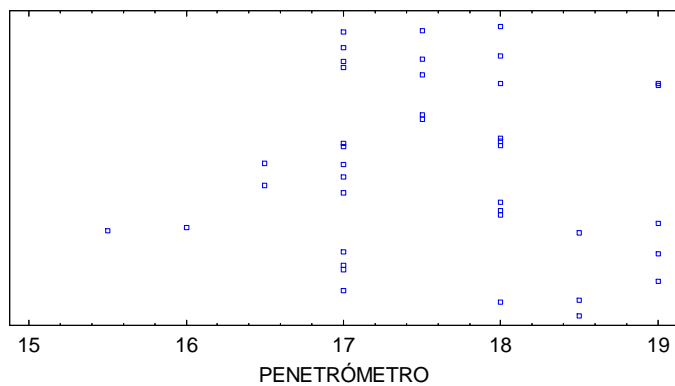


Gráfico de Caja y Bigotes

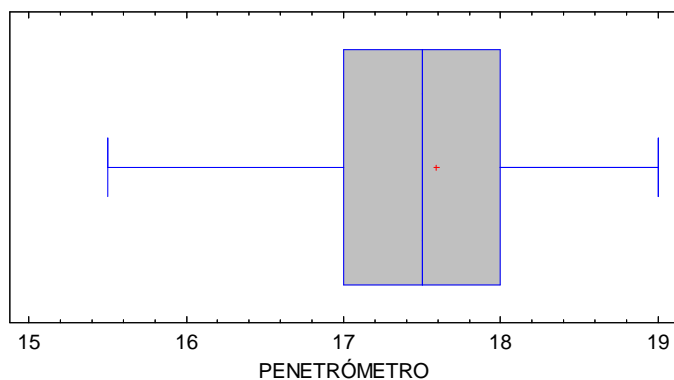
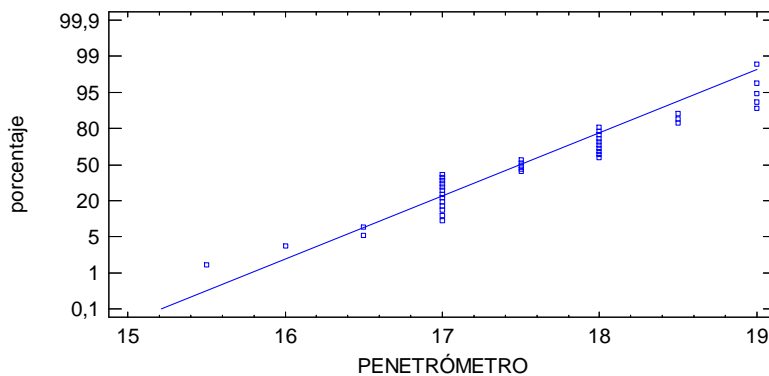


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	20,35	0,119487
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,957948	0,201883

## Pino resinero

Sesgo Estandarizado	0,619647
Curtosis Estandarizada	-1,25168

Gráfico de Dispersión

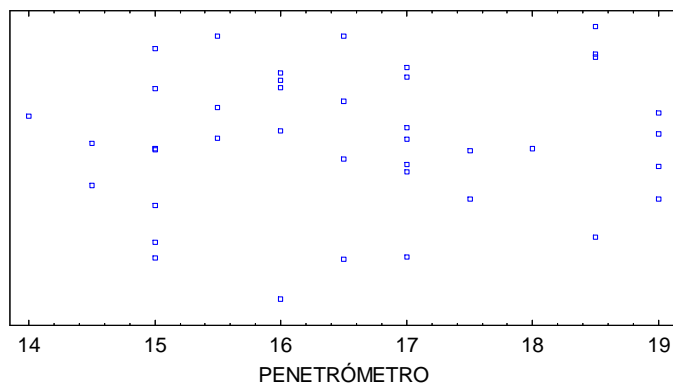


Gráfico de Caja y Bigotes

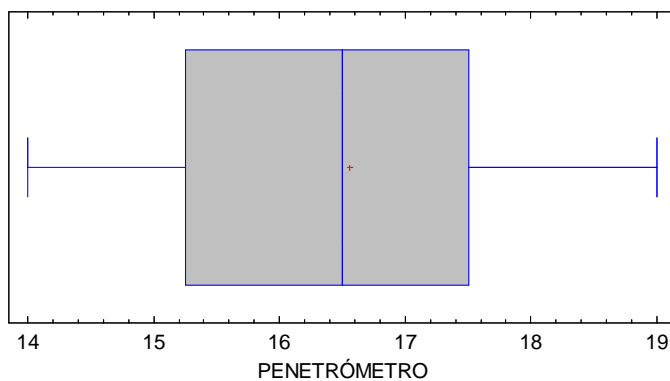
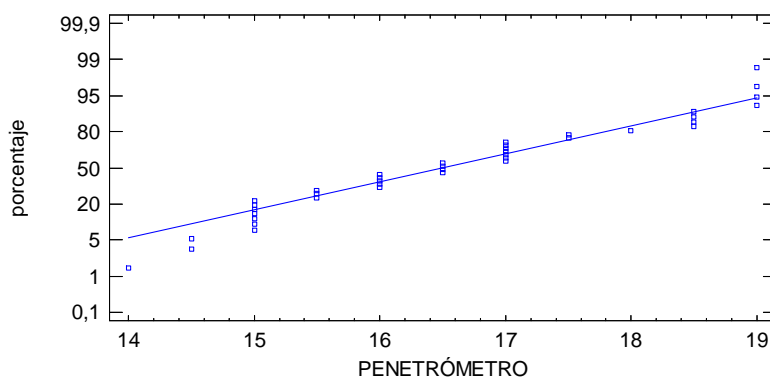


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	12,7	0,55027
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974573	0,611512



## Pino tea

Sesgo Estandarizado	1,50896
Curtosis Estandarizada	-1,23849

Gráfico de Dispersión

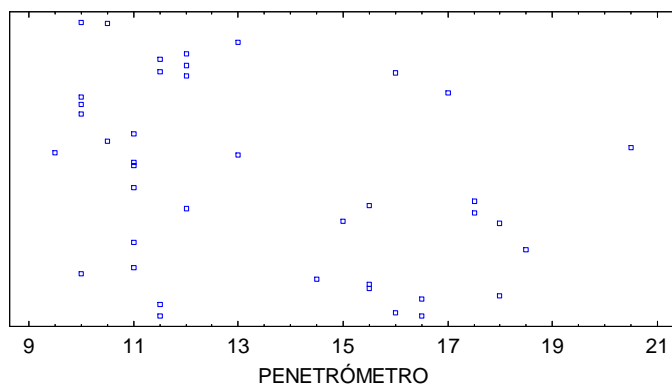


Gráfico de Caja y Bigotes

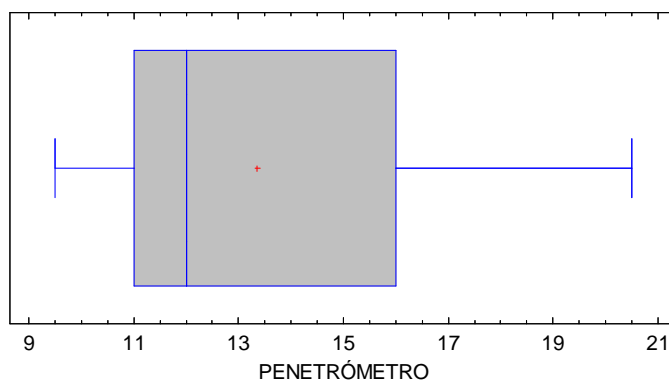
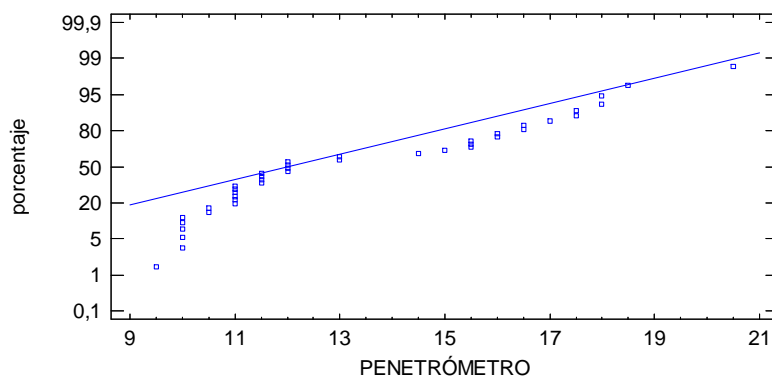


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	28,85	0,0109495
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97308	0,563607

## Sequoia

Sesgo Estandarizado	0,154614
Curtosis Estandarizada	-2,06138

Gráfico de Dispersión

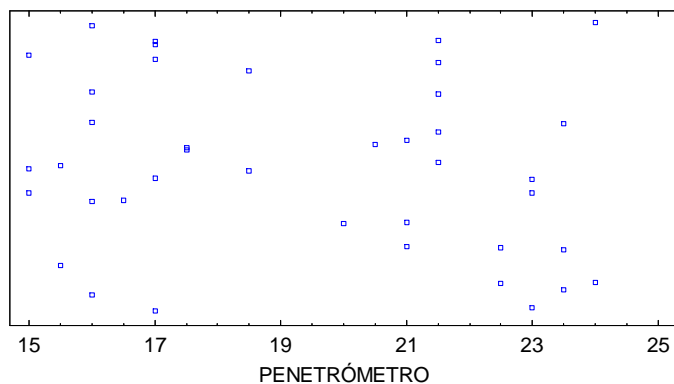


Gráfico de Caja y Bigotes

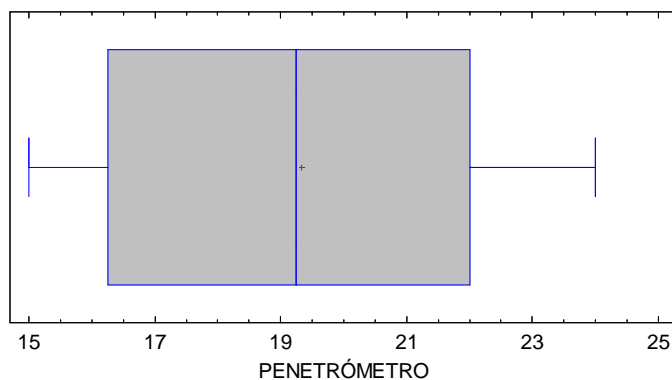
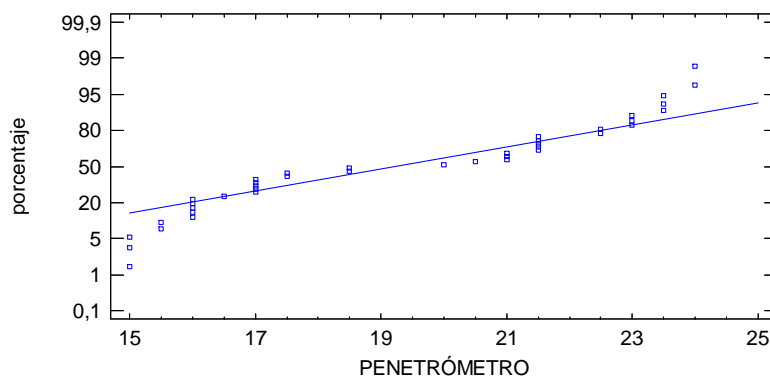


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	67,1	6,43662E-9
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,832562	0,00000801206

## I.II. DATOS DE DENSIDAD

### Amaranto

Sesgo Estandarizado	-1,7623
Curtosis Estandarizada	-1,04875

Gráfico de Dispersión

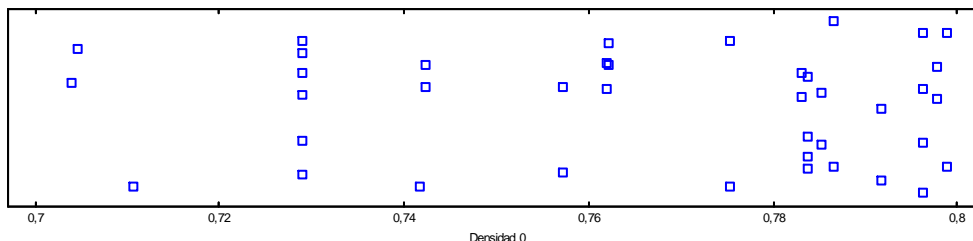


Gráfico de Caja y Bigotes

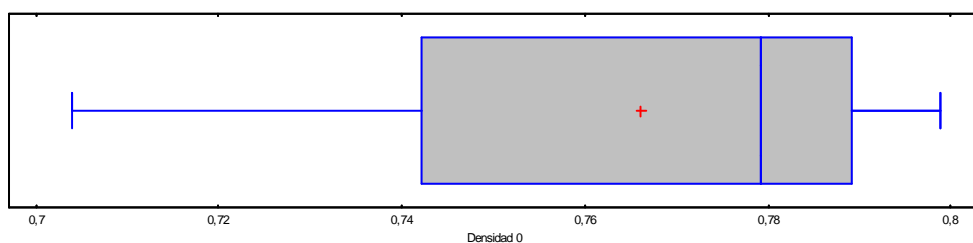
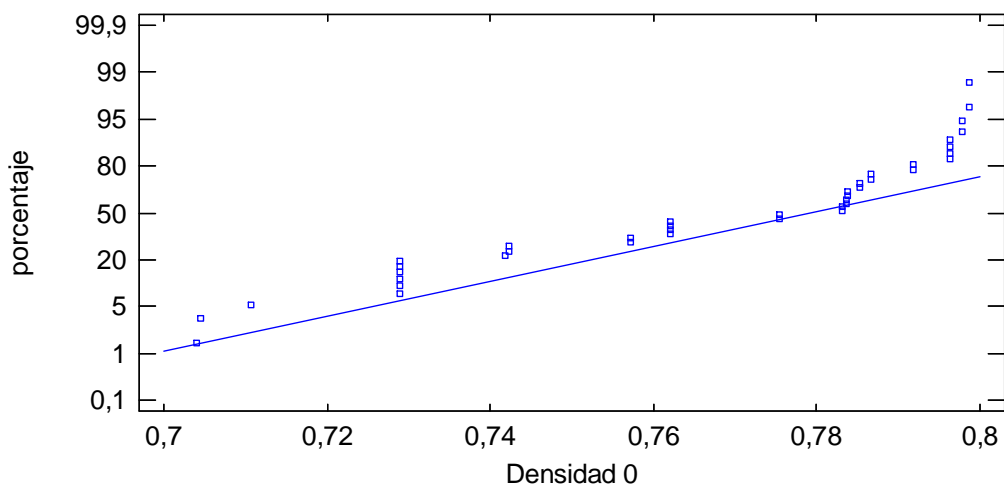


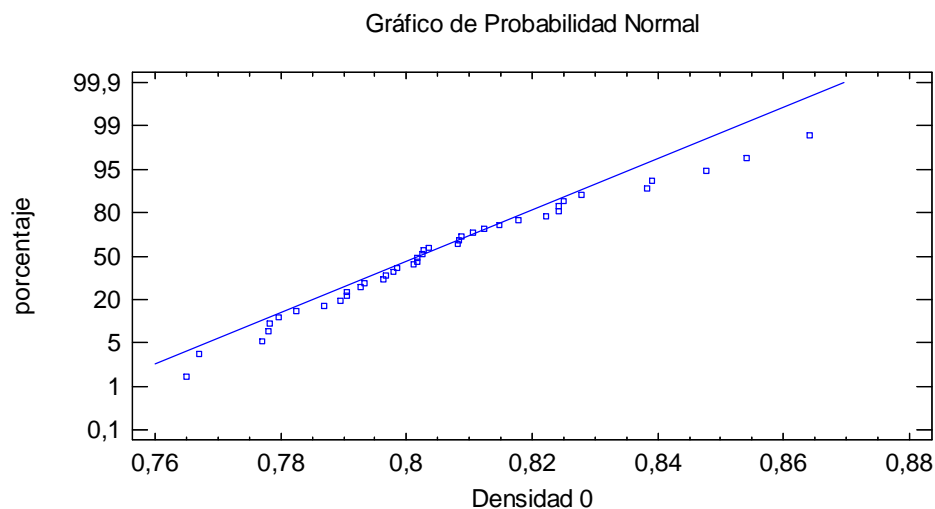
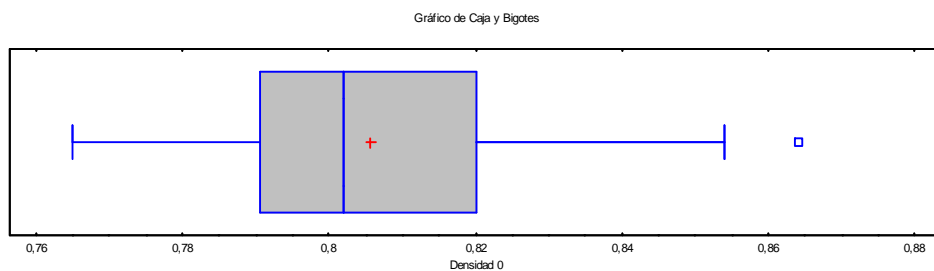
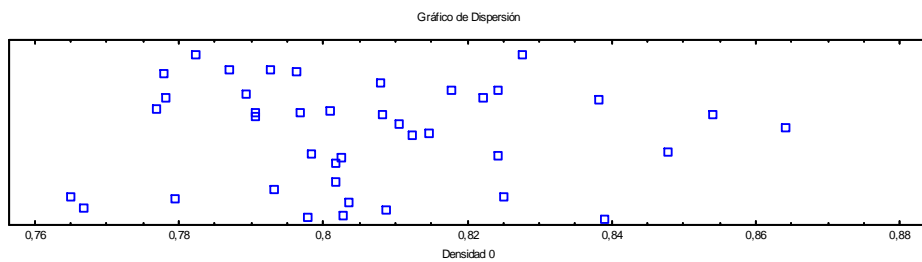
Gráfico de Probabilidad Normal



Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	64,55	1,84027E-8
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,870102	0,000143507

## Bubinga

Sesgo Estandarizado	1,5371
Curtosis Estandarizada	0,297405



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,95	0,258852
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,965741	0,355511

## Cerejeira

Sesgo Estandarizado	2,73846
Curtosis Estandarizada	2,12481

Gráfico de Caja y Bigotes

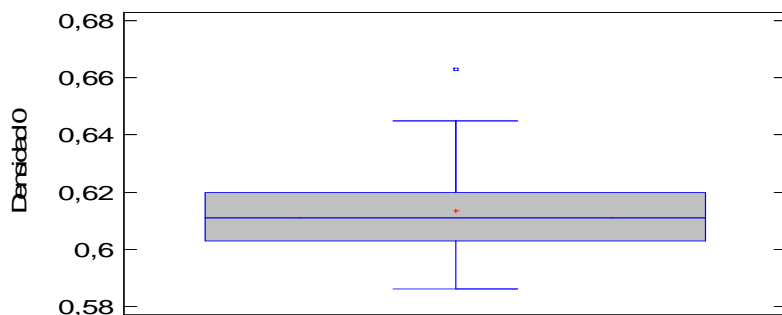


Gráfico de Dispersión

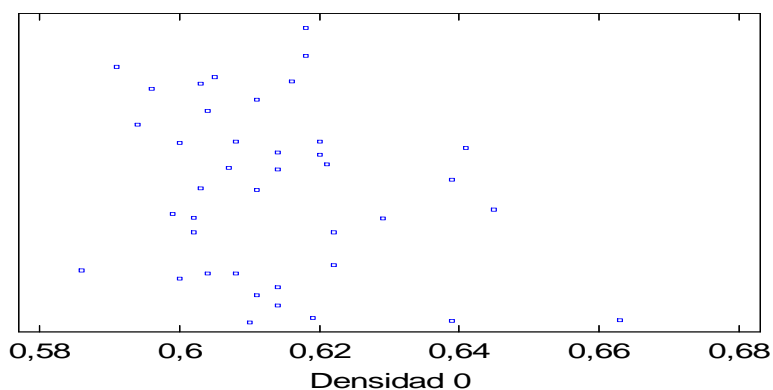
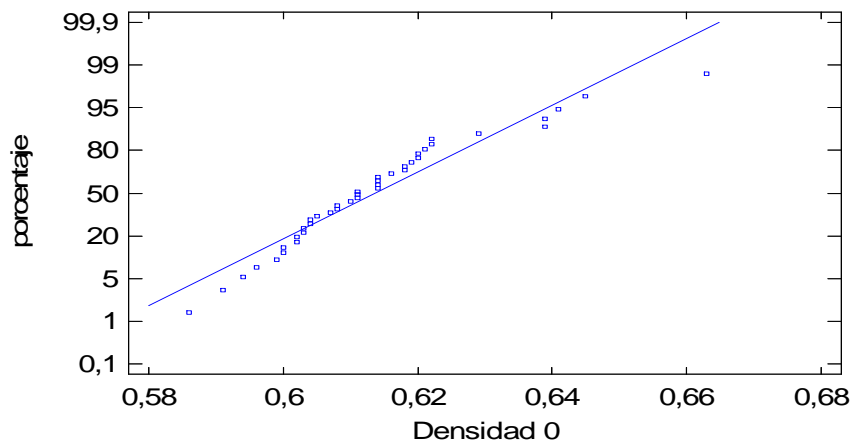


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	18,65	0,178759
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,946292	0,0798677

## Etimoe

Sesgo Estandarizado	0,781822
Curtosis Estandarizada	-0,660406

Gráfico de Dispersión

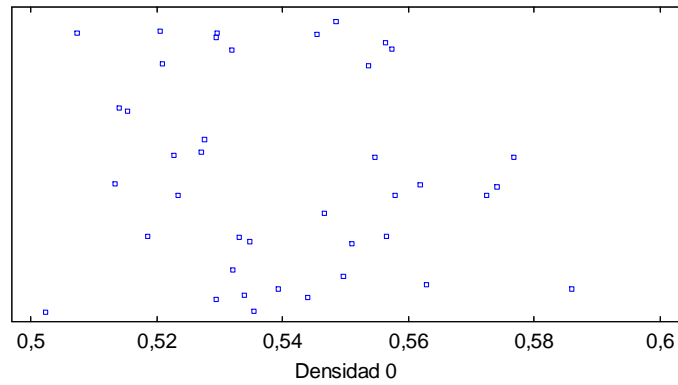


Gráfico de Caja y Bigotes

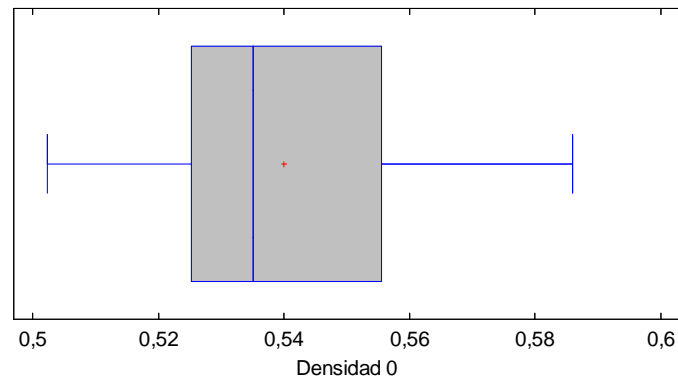
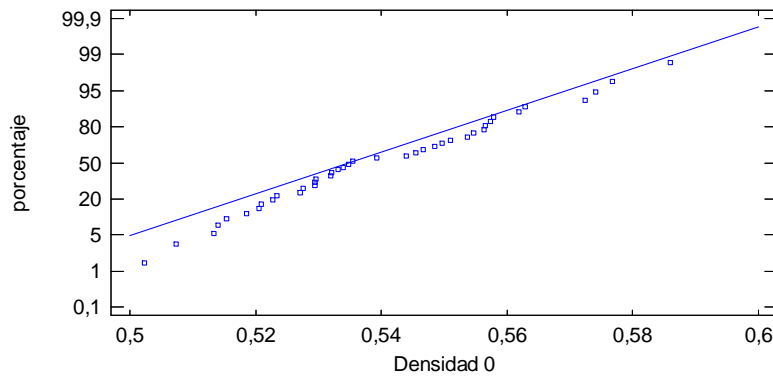


Gráfico de Probabilidad Normal



Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,25	0,361281
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974241	0,600751

## Jatoba

Sesgo Estandarizado	1,60357
Curtosis Estandarizada	0,0446038

Gráfico de Dispersión

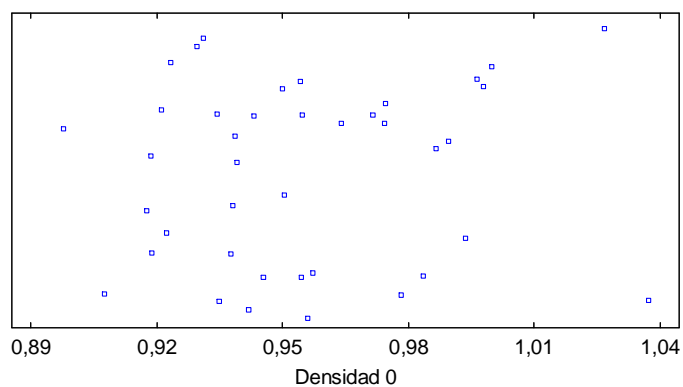


Gráfico de Caja y Bigotes

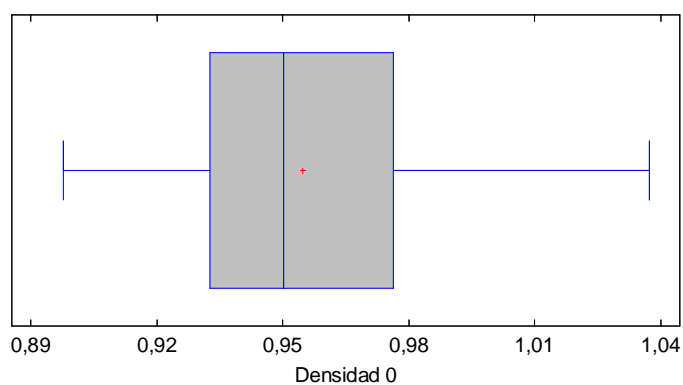
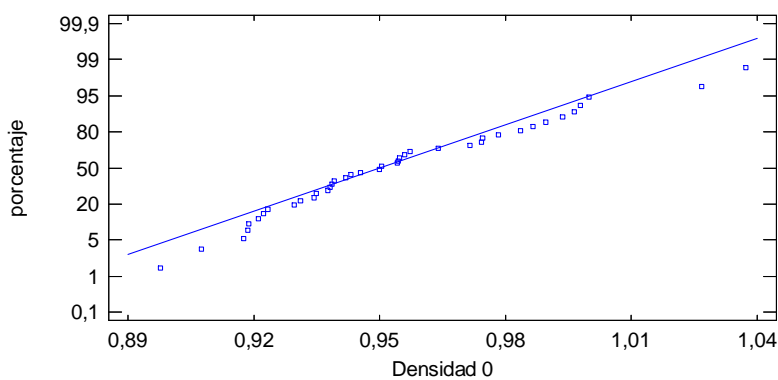


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,25	0,361281
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,96009	0,237229

## Tali

Sesgo Estandarizado	0,124563
Curtosis Estandarizada	-1,65467

Gráfico de Dispersión

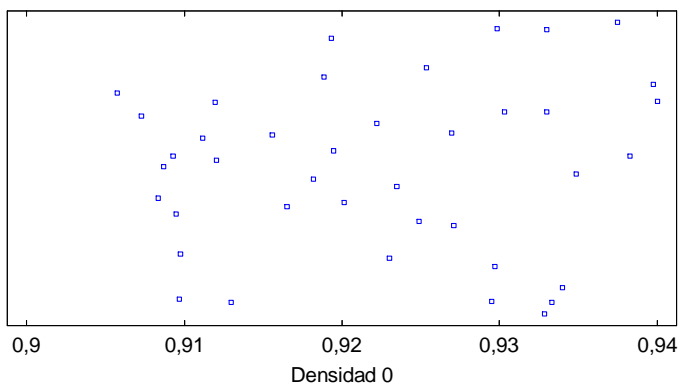


Gráfico de Caja y Bigotes

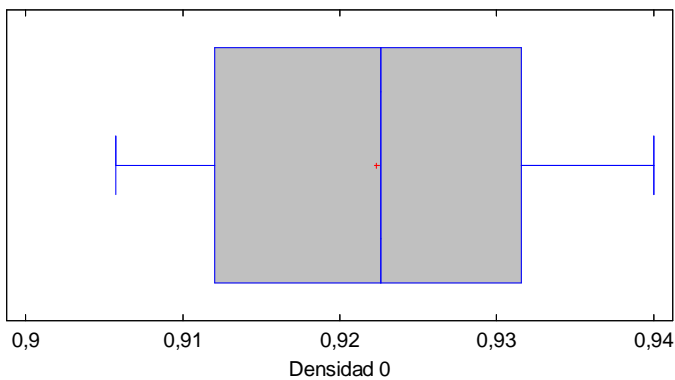
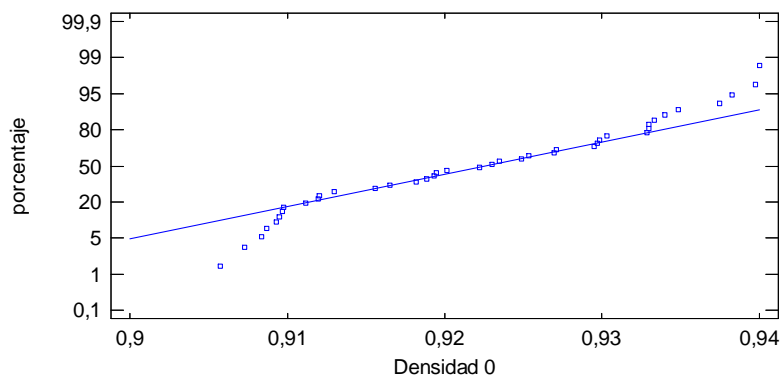


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	17,8	0,216042
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,931439	0,0230539



## Abedul

Sesgo Estandarizado	0,591317
Curtosis Estandarizada	-1,1346

Gráfico de Dispersión

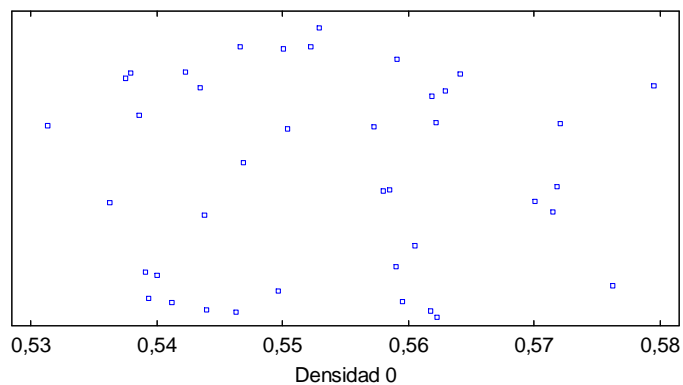


Gráfico de Caja y Bigotes

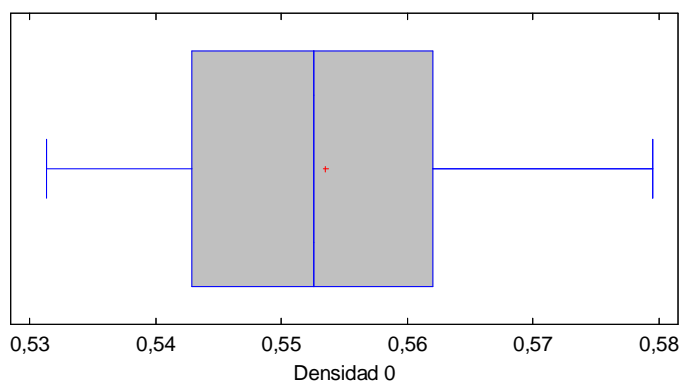
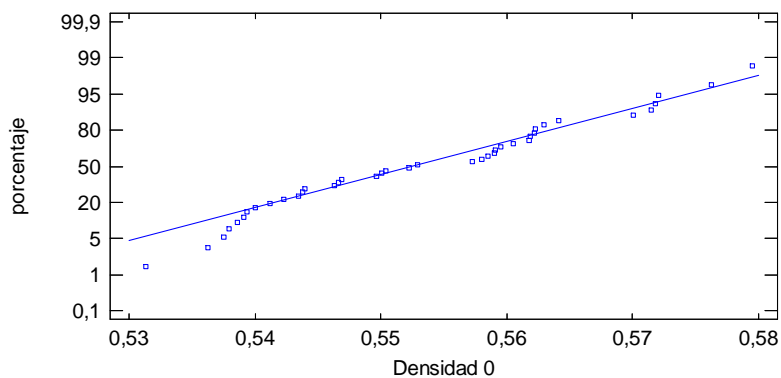


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,95	0,258852
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955487	0,167018

**Arce**

Sesgo Estandarizado	0,565153
Curtosis Estandarizada	-1,08516

Gráfico de Dispersión

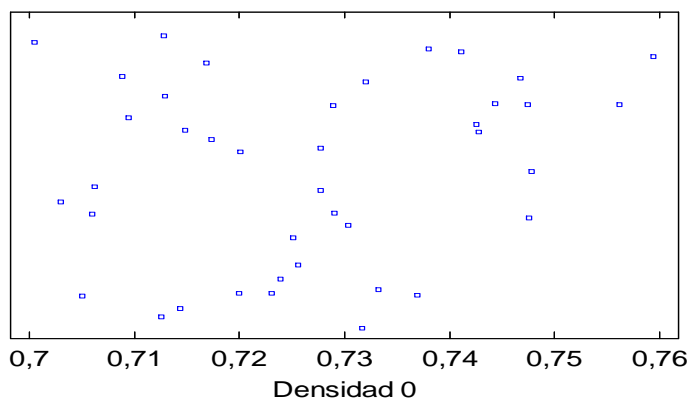


Gráfico de Caja y Bigotes

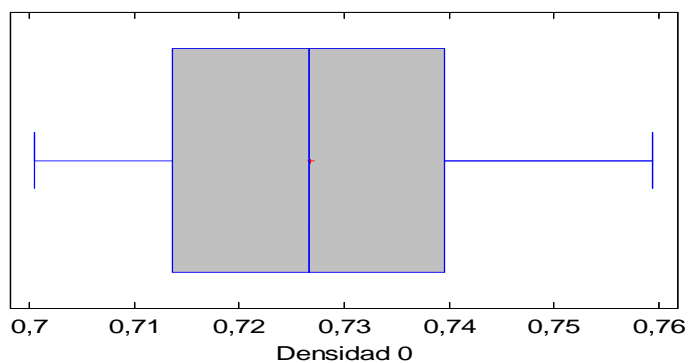
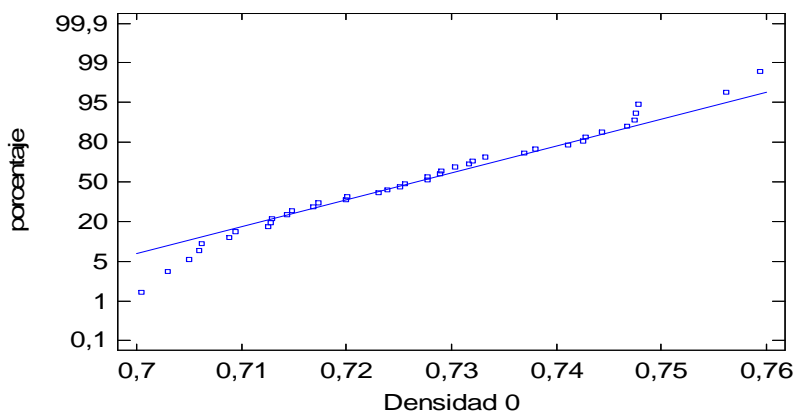


Gráfico de Probabilidad Normal



Chi-Cuadrado	9,3	0,811366
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963445	0,30289

## Chopo

Sesgo Estandarizado	0,893921
Curtosis Estandarizada	-0,251131

Gráfico de Dispersión

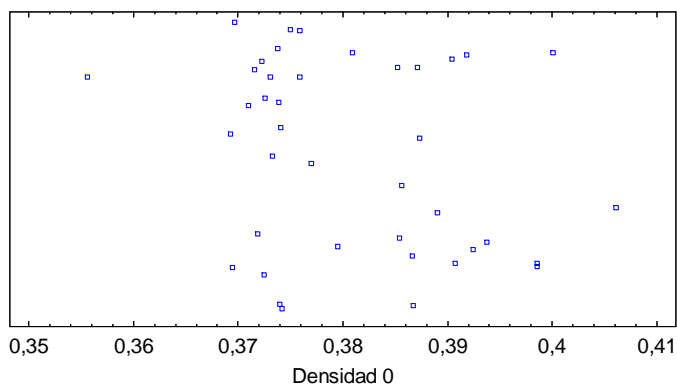


Gráfico de Caja y Bigotes

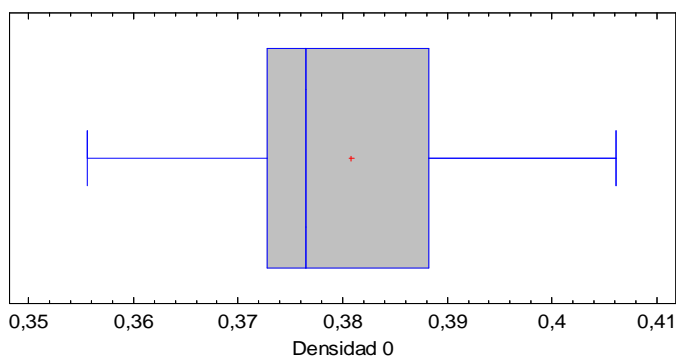
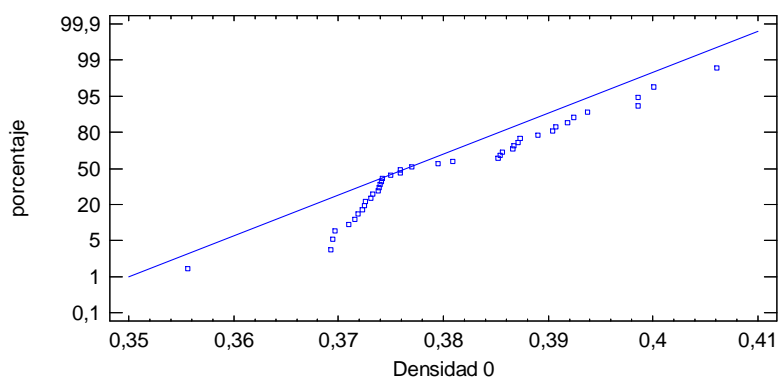


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	28,85	0,0109495
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,94234	0,0576155

## Plátano

Sesgo Estandarizado	0,819133
Curtosis Estandarizada	-0,236208

Gráfico de Dispersión

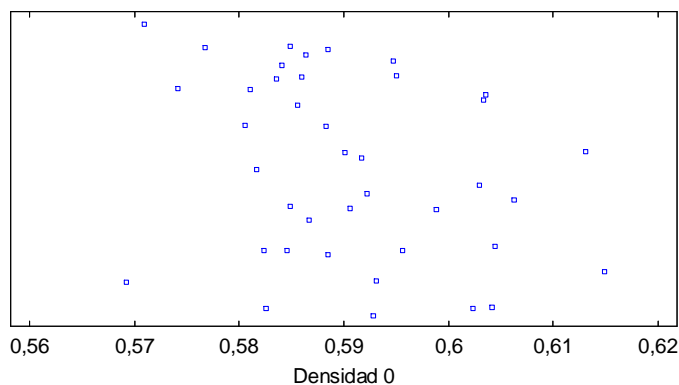


Gráfico de Caja y Bigotes

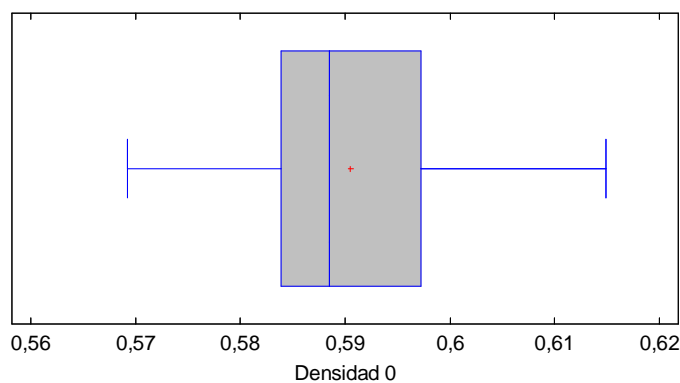
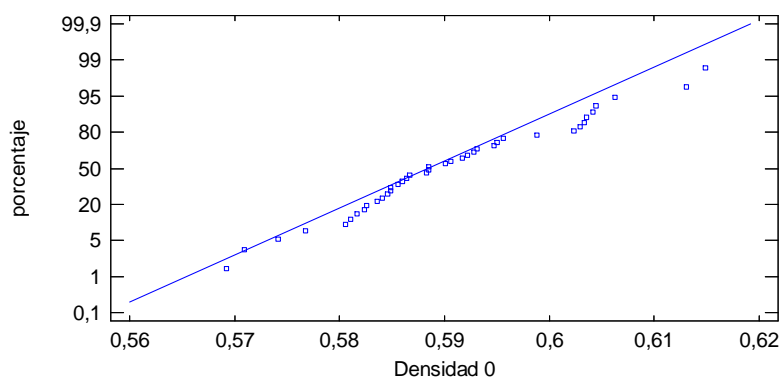


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	13,55	0,483745
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,968707	0,432813

## Pseudoacacia

Sesgo Estandarizado	-0,747259
Curtosis Estandarizada	1,00609

Gráfico de Dispersión

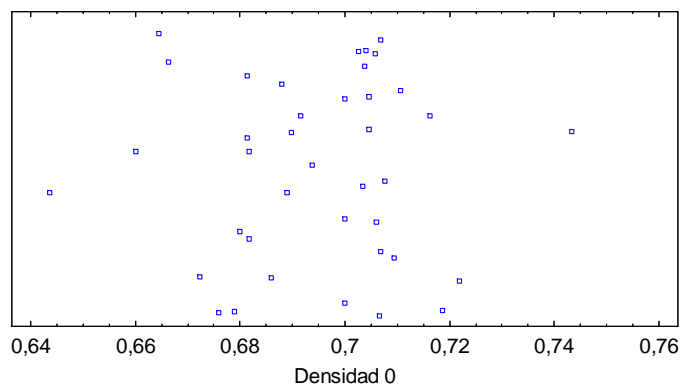


Gráfico de Caja y Bigotes

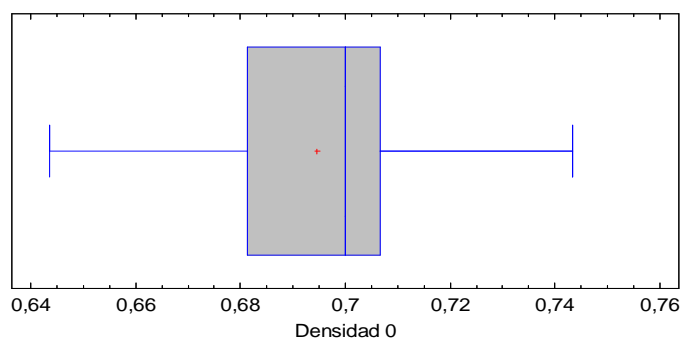
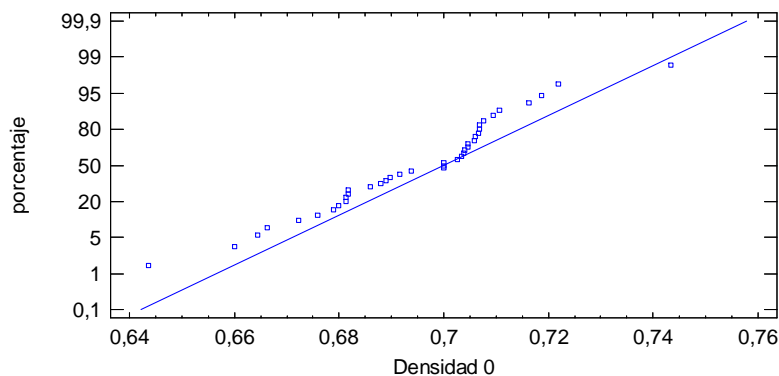


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	20,7179	0,109082
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,970424	0,4925

## Tilo

Sesgo Estandarizado	0,419654
Curtosis Estandarizada	0,992362

Gráfico de Dispersión

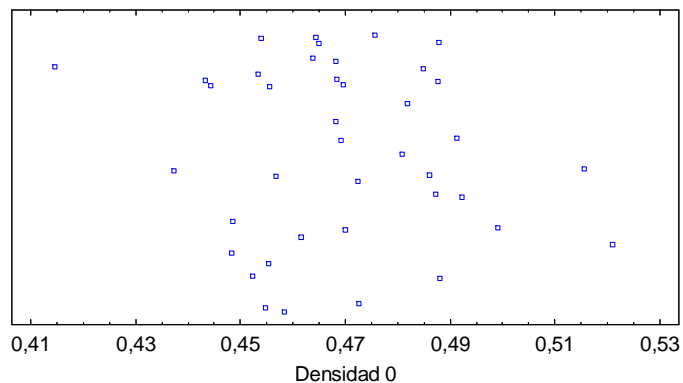


Gráfico de Caja y Bigotes

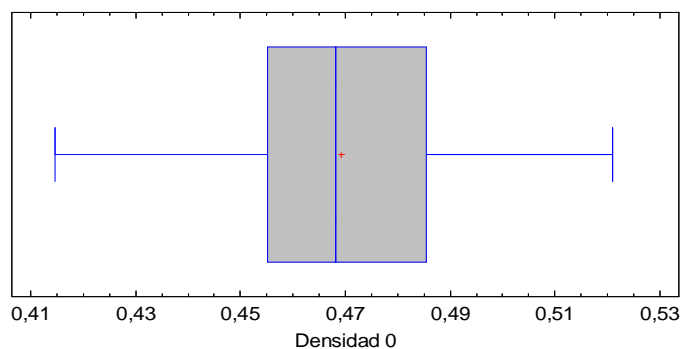
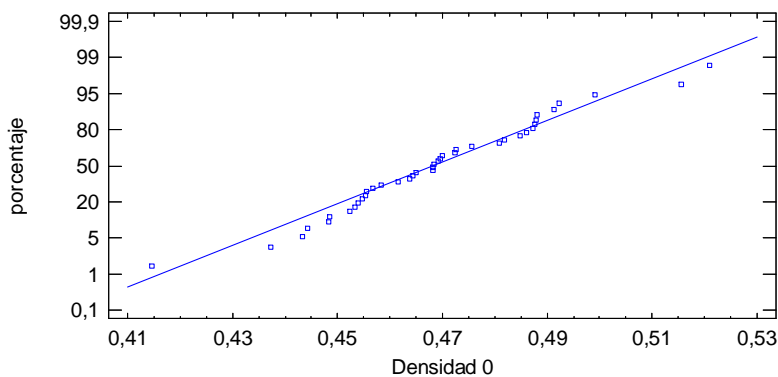


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	19,5	0,14671
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,980895	0,8123

## Alerce

Sesgo Estandarizado	-0,364111
Curtosis Estandarizada	-2,22805

Gráfico de Dispersión

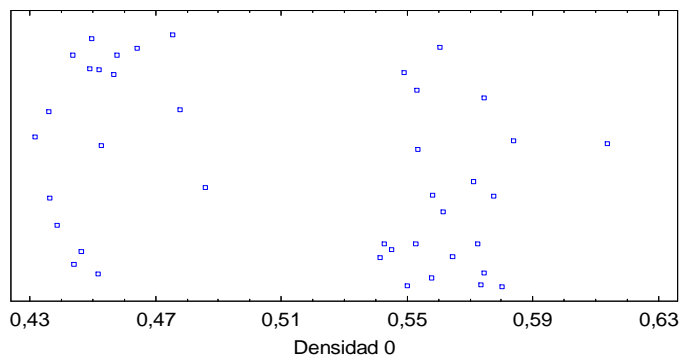


Gráfico de Caja y Bigotes

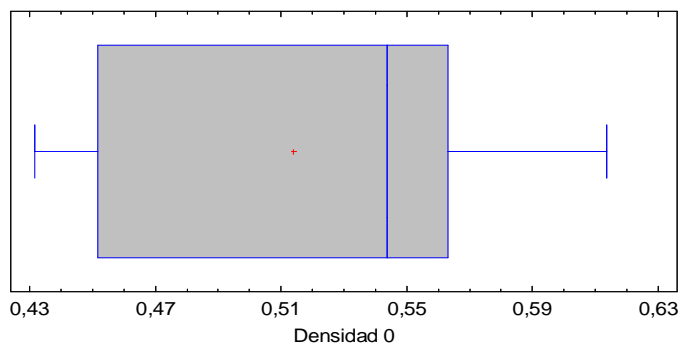
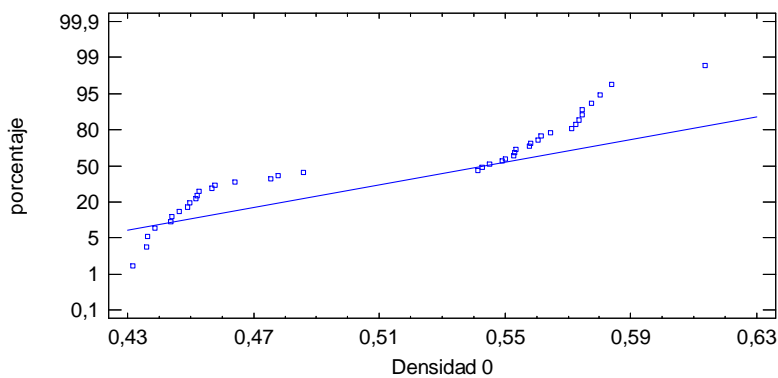


Gráfico de Probabilidad Normal



Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	51,8	0,00000303988
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,837846	0,0000118924

## Pseudotsuga

Sesgo Estandarizado	0,325542
Curtosis Estandarizada	0,175083

Gráfico de Dispersión

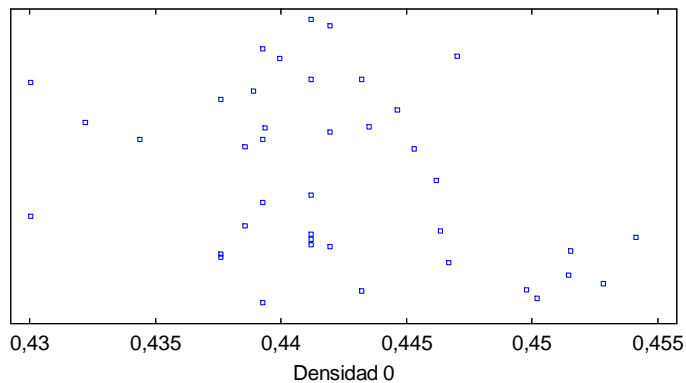


Gráfico de Caja y Bigotes

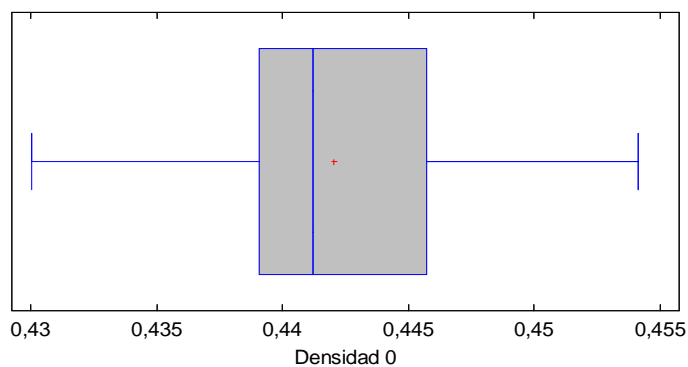
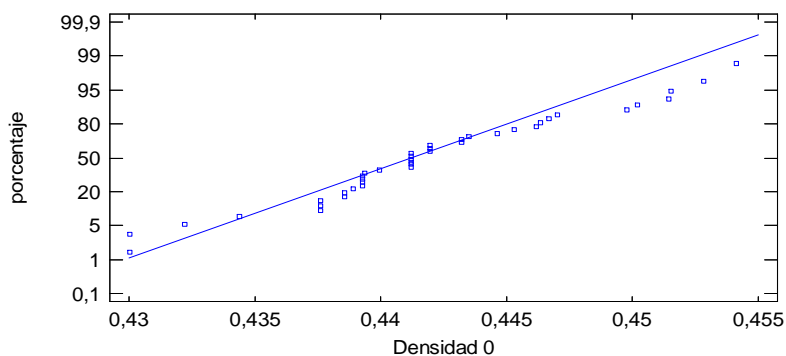


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	20,35	0,119487
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,957948	0,201883



## Pino resinero

Sesgo Estandarizado	-1,48831
Curtosis Estandarizada	1,07836

Gráfico de Dispersión

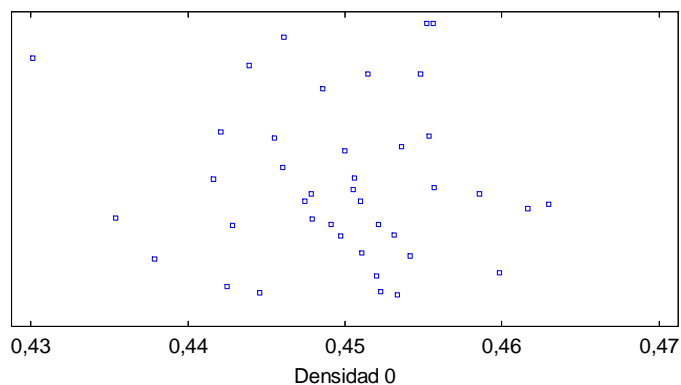


Gráfico de Caja y Bigotes

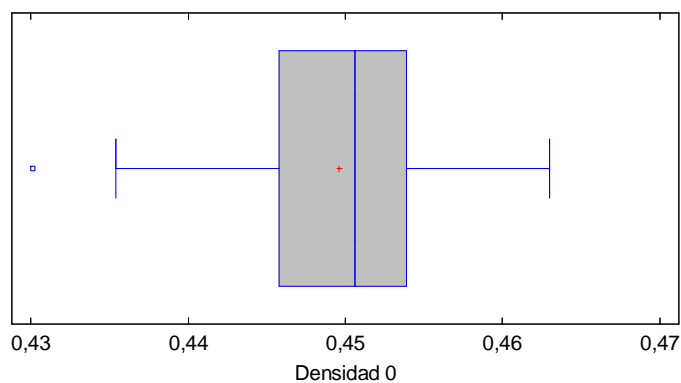
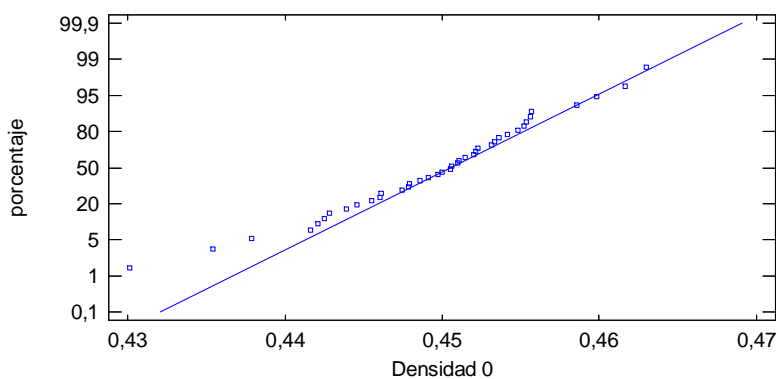


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	12,7	0,55027
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974573	0,611512

## Pino tea

Sesgo Estandarizado	0,319506
Curtosis Estandarizada	-0,848707

Gráfico de Dispersión

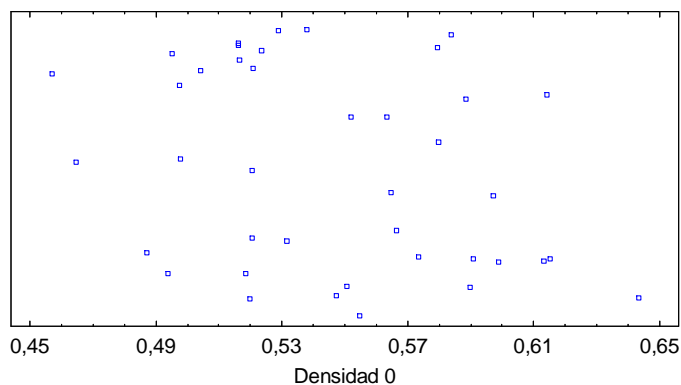


Gráfico de Caja y Bigotes

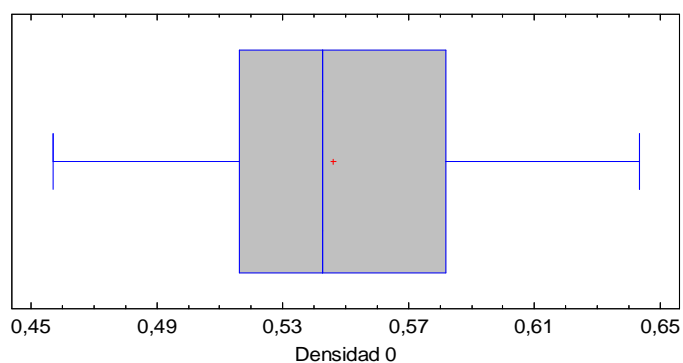
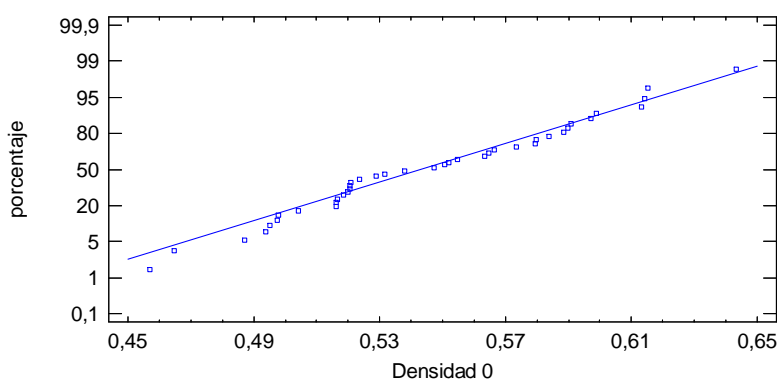


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	28,85	0,0109495
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,97308	0,563607

## Sequoia

Sesgo Estandarizado	-0,363553
Curtosis Estandarizada	-2,24979

Gráfico de Dispersión

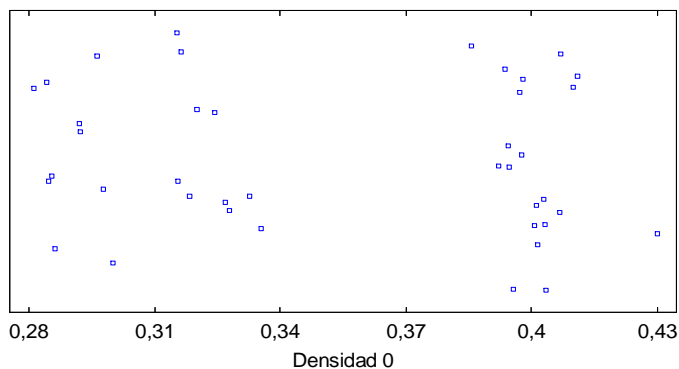


Gráfico de Caja y Bigotes

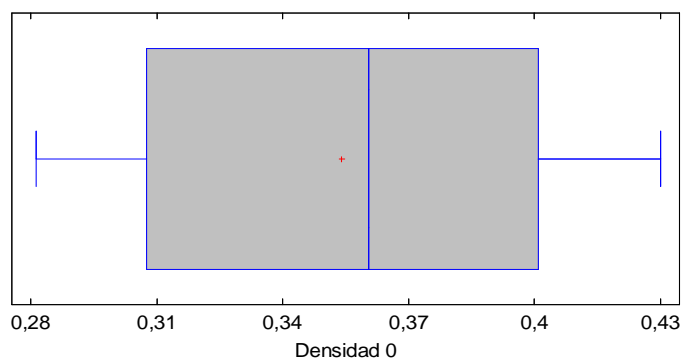
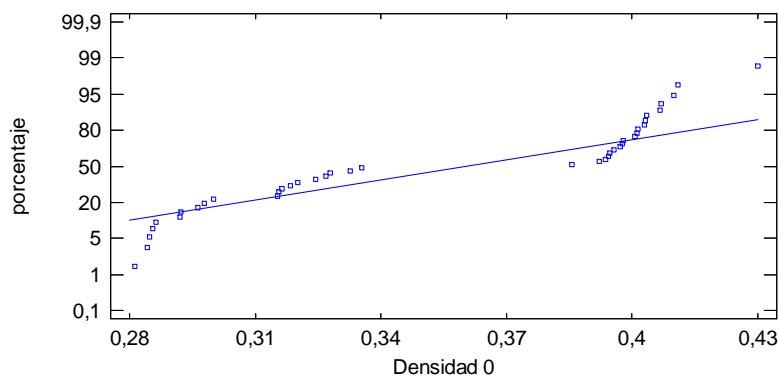


Gráfico de Probabilidad Normal



### Pruebas de Normalidad para Densidad 0

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	67,1	6,43662E-9
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,832562	0,00000801206

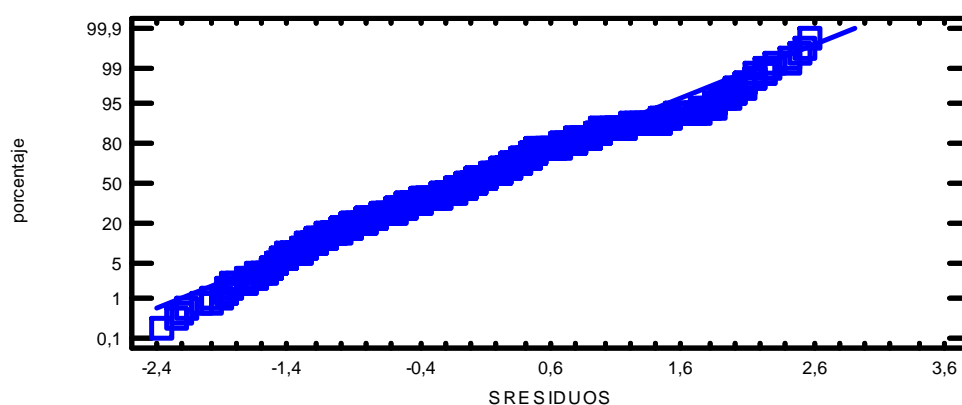
### I.III. ESTUDIO DE LA NORMALIDAD DE RESIDUOS

A continuación vamos a presentar los gráficos de cada regresión para confirmar su normalidad o no, para ello emplearemos el análisis de residuos mediante: gráfico de probabilidad de normalidad, valores de sesgo y curtosis y prueba de normalidad.

Para que los datos cumplan con la condición de distribución normal, los valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizado deben de estar comprendidos entre 2 y -2. En la prueba de normalidad se debe de obtener un P-valor superior a 0,05 para confirmar la normalidad de los datos con un 95% de nivel de confianza.

#### Regresión simple densidad-penetración

Gráfico de Probabilidad Normal

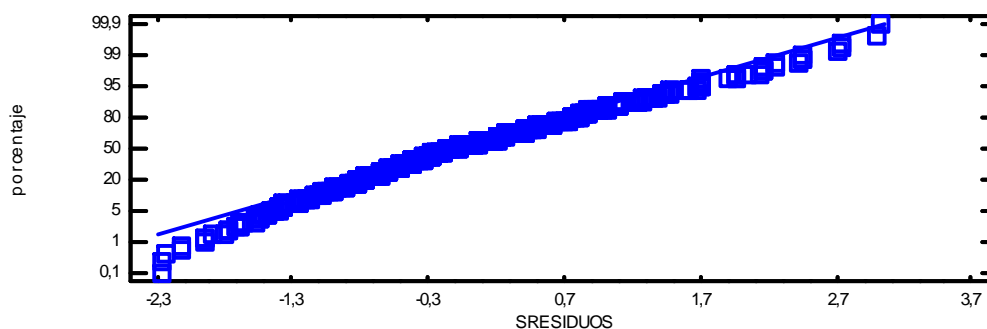


Sesgo Estandarizado	3,11231
Curtosis Estandarizada	-1,74855

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,967623	1,32501E-11

#### Regresión simple densidad-penetración para frondosas

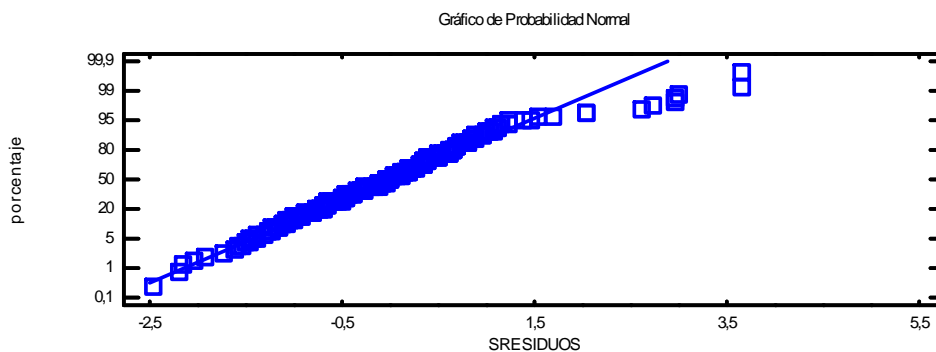
Gráfico de Probabilidad Normal



Sesgo Estandarizado	3,52078
Curtosis Estandarizada	-0,59685

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,971518	0,0000322675

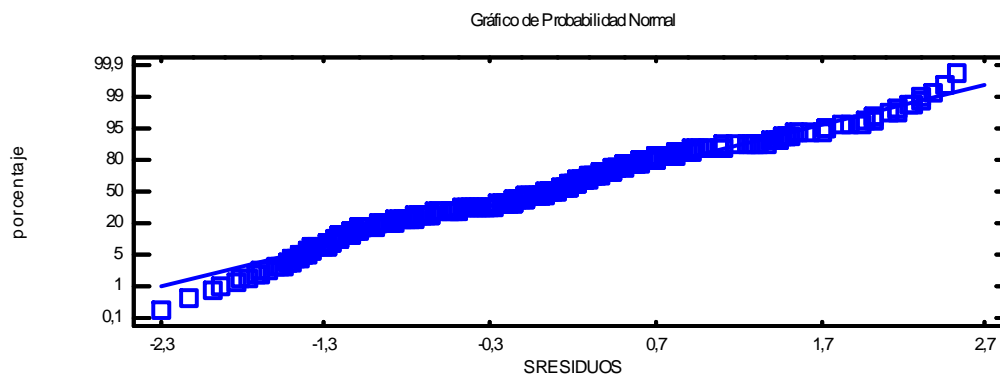
### Regresión simple densidad-penetración para coníferas



Sesgo Estandarizado	4,20874
Curtosis Estandarizada	5,01912

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955706	0,0000292859

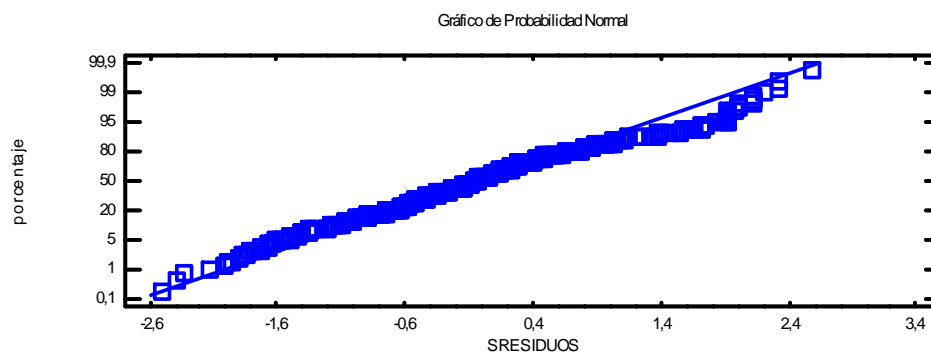
### Regresión simple densidad-penetración para dirección tangencial



Sesgo Estandarizado	1,98102
Curtosis Estandarizada	-1,47963

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,961803	2,38342E-7

## Regresión simple densidad-penetración para dirección radial



Sesgo Estandarizado	1,6398
Curtosis Estandarizada	-0,680984

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969339	0,000274094