



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MONTES

Estimación de la densidad de madera de
Populus x euramericana I-214, *Pinus pinaster*,
Pinus sylvestris y *Quercus pyrenaica*
mediante penetrómetro

Alumno: Manuel Peral Andrés

Tutora: M^a Milagrosa Casado Sanz
Cotutor: Roberto San Martín Fernández

Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS:

A la tutora, *Milagros*, por la ayuda mostrada en todo momento, disponibilidad y por todas las facilidades otorgadas en la realización del presente trabajo fin de máster.

A mis *amigos, compañeros de clase y compañeros de faenas y bibliotecas*, gracias por el apoyo y ánimos mostrados por estos años de dedicación, por esas ayudas en los momentos más críticos y “a última hora”.

A mi *familia* por los ánimos que me daban y su insistencia en realizar las “cosas bien”

A TODOS ELLOS, MUCHAS GRACIAS...

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	6
2. ANTECEDENTES	9
2.1. Anatomía de la madera	10
2.1.1. Cámbium	
2.1.2. Sámago o jane	
2.1.3. Duramen	
2.1.4. Albura	
2.1.5. Médula	
2.1.6. Anillos de crecimiento	
2.1.7. Liber	
2.1.8. Corteza	
2.1.9. Radios Leñosos	
2.2. Propiedades físicas de la madera	13
2.2.1. Contenido de humedad de la madera	
2.2.2. Higrscopicidad	
2.2.3. Hinchazón y merma de la madera	
2.2.4. Densidad	
2.2.5. Dureza	
2.2.5.1. Ensayos de dureza	
2.2.5.1.1. Ensayo BRINELL	
2.2.5.1.2. Ensayo JANKA	
2.2.6. Anisotropía	
2.3. Propiedades mecánicas de la madera estructural	16
2.3.1. Tracción paralela a la fibra	
2.3.2. Compresión paralela a la fibra	
2.3.3. Flexión	
2.3.4. Tracción perpendicular a la fibra	
2.3.5. Compresión perpendicular a la fibra	
2.3.6. Cortante	
2.3.7. Módulo de elasticidad	
2.3.8. Módulo de cortante	
2.4. Singularidades de la madera	19
2.4.1. Acebolladuras	

2.4.2. Bolsas de resina	
2.4.3. Deformación	
2.4.4. Fendas	
2.4.5. Nudos	
2.5. Descripción de las especies analizadas en el estudio	20
2.5.1. <i>Pinus pinaster</i> Ait.	
2.5.2. <i>Pinus sylvestris</i> L.	
2.5.3. <i>Populus x euramericana</i> cv. I-214	
2.5.4. <i>Quercus pyrenaica</i> Willd.	
2.6. Clasificación de madera aserrada y su actual normativa	26
2.7. Antecedentes sobre la aplicación del penetrómetro en madera	28
3. OBJETIVOS	32
3.1. Objetivo general	33
3.2. Objetivos específicos	33
4. MATERIAL Y MÉTODOS	34
4.1. Introducción	35
4.2. Equipo de trabajo	35
4.2.1. Probetas de madera aserrada	
4.2.2. Máquina universal de ensayo	
4.2.3. Pilodyn	
4.2.4. Calibre	
4.2.5. Balanza de precisión	
4.2.6. Estufa de secado	
4.3. Metodología empleada	41
4.3.1. Obtención del material de estudio	
4.3.2. Selección y numeración del material	
4.3.3. Medición de dimensiones y densidades	
4.3.4. Análisis de la humedad	
4.3.5. Determinación de la dureza por los métodos JANKA Y BRINELL	
4.3.6. Determinación de la dureza con penetrómetro	
4.3.7. Toma de datos, variables y análisis estadístico	
4.3.7.1. Estadística descriptiva	
4.3.7.2. Estadística comparativa	
4.3.7.3. Estadística predictiva	

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1. Estadística descriptiva	47
5.1.1. Penetración determinada mediante Pilodyn	47
5.1.2. Densidad	48
5.1.3. Humedad	49
5.1.4. Dureza JANKA	49
5.1.5. Dureza BRINELL	51
5.2. Estadística comparativa	52
5.2.1. Penetración	53
5.2.1.1. Análisis por especies en función de las secciones	
5.2.1.1.1. <i>Quercus pyrenaica</i>	
5.2.1.1.2. <i>Pinus pinaster</i>	
5.2.1.1.3. <i>Populus x euramericana</i> I-214	
5.2.1.1.4. <i>Pinus sylvestris</i>	
5.2.1.2. Análisis entre especies	
5.2.2. Densidad	61
5.2.3. Dureza	63
5.2.3.1. Dureza por especies	
5.2.3.1.1. Dureza JANKA	
5.2.3.1.2. Dureza BRINELL	
5.2.3.2. Dureza por especies en función de las secciones	
5.2.3.2.1. <i>Quercus pyrenaica</i> , Dureza JANKA	
5.2.3.2.2. <i>Quercus pyrenaica</i> , Dureza BRINELL	
5.2.3.2.3. <i>Pinus pinaster</i> , Dureza JANKA	
5.2.3.2.4. <i>Pinus pinaster</i> , Dureza BRINELL	
5.2.3.2.5. <i>Populus x euramericana</i> I-214, Dureza JANKA	
5.2.3.2.6. <i>Populus x euramericana</i> I-214, Dureza BRINELL	
5.2.3.2.7. <i>Pinus sylvestris</i> , Dureza JANKA	
5.2.3.2.8. <i>Pinus sylvestris</i> , Dureza BRINELL	
5.3. Regresiones	79
5.3.1. Regresiones por especies para la densidad en función de la penetración media	79
5.3.1.1. <i>Quercus pyrenaica</i>	
5.3.1.2. <i>Pinus pinaster</i>	
5.3.1.3. <i>Populus x euramericana</i> I-214	
5.3.1.4. <i>Pinus sylvestris</i>	

5.3.2. Regresiones para la densidad y penetración media	82
5.3.3. Regresiones por especies para la dureza media JANKA y dureza media BRINELL en función de la densidad	83
5.3.3.1. <i>Quercus pyrenaica</i>	
5.3.3.2. <i>Pinus pinaster</i>	
5.3.3.3. <i>Populus x euramericana I-214</i>	
5.3.3.4. <i>Pinus sylvestris</i>	
5.3.4. Regresiones para la dureza media JANKA en función de la densidad	88
5.3.5. Regresiones para la dureza media BRINELL en función de la densidad	89
5.3.6. Regresiones por especies para la dureza media JANKA en función de la penetración media	90
5.3.6.1. <i>Quercus pyrenaica</i>	
5.3.6.2. <i>Pinus pinaster</i>	
5.3.6.3. <i>Populus x euramericana I-214</i>	
5.3.6.4. <i>Pinus sylvestris</i>	
5.3.7. Regresiones para la dureza media JANKA en función de la penetración media	92
6. CONCLUSIONES	94
7. BIBLIOGRAFÍA	97
8. ANEXOS	100
8.1. Estadística comparativa	101
8.1.1. Penetración	101
8.1.1.1. Penetración por especies en función de las secciones	
8.1.1.2. Análisis entre especies	
8.1.2. Densidad	102
8.1.3. Dureza JANKA	103
8.1.3.1. Análisis por especies en función de las secciones	
8.1.3.2. Análisis entre especies	
8.1.4. Dureza BRINELL	104
8.1.4.1. Análisis por especies en función de las secciones	
8.1.4.2. Análisis entre especies	

8.2. Regresiones	106
8.2.1. Regresiones de densidad en función de la penetración media	106
8.2.2. Regresiones de dureza media JANKA en función de la densidad	108
8.2.3. Regresiones de dureza media BRINELL en función de la densidad	109
8.2.4. Regresiones de dureza media JANKA en función de la penetración media	111

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

Desde el principio de los tiempos se lleva usando la madera como material o materia prima para la fabricación de viviendas, estructuras, armas para la guerra y la caza, etc.

Atendiendo al libro más antiguo descubierto hasta el momento acerca de arquitectura (*De architectura*, Marco Vitrubio, s. I a.C.), datado de la época de la antigua Roma, no sorprende que este trate en gran medida sobre el uso estructural, cualidades, técnicas de construcción y composición de la madera.

Comienza a ser entonces uso de estudio y preocupación las afecciones que muestran las distintas técnicas de aserrado y poda de los árboles para la calidad de la madera, así como la presencia o no de agentes xilófagos.

La madera, a diferencia de otros materiales estructurales, posee una resistencia a la tensión superior a la resistencia a la compresión, una ligereza y la virtud de ser un material natural renovable lo que hace que actualmente la preocupación por identificar y cuantificar las resistencias de los materiales empleados en construcción sea mayor que en otros tiempos, lo que empuja a catalogar los distintos materiales según sus propiedades físico-mecánicas y derivar de esto sus posibles usos.

De esta manera cobra gran relevancia la identificación de las propiedades de las distintas especies de madera, cuantificar su idoneidad para determinados usos, la mejora o incremento de las propiedades intrínsecas de la propia madera.

Se analiza particularmente en este caso en concreto la identificación de las propiedades físicas de distintas especies de madera, siendo un componente fundamental por ser muy condicionantes a la hora del uso estructural de la madera. Se pretende hacer una estimación de la densidad mediante métodos no destructivos para de esta forma determinar su densidad en casos dificultosos como la madera puesta en obra o para determinar rápidamente la especie de la madera. Se correlacionan propiedades como la densidad y la dureza por distintos métodos y se relacionan estas variables con la penetración, fruto de los métodos no destructivos de la madera.

En este estudio se han analizado un total de 200 probetas de cuatro especies distintas, dos frondosas y dos coníferas, comprendiendo un amplio rango de densidades. Cada una de las probetas fue sometida a dos métodos distintos de dureza para cada sección:

- Dureza a carrera constante de 2 mm.
- Dureza a fuerza constante de 2 kN.

Posteriormente cada sección de cada probeta fue sometida a la penetración de la varilla metálica del penetrómetro Pilodyn para su estudio.

Como resultado, 800 mediciones en total con las que se realiza el análisis estadístico para la determinación de la densidad a partir de los resultados obtenidos con el penetrómetro.

Se buscará también las posibles relaciones entre los distintos tipos de dureza analizada y las penetraciones, así como la dureza con la densidad.

2. ANTECEDENTES

2.1 ANATOMÍA DE LA MADERA.

Se entiende por madera al conjunto de tejidos del xilema que forman el tronco, raíces y ramas de los vegetales leñosos, excluyendo de estos la corteza.

Macroscópicamente se estudia la madera por sus planos o secciones, teniendo de esta manera tres cortes bien diferenciados siendo:

- Transversal, perpendicular al eje de la rama o tronco.
- Radial, que pasa por el eje y un radio de la rama o tronco.
- Tangencial, paralela a un plano tangente al tronco, o al anillo de crecimiento.

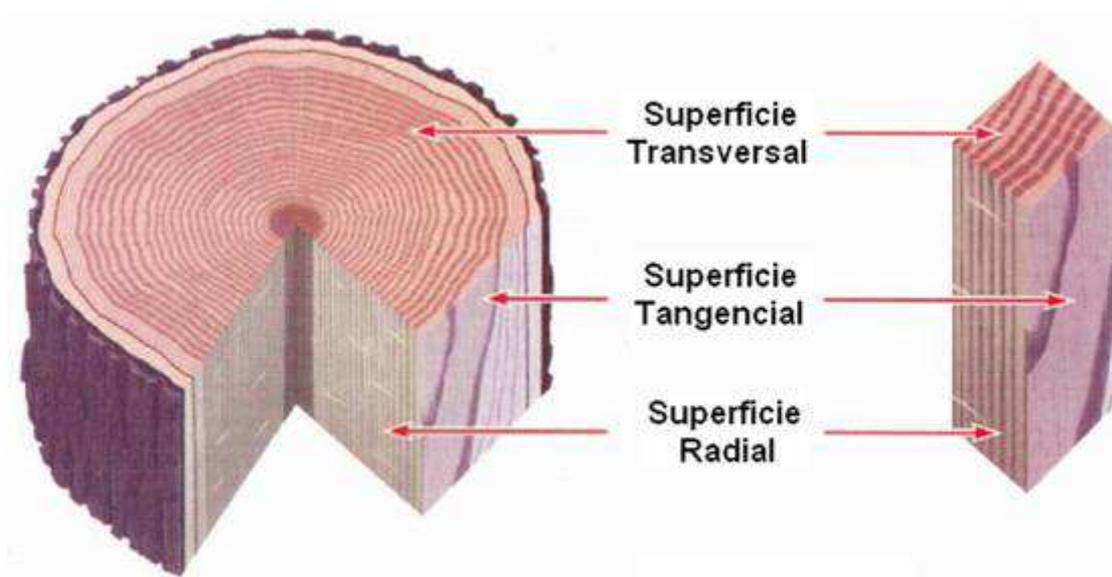


Figura 2.1. Planos anatómicos del corte. (Fuente: <http://www.monografias.com>).

La madera del árbol vivo se caracteriza por presentar las siguientes partes:

- **Cámbium:**
Tejido generatriz ubicado entre la corteza interna y el sámbago, produce la corteza hacia afuera y la madera hacia adentro. Si se daña al cámbium, la parte afectada muere.
- **Sámbago o jane:**
Parte viva de la madera generalmente de color claro, está situada entre el cámbium y el duramen. Su contenido de humedad es mayor que el del duramen pero, seca más rápidamente que éste.

- Duramen:

Parte interna del tronco compuesta por tejido muerto. Por lo general, esta madera es más oscura que la albura y su delimitación no siempre está bien definida.

- Albura:

Se encuentra en la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en período de crecimiento (zona viva). Contiene mucha savia y materias orgánicas. De coloración más clara que el duramen, más porosa y más ligera, con mayor riesgo frente a los ataques bióticos.

- Médula

Es el núcleo central de un tronco. La madera cercana a la médula tiende a secar con más defectos que el resto del leño.

- Anillos de crecimiento:

Se pueden observar en la sección transversal del tronco. Están formados por capas de madera creadas por el crecimiento anual del árbol que procede del cambium, situado en la parte exterior del tronco, produciendo el engrosamiento del mismo. Constan de dos zonas claramente diferenciadas: una formada en primavera (madera de primavera), con vasos de paredes delgadas, tejido poroso y que tienen una función de conducción; y otra formada en otoño (madera de otoño), con pared celular más gruesa, tejidos más densos y que tienen una función de estabilidad y solidez.

- Liber:

Parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. Madera embrionaria viva.

- Corteza:

Capa exterior del tronco. Tejido impermeable que recubre el liber y protege al árbol.

- Radios leñosos:

Bandas o láminas delgadas de un tejido, cuyas células se desarrollan en dirección radial, o sea, perpendicular a los anillos de crecimiento. Ejercen una función de trabazón. Almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente (igual que las células de parénquima). Contribuyen a que la deformación de la madera sea menor en dirección radial que en la tangencial. Son más blandos que el resto de la masa leñosa. Por ello constituyen las zonas de rotura a comprensión, cuando se ejerce el esfuerzo paralelamente a las fibras.

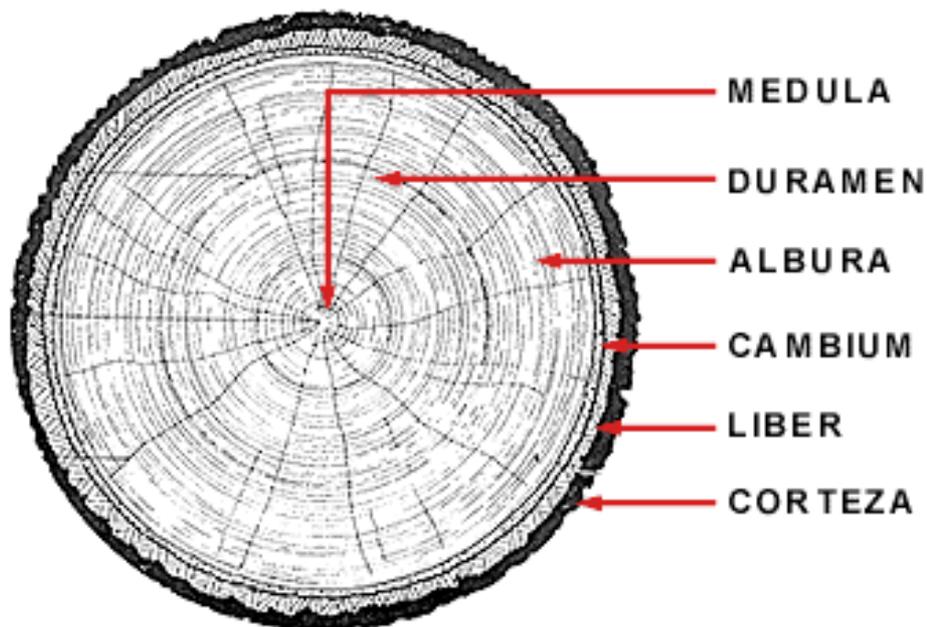


Figura 2.2. Anatomía de la madera. (Fuente: secadodemadera.blogspot.com).

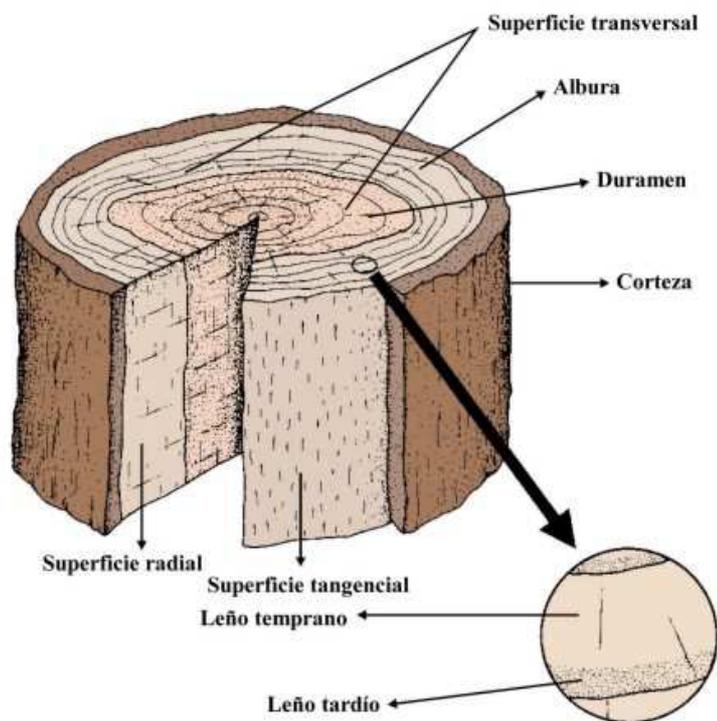


Figura 2.3. Representación de la albura y el duramen. (Fuente: secadodemadera.blogspot.com).

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA.

- 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 con una sucesión de pesadas, esta definición resulta equivalente si se utiliza el peso en lugar de la masa.

$$H = \frac{(Ph - Po)}{Po} \times 100$$

Donde:

H: contenido de humedad de la probeta (%).

Ph: peso húmedo de la probeta (g).

Po: peso anhidro de la probeta (g).

- Higroscopicidad:

La madera es un material muy higroscópico que tiende a absorber o perder agua según las condiciones del ambiente (humedad relativa y temperatura del aire). De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamándose de esta manera humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

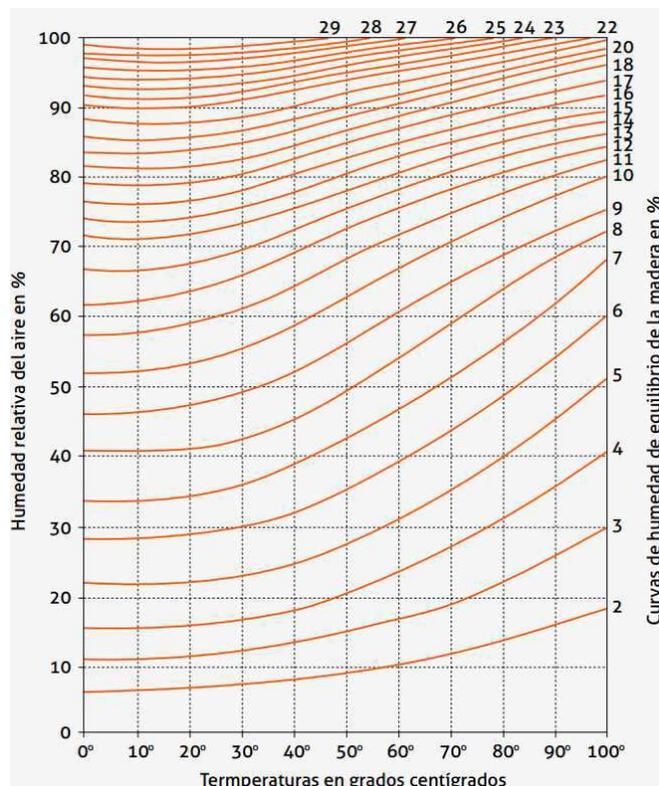


Figura 2.4. Tabla de equilibrios higroscópicos de la madera. (Fuente: <http://blog.expertosenparquet.com>).

- Hinchazón y merma de la madera:

La variación del contenido de humedad produce en la madera una variación a su vez de sus dimensiones directamente proporcional, así, si aumenta la humedad, la madera se “carga” de agua y se produce un aumento de su volumen, ocurriendo lo contrario en el caso de disminución de la humedad.

Para evaluar las contracciones y mermas en la madera se han desarrollado unos coeficientes para cuantificarlo y normalizarlo: UNE 56.533- “Características físico-químicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica”.

- Densidad:

La densidad de la madera se define como la relación entre la masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad. Generalmente el contenido de humedad de referencia es el 12 %.

Para la realización del ensayo, se han de seguir las especificaciones mostradas en la norma UNE 56.531- “Características físico-químicas de la madera. Determinación del peso específico”.

De esta manera, la densidad de la madera abarca unos valores comprendidos entre 300 kg/m³ para la madera de balsa y 1.200 kg/m³ para maderas pesadas.

Las coníferas más utilizadas en la construcción tienen una densidad de 400-550 kg/m³ mientras que las frondosas entre 600-700 Kg/m³.

Para la clasificación de las maderas en función de su densidad, se atiende a la norma UNE 56.540- “Características físico-químicas de la madera. Interpretación de los resultados de ensayo”.

Tabla 2.1. Clasificación de las maderas según su densidad (Kg/m³), UNE 56.540. (Fuente: AITIM).

MADERA	CONÍFERAS	FRONDOSAS
Muy Ligera	<400	<350
Ligera	400-490	350-500
Semipesada	500-590	510-700
Pesada	600-700	750-950
Muy pesada	>700	>950

La densidad es un índice de calidad de la madera que influye de forma muy directa en casi la totalidad de características físicas y mecánicas y, por tanto, es muy importante su conocimiento.

Cabe señalar que una disminución en la dureza superficial y en la fuerza de compresión está relacionada con el grado de pérdida de densidad (Gunduz et. al. 2009).

- Dureza:

Consiste en la resistencia que opone la madera a la penetración de cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos, etc.

Esta propiedad está estrechamente relacionada con la densidad, de tal manera que las maderas más duras son las que poseen mayor densidad, también influye la humedad, siendo las maderas con mayor cantidad de humedad más fácilmente penetrables y por tanto resultando menos duras (AITIM).

- Ensayos de dureza:

Existe una gran variedad de métodos de ensayo debido a las diferencias de dureza entre los diferentes materiales. Se pueden dividir en tres grupos diferentes, por rayado, por penetración y por rebote. Para medir la dureza por penetración, que es la que nos interesa, existen varios ensayos dependiendo del indentador utilizado: el método BRINELL, Rockwell, Vickers, Knoop, JANKA, Monnin o Chalais Meudon... Para medir la dureza de la madera, los ensayos más utilizados son el BRINELL, JANKA o Monnin (Holmberg 2000), destacando el primero por la normalización de sus resultados (norma UNE 56-534-77).

- Ensayo BRINELL:

Este ensayo es ampliamente utilizado para probar materiales de baja o media dureza. Fue introducido por J.A. Brinell en 1900. En este ensayo se presiona una bola de acero endurecido (o carburo cementado) de 10 mm de diámetro contra la superficie de un espécimen usando una carga que varía según la densidad de la madera (10 kp para densidades menores de 0,3 g/cm³; 50 kp para densidades comprendidas entre 0,3 y 0,7 g/cm³; y 100 kp para densidades superiores a 0,7g/cm³) (Vignote 2006). La carga máxima debe alcanzarse en 15 segundos, permanecer constante durante 30 segundos y volver a 0 en otros 15 segundos. Se divide la carga P entre el área de indentación S para obtener el valor de la dureza:

$$Dureza = \frac{P}{S} \text{ (Kp/mm}^2\text{)}$$

Por tanto, si se llama D_i al diámetro de la huella, la fórmula anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$HB = \frac{2P}{(\pi Db)(Db - \sqrt{Db^2 - Di^2})}$$

Donde:

HB = dureza BRINELL.

P = carga de indentación (Kg).

D_b = diámetro de la bola (mm).

D_i = diámetro de indentación sobre la superficie (mm) (Groover 1997).

Atendiendo a la norma UNE 56-534-77, se ha de aplicar con una máquina de ensayo, de forma continua y a velocidad constante una carga de hasta 200 Kg con un cabezal de 30 cm de diámetro. Colocando las probetas de forma que el eje de la probeta y el del cabezal queden perpendiculares y aplicar una carga de 100 Kg por cm de anchura durante 5 segundos. En caso de maderas muy blandas se aplica una carga de 50 Kg por cm de anchura y se multiplica por dos la flecha obtenida.

En función de los resultados obtenidos, se hace una clasificación de la madera, tal y como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Clasificación de la madera según la dureza, método BRINELL.
(Fuente: AITIM).

Clasificación	Dureza BRINELL (Kp/mm ²)
Muy blanda	<1
Blanda	1-2
Semidura	2-4
Dura	4-8
Muy dura	>8

▪ Ensayo JANKA:

Es un ensayo modificado del anterior en el que la dureza se expresa en kp/mm² o N/mm² de carga que es necesaria para hacer penetrar en la madera un cabezal de 30 cm de diámetro. A diferencia del anterior, se realiza para una flecha.

• Anisotropía:

Comportamiento diferente en las tres direcciones del espacio (longitudinal, radial y transversal), respecto a las presiones y fuerzas a que se vea sometida.

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA ESTRUCTURAL.

La orientación de las fibras que componen la madera dan lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales utilizados en estructuras como el acero y el hormigón. Las resistencias y módulos de

elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

- Tracción paralela a la fibra:

La resistencia a tracción paralela a la fibra es elevada. En la madera clasificada, los valores característicos oscilan entre 8 y 18 N/mm². Como ejemplo de piezas solicitadas a este esfuerzo se encuentran, principalmente, los tirantes y los pendolones de las cerchas.

- Compresión paralela a la fibra:

Su resistencia a compresión paralela a la fibra es elevada, alcanzando valores característicos en la madera clasificada de 16 a 23 N/mm². En el cálculo de los elementos comprimidos se ha de realizar la comprobación de la inestabilidad de la pieza (pandeo), en el que influye decisivamente el módulo de elasticidad. El valor relativamente bajo de este módulo reduce en la práctica la resistencia a la compresión en piezas esbeltas.

Esta propiedad resulta importante en una gran cantidad de tipos de piezas, como pilares, montantes de muros entramados, pares de cubierta, etc.

- Flexión:

Su resistencia a flexión es muy elevada, sobre todo comparada con su densidad. Sus valores característicos para las coníferas, que se utilizan habitualmente en estructuras, varían entre 14 y 30 N/mm². En madera es preciso hablar de una resistencia a la flexión, aunque esté formada por la combinación de una tracción y una compresión, ya que el comportamiento mecánico de estas dos propiedades es diferente, y por tanto resulta más práctico referirse al efecto conjunto de ambas en el caso de flexión.

Esta propiedad es importante en piezas tales como vigas, viguetas de forjado, pares de cubierta, etc.

- Tracción perpendicular a la fibra:

Su resistencia a la tracción perpendicular a la fibra es muy baja (del orden de 30 a 70 veces menos que en la dirección paralela). Su valor característico es de 0,3 a 0,4 N/mm².

En la práctica y aplicado a las estructuras, esta sollicitación resulta crítica en piezas especiales de directriz curva (arcos, vigas curvas, etcétera) o en zonas de cambio brusco de directriz (zonas de vértice). Estas tensiones de tracción, también se pueden producir como consecuencia de la coacción del libre movimiento transversal de la madera en soluciones constructivas incorrectas, que pueden ser evitadas fácilmente con el conocimiento del material.

- Compresión perpendicular a la fibra:

Su resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la de la dirección paralela. Sus valores característicos varían entre 4,3 y 5,7 N/mm², lo que representa la cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra.

Este tipo de esfuerzo es característico de las zonas de apoyo de las vigas, donde se concentra toda la carga en pequeñas superficies que deben ser capaces de transmitir la reacción sin sufrir deformaciones importantes o aplastamiento.

- Cortante:

El esfuerzo cortante origina tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos:

- Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.
- Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.
- Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras.

En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento. Sus valores característicos (por deslizamiento) varían entre 1,7 y 3,0 N/mm² en las especies y calidades utilizadas habitualmente en la construcción.

Las tensiones tangenciales por rodadura de fibras sólo se producen en casos muy concretos, como son las uniones encoladas entre el alma y el ala de una vigueta con sección en doble T. El valor de la resistencia por rodadura es del orden del 20 al 30% de la resistencia por deslizamiento.

- Módulo de elasticidad:

En la madera, debido a su anisotropía, el módulo de elasticidad en dirección paralela a la fibra adopta valores diferentes según se trate de sollicitaciones de compresión o de tracción. En la práctica se utiliza un único valor del módulo de elasticidad para la dirección paralela a la fibra. Su valor varía entre 7.000 y 12.000 N/mm² dependiendo de la calidad de la madera. En la dirección perpendicular a la fibra se toma, análogamente, un único módulo de elasticidad, cuyo valor es 30 veces inferior al paralelo a la fibra.

- Módulo de cortante:

En la madera también existe un módulo de cortante ligado a los esfuerzos cortantes. Su valor es 16 veces inferior al módulo de elasticidad paralelo a la fibra.

2.4 SINGULARIDADES DE LA MADERA.

Son alteraciones que se han producido durante el crecimiento del árbol, afectando de esta manera la gran mayoría a las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Las más importantes y habituales son:

- Acebolladuras:

Son roturas locales de la madera, producidas entre anillos de crecimiento y a lo largo del eje del árbol, causadas por la coincidencia de esfuerzos que inciden sobre la madera que ha crecido de forma irregular (sequía, defoliación...). (Vignote 2006).

- Bolsas de resina:

Huecos llenos de resina en el cambium de algunas coníferas. Suelen abarcar la línea de un anillo. Esta singularidad es exclusiva de madera de coníferas.

- Deformación:

Se trata de un defecto de secado. La madera después de haber sido trabajada puede sufrir diversas deformaciones durante el proceso de secado, debido a la lógica pérdida de humedad en sus fibras. Los efectos son diferentes si se trata de tablas, vigas o bien soportes de sección circular.

- Fendas:

Roturas locales de la madera, producidas por cuadratura, viento, heladura o un defecto en el secado, se clasifican según planos de corte que incluyen la dirección radial y la del eje del árbol, causadas por esfuerzos superiores a los valores de resistencia de esa madera. (Vignote 2006).

- Nudos:

Los nudos son las ramas del árbol, no es en sí un defecto pero modifican las características de la madera, tanto en su aspecto, en su resistencia como en su trabajabilidad. Los nudos se pueden clasificar por su estado, por su tamaño, por su forma, por el agrupamiento de los nudos o por la posición que ocupen (nudo de cara, nudo de canto, nudo de arista o nudo de testa). (Vignote 2006).

2.5 DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES ANALIZADAS EN EL ESTUDIO.

2.5.1 *Pinus pinaster* Ait..

- Taxonomía:

Reino: *Plantae*

División: *Pinophyta*

Clase: *Pinopsida*

Orden: *Pinales*

Familia: *Pinaceae*

Género: *Pinus*

Subgénero: *Pinus*

Especie: *Pinus pinaster* Ait.

- Procedencia y disponibilidad:

Se encuentra en casi todos los países que bordean la zona occidental del mar Mediterráneo (Argelia, Marruecos, España, Francia, Italia, Portugal y Grecia). En España se encuentra en casi todas las provincias, pero generalmente su distribución más frecuente está en Galicia, sierras de Guadarrama, Gredos, Cazorla, Segura y Alcaraz.

Existen dos subespecies, la subespecie atlántica Huget de Villar y la subespecie mesogeensis o mediterránea. La primera crece en Galicia (Pino Gallego) y la segunda en el resto de la Península (Pino negro).

Sus masas forestales, su producción y exportación son importantes.

- Descripción de la madera:

El color de la madera de albura es blanco y 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. El grano varía de medio a basto o grueso.

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

- Propiedades físicas: (AITIM)

Densidad: 530-550 kg/m³

Contracción: Medianamente nerviosa

Coefficientes de contracción: Total (unitario)

Tabla 2.3. Propiedades físicas del *P. pinaster*. (Fuente: AITIM).

Volumétrica	14,5%	(0,45)
Tangencial	7,6%	(0,25)
Radial	4,1 %	(0,14)
Dureza	2,7	Semidura

- Propiedades mecánicas: (AITIM)

Madera libre de defectos:

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del *P. pinaster*. (Fuente: AITIM).

Flexión estática	78 N/mm ²
Módulo elasticidad	7.230 N/mm ²
Compresión axial	39 N/mm ²
Compresión perpendicular	6,0 N/mm ²
Cortante	9 N/mm ²
Flexión dinámica	3,0 J/cm ²

- Aplicaciones:

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

2.5.2 *Pinus sylvestris* L..

- Taxonomía:

Reino: *Plantae*

División: *Pinophyta*

Clase: *Pinopsida*

Orden: *Pinales*

Familia: *Pinaceae*

Género: *Pinus*

Subgénero: *Pinus*

Especie: *Pinus sylvestris* L.

- Procedencia y disponibilidad:

El pino silvestre es un árbol muy común en el Hemisferio Norte, extendiéndose por Eurasia en regiones relativamente frías. Se distribuye desde Escocia y España por el oeste hasta Siberia y las montañas del Cáucaso por el este, y desde Laponia por el norte hasta Sierra Nevada (España) por el sur. En el norte de su distribución se expande desde el nivel del mar hasta los 1.000 m, mientras que en el sur se desarrolla en montañas en altitudes comprendidas entre los 800 y los 2.400 m.

El pino silvestre se encuentra cultivado ampliamente en Nueva Zelanda y en muchas de las regiones más frías de Norteamérica. Se encuentra catalogado como una especie invasora en algunas zonas norteamericanas, en la que se incluye Ontario y Wisconsin.

- Descripción de la madera:

El color de la madera de albura es amarillo pálido y el del duramen rojizo. La diferencia entre ambas zonas es más acusada en la sección transversal en las que se aprecian sus tonalidades diferentes. Los anillos de crecimiento están muy marcados en la madera de verano y tienen un espesor de 1,5 a 3 mm.

La fibra es recta. El grano varía de medio a fino.

La madera presenta canales resiníferos. Puede producir alergias en las mucosas.

- Propiedades físicas: (AITIM)

Densidad: 500-540 kg/m³

Contracción: Poco nerviosa

Coefficientes de contracción: Total (unitario)

Tabla 2.5. Propiedades físicas del *P. sylvestris*. (Fuente: AITIM).

	España		Resto	
Volumétrica	12,9%	(0,34)	12-15%	(0,35-0,50)
Tangencial	6,8%	(0,21)	-	(0,20-0,35)
Radial	3,8 %	(0,12)	-	(0,11-0,20)
Dureza	2,0	Semidura		

- Propiedades mecánicas: (AITIM)

Madera libre de defectos:

Tabla 2.6. Propiedades mecánicas del *P. sylvestris*. (Fuente: AITIM).

	España	Resto
Flexión estática	90-110	79-100 N/mm ²
Módulo elasticidad	8.600-10.000	10.800-13.000 N/mm ²
Compresión axial	42-47	45-55 N/mm ²
Compresión perpendicular	9,2	- N/mm ²
Cortante	10-11	7,2-11,2 N/mm ²
Flexión dinámica	2,25	4,0-7,0 J/cm ²

- Aplicaciones:

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

2.5.3 *Populus x euramericana* cv. I-214.

- Taxonomía:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Malpighiales*

Familia: *Salicaceae*

Género: *Populus*

Sección: *Populus*

Especie: *Populus x euramericana* cv. I-214

- Procedencia y disponibilidad:

Es la especie básica de la populicultura europea y española. Crece muy bien el área mediterránea (PADRÓ, 1992). El híbrido en cuestión fue creado en el Instituto de Casale Monferrato en 1929 y comenzó a extenderse por Italia tras la II Guerra Mundial.

El 90% de las choperas de Castilla y León lo utiliza, y así mismo muy extendido por toda la Península e Italia. Las zonas de mayor uso de esta especie son la cuenca del río Duero, zona del valle del Ebro y Cataluña y en las cuencas de los ríos Genil y Darro (Granada).

La creciente demanda de productos derivados de la madera en la CEE (la 2ª inmediatamente después de la demanda de productos energéticos) hace de las plantaciones de chopos una alternativa a los cultivos agrícolas excedentarios o al abandono de tierras (GRAU et al., 1996), aportando una producción de madera de alto valor económico, contribuyendo a la captura de carbono procedente de la contaminación atmosférica y a la estabilización del empleo rural (JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN, 2001).

- Descripción de la madera:

El color de la madera es amarillo pálido o blanco amarillo, aunque a veces su tonalidad puede variar. La madera de albura no se distingue de la del duramen. Los anillos anuales de crecimiento son visibles.

La fibra es recta. El grano es fino.

- Propiedades físicas: (AITIM)

Densidad: 420-480 kg/m³

Contracción: Medianamente nerviosa

Coefficientes de contracción: Total (unitario)

Tabla 2.7. Propiedades físicas del *P. x euramericana*. (Fuente: AITIM).

Volumétrica	14,3%	(0,49)
Tangencial	7,4%	(0,25-0,32)
Radial	2,8 %	(0,12-0,20)
Dureza	2,6	Blanda

- Propiedades mecánicas: (AITIM)

Madera libre de defectos:

Tabla 2.8. Propiedades mecánicas del *P. x euramericana*. (Fuente: AITIM).

Flexión estática	54-86,5 N/mm ²
Módulo elasticidad	8.100-9.600 N/mm ²
Compresión axial	29-37 N/mm ²
Compresión perpendicular	7,8 N/mm ²
Cortante	5,0-7,0 N/mm ²
Flexión dinámica	3,8-4,9 J/cm ²

- Aplicaciones:

Envases y embalajes destinados para contener alimentos, tableros de contrachapado, pasta de papel, interiores de muebles, palillos, cerillas, instrumentos musicales, lana de madera para embalajes especiales.

2.5.4 *Quercus pyrenaica* Willd..

- Taxonomía:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Fagales*

Familia: *Fagaceae*

Género: *Quercus*

Sección: *Mesobalanus*

Especie: *Quercus pyrenaica* Willd.

- Procedencia y disponibilidad:

Es una especie de distribución mediterráneo-occidental que se extiende por gran parte del suroeste de Francia, alcanzando Bretaña, Península Ibérica y noroeste de Marruecos, habiéndose citado también al norte de Italia (Ceballos y Ruíz de la Torre, 1979; Mesón, 1982; Mesón, 1983; Amaral, 1990; Carvalho et al., 2005; Díaz-Maroto et al., 2006).

En España ocupa una superficie de unas 660.000 ha, encontrándose distribuida en muchas provincias de norte a sur del país, sobre todo en el norte y centro occidental. Se distribuye esencialmente por las provincias de León, Cáceres, Salamanca, Zamora, Soria, Burgos, Palencia y Ourense (Díaz-Maroto et al., 2006).

- Descripción de la madera:

El color de la madera de duramen varía del marrón-amarillo claro al marrón y el de la albura es un poco más claro. La madera de albura está claramente diferenciada. Los anillos de crecimiento son visibles y están muy marcados. En el despiece radial aparecen los radios leñosos, anchos y en forma de grandes espejuelos, característicos de la madera de roble, y en la sección tangencial aparecen líneas verticales con un color algo más oscuro que el resto de la madera.

La fibra es recta. El grano es muy fino.

- Propiedades físicas: (AITIM)

Densidad: 670-780 kg/m³

Contracción: Medianamente nerviosa

Coefficientes de contracción: Total (unitario)

Tabla 2.9. Propiedades físicas del *Q. pyrenaica*. (Fuente: AITIM).

Volumétrica	11,9-14,5%	(0,40-0,49)
Tangencial	6,9-10,5%	(0,23-0,35)
Radial	3,9-4,7 %	(0,11-0,22)
Dureza	3,5-4,4	Semidura

- Propiedades mecánicas:

Madera libre de defectos:

Tabla 2.10. Propiedades mecánicas del *Q. pyrenaica*. (Fuente: AITIM).

Flexión estática	86-138 N/mm ²
Módulo elasticidad	10.500-14.500 N/mm ²
Compresión axial	52-64 N/mm ²
Compresión perpendicular	12 N/mm ²
Cortante	9,3-11,5 N/mm ²
Flexión dinámica	5,0-7,4 J/cm ²

- Aplicaciones:

Madera de alta calidad, utilizada para leña y carbón debido a su alto poder calorífico.

Madera resistente a la descomposición, por lo que se usa para muebles, barcos, barriles (considerada la mejor madera para las bebidas alcohólicas), traviesas de ferrocarril, postes telefónicos, (aunque otros robles dan una madera más recta y uniforme), herramientas del campo.

Su corteza contiene gran cantidad de taninos, por lo que se utiliza para tintes y el curtido de pieles.

Sus cecidias o agallas se usan para prender fuego, tintes, y en la piel son astringentes (cicatrizante, antihemorrágica e inflamatoria).

Las bellotas se utilizan como comida para el ganado en otoño e invierno.

Debido a sus taninos resultan tóxicas para las personas, por lo que deben ser hervidas para ser comidas, hacer harina, o como sustituto del café.

2.6 CLASIFICACIÓN DE MADERA ASERRADA Y SU ACTUAL 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).

Entendemos por madera aserrada estructural, aquella madera clasificada específicamente para uso estructural, cuya especie y origen tiene sus propiedades mecánicas determinadas por ensayo normalizado.

La norma que desarrolla la asignación de clases de calidad a clases resistentes es la UNE-EN 338:2003, "Madera estructural. Clases resistentes." Esta norma establece un sistema de clases resistentes mediante la agrupación de calidades y especies que tengan niveles de resistencia similares, de forma que puedan ser intercambiables, facilitándose así los cálculos y diseños de las estructuras de madera. Esto permite al calculista prescribir una clase resistente determinada y utilizar los valores característicos de dicha clase para el diseño y el cálculo.

Este sistema de clases resistentes ofrece las siguientes ventajas:

- Posibilidad de incorporar al sistema, especies o calidades complementarias en cualquier momento, sin que se vean afectadas las especificaciones ya existentes en la madera estructural.
- No hay necesidad de que el calculista conozca, en el momento de efectuar los cálculos, el coste y disponibilidad de las diferentes especies y posibles calidades, bastaría utilizar para el cálculo los valores característicos resistentes de una clase concreta y especificar dicha clase.
- Oportunidad de ofrecer productos que satisfagan con mayor eficacia las especificaciones.

La norma aplicable a todas las frondosas y resinosas de uso estructural, indica para cada clase los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez, valores de densidad y criterios de clasificación de las poblaciones de madera.

La nomenclatura de las clases resistentes incluye un número que expresa el valor mínimo de la resistencia a flexión (N/mm²) y una letra indicativa del tipo de especie. Para las coníferas y el chopo se utiliza la letra C y para las frondosas la letra D. Para las coníferas y el chopo se identifican un total de 12 clases resistentes (C14 a la C50) y para las frondosas se distinguen un total de 6 clases (D30 a la D70).

La determinación de la resistencia se realiza por medio de ensayos normalizados determinando las siguientes propiedades:

- Valor característico de la resistencia a flexión.
- Valor medio del módulo de elasticidad a flexión.
- Valor característico de la densidad.

En particular, es de especial interés la determinación de la densidad.

Los ensayos de densidad y contenido de humedad se han efectuado conforme a las normas europeas UNE-EN 408:2004 y UNE-EN 13183:2002; err 2003; Ac 2004.

En lo relativo a los métodos no destructivos en la clasificación de la madera, actualmente para el uso del penetrómetro (Pidolyn) como método no destructivo de la madera no se encuentra vigente ninguna norma que lo normalice.

2.7 ANTECEDENTES SOBRE LA APLICACIÓN DEL PENETRÓMETRO EN MADERA.

El primer y más inmediato antecedente conocido del penetrómetro es el punzón, utilizado por los técnicos para evaluar el estado superficial de las piezas de madera.

Pero no es el único, la valoración de la dureza de la madera se basa en la profundidad de la huella generada por un cilindro o una esfera aplicados sobre la superficie de la pieza (su cara radial para ser más exactos), con una carga determinada, esta metodología sugiere ciertas similitudes con el penetrómetro.

El Pilodyn se desarrolló originalmente en Suiza para la evaluación del grado de deterioro de los postes de madera de líneas telefónicas. Las primeras referencias de investigación con este equipo son del año 1978, y en los últimos 30 años, las aplicaciones han ido en aumento (Hoffmeyer, 1978), siendo las más extendidas las relacionadas con la silvicultura y explotación forestal, la evaluación y clasificación de árboles en pie y trozas, el diagnóstico precoz de enfermedades y patologías en el arbolado, las variaciones genéticas o provocadas por la estación (clima, altitud, suelo, etc) en una determinada especie (López, 1995; Wu, 2010), así como la estimación de densidad y la clasificación de maderas.

Encontramos aplicaciones a tableros derivados de la madera (Schmidt, 1988), aunque su aplicación práctica profesional en este campo sigue siendo aún muy limitada. En lo que a trabajos de inspección y control en edificios se refiere, la caracterización de madera sana y la evaluación de patologías, son las propiedades que más interesan en el ámbito de la evaluación de madera estructural, de esto que encontremos aplicaciones en el diagnóstico de patologías en madera de construcción, sobre todo postes, traviesas, cercados y elementos estructurales (Watt 1996, Iñiguez *et al.*, 2006, Bobadilla *et al.*, 2009), como los realizados en la evaluación del estado de las traviesas y cerchas en la iglesia de San Juan Bautista, en Villalón (Basterra L. A. *et al* 2013).

Se han realizado diversos estudios en los que se llega a la conclusión de que la humedad influencia altamente en la profundidad con la que incide la varilla del penetrómetro en la madera, siendo en el punto de saturación de las fibras el punto límite de influencia, obteniéndose valores de hasta 0,2 mm de penetración añadida por cada gramo de humedad absorbido (Smith, S *et al.* 1986), siendo esta técnica mucho más objetiva que la utilización del punzón.

En cuanto a las limitaciones de esta técnica, se encuentran entre otras, que se trata de una medida muy local y superficial, que no afecta a más de 0,25 cm² de superficie y unos 40 mm de profundidad máxima. Dados estas superficies de estudio tan pequeñas, es muy probable que se obtengan valores que difieran en varias cifras tratándose del mismo material al variar de las zonas de medida, tornando estas

variaciones a notables en el caso del uso de madera maciza. Para evitar precisamente los errores sistemáticos referentes a esta causa, se hacen varias repeticiones de la medida (cada metro de pieza por ejemplo), y evitando zonas particulares como los nudos y su zona de influencia, fendas, bolsas de resina o entrecasco visibles, zonas con patologías si vamos a estimar la densidad, etc. En el caso de la madera aserrada, se ha de calcular el valor de penetración medio radial y tangencial, por lo que en realidad se realizan dos medidas por zona de testeo. Generalmente, si se trata de madera estructural, en una misma cara de la pieza se pueden encontrar las dos orientaciones.

Otra limitación, en esta ocasión común a todos los métodos no destructivos aplicados en madera, es la variabilidad del material a la que acabamos de referirnos, que conduce generalmente a coeficientes de determinación bajos (0,5 – 0,6) si los comparamos con la aplicación de técnicas no destructivas en otros ámbitos. Este inconveniente no existe generalmente en los tableros derivados de la madera, mucho más homogéneos. En este sentido, lo más recomendable es que la muestra de datos sea lo mayor posible, y mejor aún si incluye diferentes especies, tipos o clases, ya que esto permite en muchas ocasiones la inclusión, en los modelos estadísticos, de variables cualitativas por especie, clase o tipo de producto, que mejoran sensiblemente el ajuste de los modelos (Bobadilla *et al*, 2009).

En cuanto a las ventajas, destaca su utilización por ser un método económico en las estimaciones de deterioro o degradación física o biológica de la madera, su densidad y clasificación, su fácil manejo y la fiabilidad que aportan sus mediciones especialmente acompañadas de métodos más globales como los métodos acústicos.

Se realizaron estudios con especies nacionales de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* donde no se obtuvieron unos resultados de elevada calidad en la comparación de las estimaciones de densidad y nivel de penetración con penetrómetro Pilodyn (Bobadilla *et al*, 2007). Los valores 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 (9 - 11%) (Bobadilla *et al*, 2007). A pesar de contar con un amplio conjunto muestral, 395 probetas. En la parte del estudio del pino radiata 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). Tras la ampliación del estudio se determinó con una R^2 de 0,63 la ausencia de diferencias entre secciones radial y tangencial. De esta ampliación del estudio se obtuvieron los resultados reflejados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Valores medios de penetración del Pilodyn 6J en madera de conífera aserrada al 12% de humedad. (Fuente: Bobadilla *et al.*, 2009).

Especie	Penetración					
	Tangencial	Radial	Media	Máxima	Mínima	C.V. (%)
<i>P. radiata</i>	9,7	10,4	10,1	18	6	15
<i>P. sylvestris</i>	10,7	10,9	10,8	20	6	18,3
<i>P. nigra</i>	9,5	9,7	9,6	17	5	22,6
<i>P. pinaster</i>	8,5	8,3	8,4	15	5	24,1

Un estudio parecido, en este caso sobre *Pinus pinaster*, demostró que la densidad de la madera y el nivel de penetración con penetrómetro Pilodyn, presentan una correlación aceptable ($R^2 = 0,73$), lo que indica la idoneidad del método como medio estimativo de la densidad (Notivol *et al.*, 2008).

Otro ensayo realizado sobre madera aserrada consistió en el análisis de 150 muestras de *Pinus 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).

Más recientemente, destaca el estudio de capacidad de predicción de la densidad de la madera mediante penetrómetro Pilodyn 6J, estudiándose un total de 720 muestras de 18 especies (7 frondosas de climas templados, 6 frondosas de climas tropicales y 5 coníferas) para las distintas secciones, se llegó a la conclusión de que la penetración en coníferas era mayor con una diferencia del 27 % y en estas especies, la penetración tangencial era mayor que la radial. Se obtuvo para las especies *Pinus pinaster* y *Populus x euramericana* I-214 los valores reflejados en las Tablas 2.12., 2.13. y 2.14.

Tabla 2.12. Estadística descriptiva para *P. x euramericana* I-214 y *P. pinaster*. (Fuente: Cañas I. 2013).

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Populus x euroamericana</i>	40	12,813	12,77%	16	10
<i>Pinus pinaster</i>	40	16,563	8,71%	19	14

Tabla 2.13. Estadística descriptiva para *P. x euramericana* I-214 y *P. pinaster*, sección radial. (Fuente: Cañas I. 2013).

Especie	Sección				
	Radial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Populus x euroamericana</i>	20	12,375	14,05%	16	10
<i>P. pinaster</i>	20	15,9	7,33%	18,5	14,5

Tabla 2.14. Estadística descriptiva para *P. x euramericana* I-214 y *P. pinaster*, sección tangencial. (Fuente: Cañas I. 2013).

Especie	Sección				
	Tangencial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Populus x euroamericana</i>	28	13,25	10,85%	16	10,5
<i>P. pinaster</i>	20	17,225	8,18%	19	14

Se determinó la densidad a partir de la penetración con una las R^2 superior al 74%, así como un coeficiente de determinación medio superior al 86% (Cañas I. 2013).

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

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general del proyecto es estimar la densidad de cada una de las especies objeto de ensayo mediante el empleo del penetrómetro Pilodyn.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

Determinar la variación y dependencia de los valores de la penetración en función de la densidad.

Comparar las distintas especies para los valores de penetración en función de la densidad.

Determinar el grado de relación e influencia de la densidad en la dureza por dos métodos distintos de ensayo.

Comparar los dos tipos de ensayos de dureza JANKA y BRINELL para el conjunto de la muestra.

Determinar el grado de relación e influencia de la dureza determinada por dos métodos distintos de ensayo y la penetración.

Definir una función de predicción de la densidad de la madera en función de la penetración, que podría utilizarse como método de diagnóstico en madera puesta en obra para estimar el grado de daño de una estructura de madera.

Modelizar la influencia de la dureza por dos métodos distintos de ensayo y la penetración.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 INTRODUCCIÓN:

En el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, Universidad de Valladolid, se procedió al aserrado de madera de las distintas especies con procedencia del norte de la provincia de Palencia para el caso de las probetas de las especies *Populus x euramericana* "I-214", *Quercus pyrenaica*, *Pinus sylvestris* y de la Meseta Castellana para el caso de la madera de la especie *Pinus pinaster*.

El aserrado se llevó a cabo por personal utilizando sierras de banda y sierras circulares, como se puede apreciar en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Detalle del corte realizado sobre madera de *P. x euramericana* I-214 con la sierra de banda. (Fuente: Propia).

Las especies analizadas, representativas de la Península Ibérica por su extenso uso y distribución, serán determinantes en la obtención de los valores y de gran importancia por tratarse de maderas de fácil obtención dada su cercanía geográfica.

Se analizaron como coníferas *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*, ampliamente desarrollada su utilización como materiales de construcción tanto en el mundo rural como en la arquitectura religiosa de la Península.

En cuanto a las frondosas, se selecciono por su amplio uso y distribución el híbrido *Populus x euramericana* I-214, siendo también usada en construcción y destacando por su bajo peso y alta estabilidad dimensional. Como representante de madera más dura y densa, se seleccionó la especie *Quercus pyrenaica*, aunque su madera generalmente cuenta con otros usos distintos al estructural.

4.2 EQUIPO DE TRABAJO:

4.2.1 Probetas de madera aserrada:

Se realizó un análisis de 50 probetas por especie de *Populus x euramericana* "I-214", *Quercus pyrenaica*, *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*. Se supervisó su elección en búsqueda de la caracterización de distintos cortes por cada muestra de probeta, y de dimensiones 6x2x2 cm. Para cumplir con la norma UNE 56-528-77 todas constan de caras planas.



Figura 4.2. Probetas de las especies *Quercus pyrenaica*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, y *Populus x euramericana* I-214 ordenadas de arriba a abajo. (Fuente: Propia).

4.2.2 Máquina universal de ensayo:

En la realización del estudio, se ha empleado la máquina universal de ensayo ELIB-100W de la marca IBERTEST, ubicada en el Laboratorio de Tecnología de la Madera.

Esta máquina realiza una amplia variedad de pruebas mecánicas como pruebas de tensión, compresión, dureza, torsión, cortante, entre otros. Dispone de una placa de apoyo inferior, visible en la Figura 4.6, donde se coloca la probeta a ensayar y de varios cabezales móviles intercambiables superiores, Figura 4.4, diferenciados en la fuerza soportable del sensor, a los que se les pueden añadir diferentes accesorios. La máquina va conectada a un ordenador que dispone de un software adaptado para la realización de los diferentes ensayos y muestra los detallados resultados obtenidos tal y como se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.3. Máquina universal de ensayo. (Fuente: Propia).



Figura 4.4. Cabezal de dureza de 5 KN. (Fuente: Propia).

4.2.3 Pilodyn:

Se ha empleado un penetrómetro tipo Pilodyn, modelo “6 J Forest” ubicado en el Laboratorio de Tecnología de la Madera.

Este instrumento mide la longitud de penetración de una varilla metálica percutora de accionamiento manual y de energía constante (6 J.) de forma que se puede establecer una correlación entre su penetración y la dureza de la madera a ensayar, y por consiguiente, una estimación de su densidad.

Tras el ensayo, la muestra de madera presenta un orificio de unas dimensiones de superficie aproximadas de 2,5 mm de diámetro, considerándose por ello un buen instrumento de determinación de la densidad de madera por método no destructivo, puesto que los daños ocasionados en la madera o incluso en vegetal vivo son nulos.



Figura 4.8. Pilodyn 6J Forest. (Fuente: Propia).

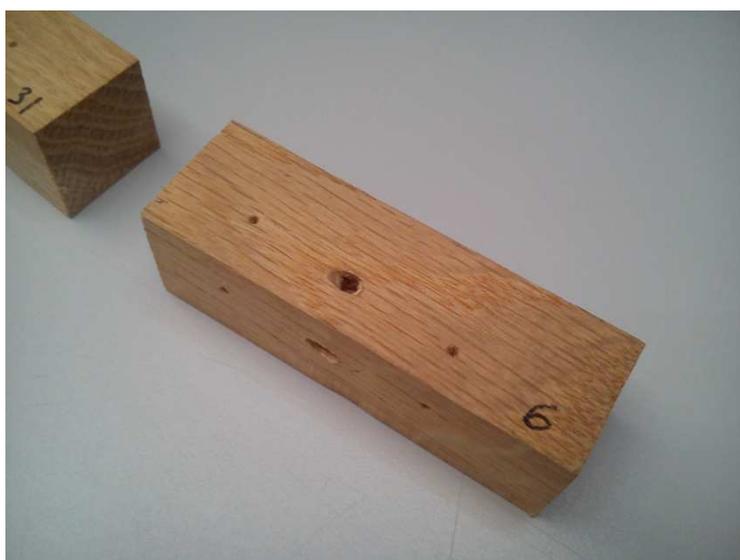


Figura 4.9. Detalle perforación con Pilodyn 6J Forest en probeta de *Quercus pyrenaica*. (Fuente: Propia).

4.2.4 Calibre:

Se utiliza un calibre para la medición de las dimensiones de cada probeta para la determinación de su densidad, con una precisión de $\pm 0,05$ mm.

4.2.5 Balanza de precisión:

Se utiliza en la medición de la masa de cada probeta para la determinación de su densidad, con una precisión de $\pm 0,01$ gramos.



Figura 4.10. Balanza de precisión. (Fuente: Propia).

4.2.6 Estufa de secado:

Se emplea en el secado de las probetas para determinar la humedad a la que se encuentran, siendo un componente clave en el estudio por ser motivo de variaciones en la penetración.

Se realiza un calentamiento de 24 horas a 103°C de temperatura.



Figura 3.11. Estufa. (Fuente: Propia).

4.3 METODOLOGÍA EMPLEADA:

4.3.1 Obtención del material de estudio:

Las muestras con las que se ha realizado el estudio consisten en 50 probetas de madera de las especies *Populus x euramericana* "I-214", *Quercus pyrenaica*, *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* de dimensiones 6 x 2 x 2 cm. Obtenidas en el Laboratorio de Tecnología de Maderas de la ETSIIAA de Palencia, y de acuerdo con la norma UNE 56-528-78 "Preparación de probetas para ensayos".

4.3.2 Selección y numeración del material:

Se seleccionaron las probetas adecuadas para el estudio evitando que estas presentaran irregularidades estructurales visibles y fueran lo más representativas de la especie a la que pertenecían. Posteriormente se le adjudicó un número a cada probeta para su posterior manejo.

4.3.3 Medición de dimensiones y densidades:

Se procedió a una medición de dimensiones de cada probeta seleccionada para estimar la densidad por ser un factor clave en el estudio. En la medición de las dimensiones se utilizó un calibre.

$$V = Lhb$$

Donde:

V: volumen de la probeta (cm³).

L: longitud de la probeta (cm).

h: altura de la probeta (cm).

b: anchura de la probeta (cm).

Posteriormente se estimó su densidad tras pesar las muestras en una balanza de precisión (Figura 3.7).

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ : densidad (g/cm³).

m: peso (g).

v: volumen de la probeta (cm³).

4.3.4 Análisis de la humedad:

El cálculo de la humedad se llevó a cabo sobre 10 probetas de cada especie según la norma UNE 56-529-77 "Características físico-mecánicas de la madera, determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro".

Se llevó a cabo el pesado de las probetas tras permanecer unas semanas en el Laboratorio de Tecnología de las Maderas y acto seguido se procedió al secado en estufa (Figura 3.8). Tras un mínimo de 24 horas a 103 °C, se volvió a realizar el pesaje de las probetas. Se determinó la humedad mediante la ecuación:

$$H = \frac{(Ph - Po)}{Po} \times 100$$

Donde:

H: contenido de humedad de la probeta (%).

Ph: peso húmedo de la probeta (g).

Po: peso anhidro de la probeta (g).

De esta forma se obtienen unos valores muy homogéneos para cada especie, siendo del 10% para *Populus x euramericana* I-214, *Quercus pyrenaica* y *Pinus pinaster* y del 8,2 % para *Pinus sylvestris*.

4.3.5 Determinación de la dureza por los métodos JANKA y BRINELL:

Se efectúan los ensayos de dureza con la máquina universal de ensayo ELIB-100W de la marca IBERTEST, con el cabezal de 5 KN, y según la norma UNE 56-534-77.

Se coloca la probeta en la mesa de carga, con la sección que se quiere estudiar hacia arriba, y de manera perpendicular al cilindro del cabezal, de la forma que se muestra en la Figura 4.12.

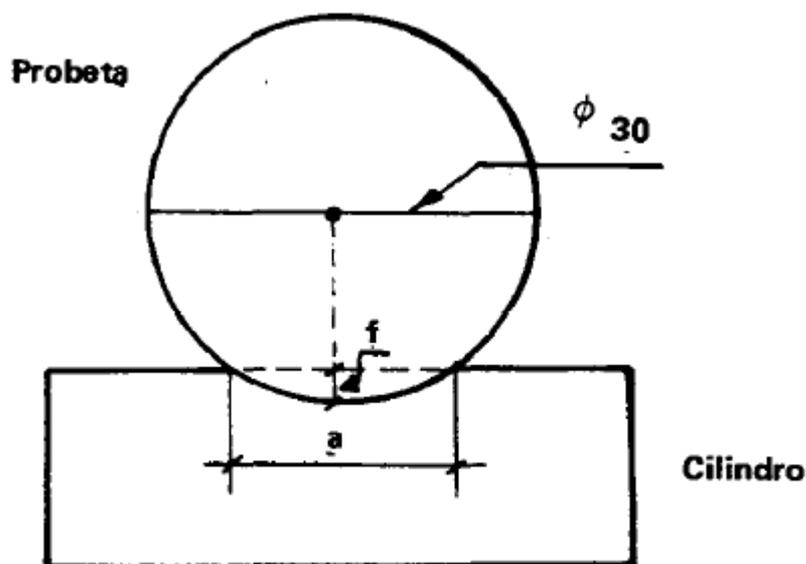


Figura 4.12. Dimensiones del cilindro y colocación de probeta. (Fuente: AITIM).

Se llega a una carga de 200 Kg/cm², que se mantendrá durante 5 segundos. Tras la retirada de carga, se mide la anchura (a) de la marca en milímetros y se calcula la flecha (f) de penetración según lo siguiente:

$$f = 15 - 0,5 (900 - a^2)^{1/2}$$

Conociendo el valor del radio $r = 15$ mm, y el valor f (mm) podemos determinar el valor de a por medio de la ecuación:

$$a = 2 \sqrt{(15^2) - (15 - f)^2}$$

Los valores de a y f se obtienen con aproximación de 0,1 mm.

Una vez determinado el valor de f , procedemos a calcular el ángulo α , representado en la Figura 4.13. por medio de la expresión:

$$\alpha = \frac{2a}{3}$$

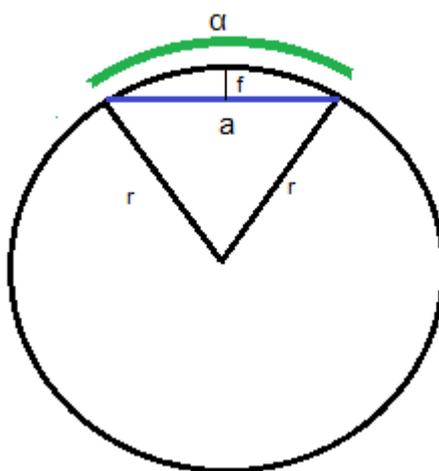


Figura 4.13. Parámetros de cálculo. (Fuente: Propia).

Por lo tanto, la longitud del arco (L) se obtiene:

$$L = \frac{2\pi r \alpha}{3}$$

La dureza se obtiene según la siguiente expresión:

$$Dureza = \frac{P}{L} \text{ (Kp/mm}^2\text{)}$$

En el caso particular de dureza por el método que hemos llamado JANKA, los ensayos se realizan hasta conseguir una penetración del cilindro con una carrera o flecha constante de 2 mm en lugar de llegar hasta la mitad del mismo como sería el método Janka (que además utiliza una bola de 11,28 mm de diámetro), obteniéndose los correspondientes valores de presión ejercida para conseguirlo para cada sección de cada probeta, y ensayos de dureza que hemos llamado BRINELL se realizan a presión constante de 2 KN, obteniéndose los correspondientes valores de carrera o flecha para cada sección de cada probeta, la diferencia con dicho método es que utiliza una bola de acero de 10 mm de diámetro.

En ambos casos, se realizan dos muestras por sección y por probeta, y el valor tomado es la media aritmética.

4.3.6 Determinación de la dureza con penetrómetro:

Se realizan los ensayos de dureza con penetrómetro Pilodyn. Se toman dos muestras por probeta, una para cada sección, evitando realizarse sobre nudos o fendas, para cada sección de cada probeta.

La toma de datos se lleva a cabo cargando inicialmente la varilla metálica percutora mediante una baqueta, incorporada en el propio equipo, empujando la varilla al interior del instrumento y quedándose retenida por medio de un tope.

Se posiciona la zona de salida de la varilla en contacto con la sección de la probeta que se quiera estudiar, colocando el instrumento con orientación vertical con respecto a la probeta que se estudia.

Se acciona un pulsador o gatillo localizado en el punto superior del instrumento, dejándose libre así la varilla metálica, que penetra en la madera con una presión constante.

Tras la penetración y sin dejar de presionar el instrumento contra la probeta, aparece en una leyenda de la parte lateral del Pilodyn el valor de la profundidad obtenido por la varilla en milímetros.

Los valores obtenidos de cada penetración serán clave en la determinación y relación entre las distintas secciones de la madera, para cada especie y en función de la densidad obtenida por métodos tradicionales y durezas JANKA y BRINELL.

4.3.7 Toma de datos, variables y análisis estadístico:

Una vez llevada a cabo la toma de datos, se recogieron los datos en tablas que más tarde se digitalizaron mediante el software "Excel 2007".

Tras ser ordenados los datos, se utilizó al software "STATGRAPHICS CENTURIÓN XV versión 15.2.06" para el estudio estadístico de los datos obteniéndose una gran variedad de análisis estadísticos, tanto descriptivos como comparativos o predictivos, para el conjunto de variables obtenidas en laboratorio (Tabla 4.1.).

Tabla 4.1. Variables medidas del estudio:

VARIABLES	ABREVIATURAS
Especie	SP
Densidad	DENSIDAD
Humedad	H
Dureza JANKA	D_JANKA
Dureza BRINELL	D_BRINELL
Dureza media JANKA	Dm_JANKA
Dureza media BRINELL	Dm_BRINELL
Penetración	PEN
Penetración media	PEN_m
Sección	S

En primer lugar se llevó a cabo una estadística descriptiva, posteriormente se realizaron una serie de análisis de la varianza y finalmente unas regresiones.

- **Estadística descriptiva:**

Se llevó a cabo un análisis descriptivo, para cada especie de madera y en función de las variables: Densidad, dureza por el método JANKA, dureza por el método BRINELL, secciones de la madera, humedad y penetración por sección de la madera.

En todos ellos, se indica la media, coeficiente de variación, valor máximo y el valor mínimo.

- **Estadística comparativa:**

Se realizaron ANOVAS entre especies en la búsqueda de diferencias para las variables: Densidad, dureza media de las dos secciones de cada probeta por el método JANKA, dureza media de las dos secciones de cada probeta por el método BRINELL y penetración media de las dos secciones de cada probeta.

Se realizaron ANOVAS en la búsqueda, para cada especie, de diferencias entre secciones en la variable penetración.

Se realizaron ANOVAS en la búsqueda, para cada especie, de diferencias entre secciones en las variables de dureza según los métodos JANKA y BRINELL.

- **Estadística predictiva:**

Se llevaron a cabo análisis de las regresiones para cada especie de madera de la densidad en función de la variable penetración media.

Se realizaron análisis de las regresiones para cada especie de madera de la dureza media por los métodos JANKA y BRINELL en función de la densidad.

A continuación se realizó un análisis para las durezas medias por los métodos JANKA y BRINELL en función de la penetración.

Por último se analizaron las regresiones anteriores en conjunto para la variable especie.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA:

Se exponen a continuación los resultados obtenidos en el estudio para cada especie con respecto a las variables densidad, humedad, dureza JANKA y dureza BRINELL y penetración. Se muestran los valores de: número de muestras analizadas (N), media, coeficiente de variación en % (C.V.), valor máximo (Máx.) y valor mínimo (Mín.).

5.1.1 Penetración determinada mediante Pilodyn:

A continuación aparecen los datos de la variable profundidad de penetración por especies analizadas en la dirección radial, tangencial o semirradial según la dirección de la fibra en las probetas, en forma de tablas.

Tabla 5.1. Análisis general de los valores de penetración media en mm por especie.

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	100	8,16	22,42%	14,5	6
<i>P. pinaster</i>	100	12,085	17,50%	19	7,5
<i>Populus x euramericana</i>	100	18,035	12,47%	22	12,5
<i>P. sylvestris</i>	100	12,505	15,03%	18	9

Cabe señalar que el valor de las muestras analizadas corresponde a 100 medidas por especie al analizarse dos caras de cada probeta.

Tabla 5.2. Análisis general de los valores de penetración radial en mm por especie.

Especie	Sección				
	Radial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	7,89286	17,36%	12	6
<i>P. pinaster</i>	20	13,0002	19,81%	19	9,5
<i>Populus x euramericana</i>	35	18,4429	12,35%	22	13
<i>P. sylvestris</i>	34	11,9559	15,32%	16	9

Tabla 5.3. Análisis general de los valores de penetración tangencial en mm por especie.

Especie	Sección				
	Tangencial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	7,7857	20,49%	12	6
<i>P. pinaster</i>	20	12,1750	16,06%	16,5	9,5
<i>Populus x euramericana</i>	35	17,5000	12,00%	21	12,5
<i>P. sylvestris</i>	34	12,6029	16,04%	18	10

Tabla 5.4. Análisis general de los valores de penetración semirradial en mm por especie.

Especie	Sección				
	Semirradial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	44	8,5682	25,09%	14,5	6
<i>P. pinaster</i>	60	11,7500	16,46%	18	7,5
<i>Populus x euramericana</i>	30	18,1833	12,83%	22	13,5
<i>P. sylvestris</i>	32	12,9844	12,85%	17	10

El conjunto muestral observado en las Tablas 5.2., 5.3. y 5.4. es suficiente para la realización del análisis descriptivo siendo suficiente y representativo el número de muestras por especie analizado así como el número de secciones por especie analizadas.

De acuerdo a estudios realizados con anterioridad y de características similares, existe una gran similitud con los datos obtenidos en el laboratorio, puesto que en la especie *Pinus pinaster* se obtuvieron unos valores de penetración: Tangencial: 8,5 mm; Radial: 8,3 mm; Penetración media: 8,4 mm Valor máximo: 15 mm; Valor mínimo: 5 mm; Coeficiente de variación: 24,1 % similares a los obtenidos por: Watt (1996), Iñiguez *et al.*(2006), Bobadilla *et al.*(2009), mostrados en la Tabla 2.11. Con respecto al *Pinus sylvestris* Watt (1996), Iñiguez *et al.*, (2006), Bobadilla *et al.*, (2009) obtuvieron unos valores de penetración: Tangencial: 10,7 mm; Radial: 10,9 mm; Penetración media: 10,8 mm; Valor máximo: 20 mm; Valor mínimo: 6 mm; Coeficiente de variación: 18,3 %, valores mostrados en la Tabla 2.11. Esta pequeña diferencia puede ser fruto de la apreciación del resultado obtenido visualmente con el penetrómetro Pilodyn 6J con respecto al marcador de la profundidad de penetración, pudiéndose tomar la penetración máxima, mínima o la media obtenida, en este caso en particular se tomó la muestra media.

De acuerdo a los datos del estudio Cañas Gutierrez I. (2013) en *Pinus pinaster* obtiene valores de una penetración: Tangencial: 17,225 mm; Radial: 15,9 mm; Penetración media: 16,563 mm; Valor máximo: 16 mm; Valor mínimo: 10 mm; Coeficiente de variación: 8,706 %, valores mostrados en las Tablas 2.12; 2.13 y 2.14. Se encuentran similitudes y las posibles variaciones pueden deberse al motivo del caso anterior. Con respecto a la especie *Populus x euramericana* Cañas Gutierrez I. (2013) obtuvo valores de penetración: Tangencial: 13,250 mm; Radial: 12,375 mm; Penetración media: 12,813 mm; Valor máximo: 19 mm; Valor mínimo: 14 mm; Coeficiente de variación: 12,766 %, valores mostrados en las Tablas 2.12; 2.13 y 2.14., obteniéndose valores más bajos de penetración a los del presente trabajo, influenciados probablemente por tratarse de probetas de distintas clases estructurales con respecto a las de este estudio.

5.1.2 Densidad:

Se analiza la variable densidad de las muestras a la humedad de equilibrio higroscópico del laboratorio 20° C y unos 38% de humedad relativa del aire, para cada especie.

Tabla 5.5. Análisis general de los valores de densidad kg/m³ por especie.

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	50	779,145	15,11%	1045,96	491,223
<i>P. pinaster</i>	50	507,450	10,95%	628,131	426,985
<i>Populus x euramericana</i>	50	322,859	3,74%	342,207	285,462
<i>P. sylvestris</i>	50	534,718	11,94%	799,431	451,058

Los valores obtenidos se asemejan en gran medida a los valores indicados por *AITIM*. Se ha obtenido para el caso de *Quercus pyrenaica* una densidad de 779,145 kg/m³, estableciendo *AITIM* su densidad en un rango de 670-780 kg/m³; En *Pinus pinaster* una densidad de 507,450 kg/m³ siendo el rango establecido por *AITIM* de 530-550 kg/m³; en *Populus x euramericana* una densidad de 322,859 kg/m³, siendo un valor menor que la densidad fijada por *AITIM*, alcanzando un rango de 420-480 kg/m³; En *Pinus sylvestris* se ha obtenido una densidad de 534,718 kg/m³, estando dentro del rango establecido por *AITIM* de 500-540 kg/m³.

5.1.3 Humedad:

Para los valores de humedad se han obtenido unos datos muy homogéneos debido a que todas las probetas proceden del laboratorio de maderas, donde la humedad ambiental es constante y tan solo se muestran variaciones en la especie *Pinus sylvestris* con una humedad de 8,2 %. Con respecto a las otras tres especies, presentan un 10 % de humedad.

Tabla 5.6. Análisis general de los valores de humedad por especie.

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	10	9,99584	1,24%	10,2126	9,81517
<i>P. pinaster</i>	10	9,96016	2,45%	10,4468	9,64684
<i>Populus x euramericana</i>	10	9,98587	2,86%	10,2616	9,25156
<i>P. sylvestris</i>	10	8,19694	2,17%	8,41718	7,83396

Se tomaron 10 probetas de cada especie por ser una muestra representativa y poco variable, viéndose reflejado en el bajo coeficiente de variación obtenido para las 10 probetas.

5.1.4 Dureza JANKA:

Se analiza la dureza por el método JANKA, esto es, a una carrera o flecha constante de la probeta a analizar de 2 mm.

Tabla 5.7. Análisis general de los valores de la dureza JANKA media por especie.

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	100	13,9131	29,34%	26,9979	6,00559
<i>P. pinaster</i>	100	5,68749	23,88%	11,0476	3,3494
<i>Populus x euramericana</i>	100	1,02104	39,67%	2,26187	0,356472
<i>P. sylvestris</i>	100	7,15159	26,06%	14,0158	3,26804

Cabe señalar que el valor de las muestras analizadas corresponde a 100 medidas por especie al analizarse las dos secciones de cada probeta.

Tabla 5.8. Análisis general de los valores de la dureza JANKA por especie para la sección radial.

Especie	Sección				
	Radial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	17,3783	27,96%	26,9979	6,66121
<i>P. pinaster</i>	20	5,95957	20,57%	8,72355	4,32731
<i>Populus x euramericana</i>	35	1,19887	40,84%	2,26187	0,366021
<i>P. sylvestris</i>	34	7,70262	21,22%	14,0158	5,46573

Tabla 5.9. Análisis general de los valores de la dureza JANKA por especie para la sección tangencial.

Especie	Sección				
	Tangencial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	13,678	18,68%	19,7714	8,83462
<i>P. pinaster</i>	20	5,65498	23,51%	8,40126	3,74276
<i>Populus x euramericana</i>	35	0,901145	34,58%	1,53585	0,356472
<i>P. sylvestris</i>	34	8,21641	18,23%	12,1095	5,81814

Tabla 5.10. Análisis general de los valores de la dureza JANKA por especie para la sección semirradial.

Especie	Sección				
	Semirradial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	44	11,8576	22,74%	17,5394	6,00559
<i>P. pinaster</i>	60	5,60764	25,29%	11,0476	3,3494
<i>Populus x euramericana</i>	30	0,953455	33,96%	1,39456	0,356472
<i>P. sylvestris</i>	32	5,43475	20,51%	7,46708	3,26804

Se observan unos elevados coeficientes de variación en los análisis descriptivos de las especies en función de la dureza por el método JANKA, destacando en este sentido los coeficientes de variación más elevados presentados por la especie *Populus x euramericana* con un 39,67 % de coeficiente de variación para la dureza medida.

5.1.5 Dureza BRINELL:

Atendiendo a la norma UNE 56-534-77, se ha de aplicar con una máquina de ensayo, de forma continua y a velocidad constante una carga de hasta 200 Kg con un cabezal de 30 cm de diámetro. Colocando las probetas de forma que el eje de la probeta y el del cabezal queden perpendiculares y aplicar una carga de 100 Kg por cm de anchura durante 5 segundos. En caso de maderas muy blandas se aplica una carga de 50 Kg por cm de anchura y se multiplica por dos la flecha obtenida.

Según lo anteriormente citado, se efectúa los ensayos de dureza por el método BRINELL con una carga de 2 KN incluso con maderas blandas como la del *Populus x euramericana* I-214 para estandarizar el método.

Se procede al análisis general obtenido mediante el método BRINELL.

Tabla 5.11. Análisis general de los valores de la dureza BRINELL por especie.

Especie	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	100	7,67274	6,18%	9,04519	6,21627
<i>P. pinaster</i>	100	5,85596	9,51%	7,20275	2,89669
<i>Populus x euramericana</i>	100	5,03959	9,11%	6,41003	3,7839
<i>P. sylvestris</i>	100	7,26697	19,46%	17,0056	4,94346

Cabe señalar que el valor de las muestras analizadas corresponde a 100 por especie al analizarse las dos secciones de cada probeta.

Tabla 5.12. Análisis general de los valores de la dureza BRINELL por especie para la sección radial.

Especie	Sección				
	Radial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	7,94461	6,54%	9,04519	6,64826
<i>P. pinaster</i>	20	5,84768	14,47%	6,87843	2,89669
<i>Populus x euramericana</i>	35	5,42183	6,79%	6,41003	4,56785
<i>P. sylvestris</i>	34	7,65007	23,94%	17,0056	5,44303

Tabla 5.13. Análisis general de los valores de la dureza BRINELL por especie para la sección tangencial.

Especie	Sección				
	Tangencial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	28	7,63391	3,87%	8,20742	1,2095
<i>P. pinaster</i>	20	5,91141	7,07%	6,59353	5,09341
<i>Populus x euramericana</i>	35	4,77973	8,43%	6,01751	3,7839
<i>P. sylvestris</i>	34	7,23913	9,66%	8,73698	5,83785

Tabla 5.14. Análisis general de los valores de la dureza BRINELL por especie para la sección semirradial.

Especie	Sección				
	Semirradial				
	N	Media	C.V.	Máx.	Mín.
<i>Q. pyrenaica</i>	44	7,52445	6,25%	8,36652	6,21627
<i>P. pinaster</i>	60	5,84023	8,26%	7,20275	4,89653
<i>Populus x euramericana</i>	30	4,8968	6,19%	5,3944	4,26708
<i>P. sylvestris</i>	32	6,88949	20,45%	10,0157	4,94346

Los mayores valores de dureza coinciden con la especie *Quercus pyrenaica*, mientras que los menores valores de dureza corresponden con las probetas de la especie *Populus x euramericana*. Se encuentran unos coeficientes de variación muy parecidos, excepto en la especie *Pinus sylvestris* que destaca por presentar altos coeficientes de variación.

5.2 ESTADÍSTICA COMPARATIVA:

Se reflejan los resultados obtenidos del análisis comparativo entre las más importantes características, correspondiendo con las variables penetración, penetración media, densidad, dureza JANKA, dureza BRINELL, dureza media JANKA, dureza media BRINELL.

Como primer paso 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 (No habrá diferencias estadísticamente significativas en el análisis).

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 negativa, en cuyo caso se realiza un análisis de Kruskal-Wallis atendiendo a los valores de las medianas, y verificación de varianzas positiva, donde se realizará un análisis de varianzas ANOVA atendiendo a los valores medios. Además se incluye para todos los análisis la prueba de múltiples rangos que, al igual que las gráficas de

medias o de medianas en cada caso, nos indica la aparición de grupos homogéneos o diferencias significativas en el análisis.

5.2.1 Penetración:

5.2.1.1 Análisis por especies en función de las secciones:

Se procede al análisis de las varianzas de la penetración para cada especie.

- ***Quercus pyrenaica*:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de penetración por sección en el *Quercus pyrenaica*.

Tabla 5.15. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	3,81692	0,0256806			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		0,653197	1,64604	0,157473	0,0000
Radial / Tangencial		0,653197	1,17882	0,307039	0,0051
Semirradial / Tangencial		1,64604	1,17882	1,94978	0,0802

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

Tabla 5.16. Prueba de Kruskal-Wallis para penetración por secciones.

S	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Radial	25	42,82
Semirradial	41	51,939
Tangencial	26	41,4615

Estadístico = 3,3056 Valor-P = 0,191513

Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, podemos asegurar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las distintas secciones, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.17. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	-0,702927	0,661855
Radial - Tangencial		-0,000769231	0,730603
Semirradial - Tangencial	*	0,702158	0,653901

Aparecen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95 % entre las secciones tangencial y radial. Estas diferencias se encontrarán en el análisis de las medias.

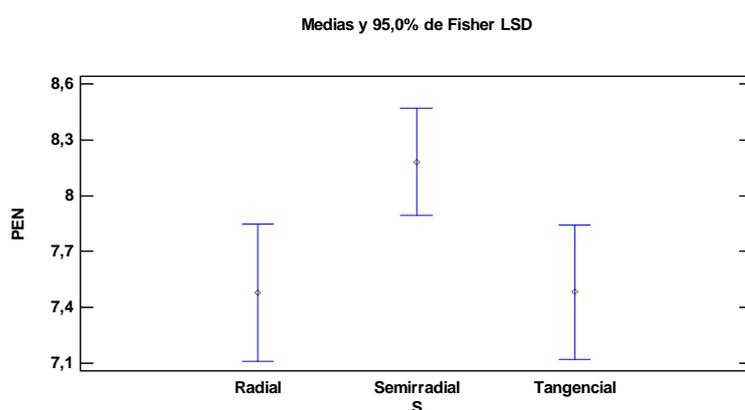


Figura 5.1. Gráfico de medias para el nivel de penetración según la sección para *Quercus pyrenaica* para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentra una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95% para el valor de la penetración en función de la sección de madera, siendo mayor la penetración en la sección semirradial que en las secciones tangencial y radial.

- ***Pinus pinaster*:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de penetración por sección en el *Pinus pinaster*.

Tabla 5.18. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	1,3587	0,261941			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		2,57519	1,76667	2,12474	0,0294

Radial / Tangencial	2,57519	1,71509	2,25447	0,0908
Semirradial / Tangencial	1,76667	1,71509	1,06106	0,9314

Como el valor-P es superior a 0,05 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 las varianzas ANOVA.

Tabla 5.19. Tabla ANOVA para penetración por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	27,4864	2	13,7432	3,63	0,0303
Intra grupos	359,973	95	3,78919		
Total (Corr.)	387,459	97			

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las distintas secciones, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos.

Tabla 5.20. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	1,35593	0,999912
Radial - Tangencial		1,05263	1,23803
Semirradial - Tangencial		-0,303301	1,01937

* indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % entre las secciones radial y la semirradial para la penetración.

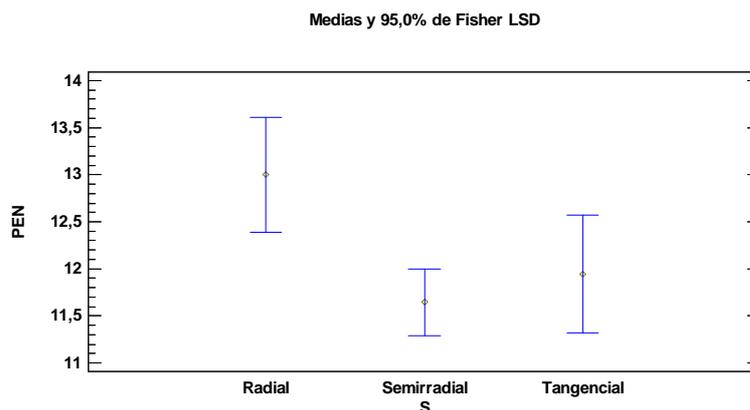


Figura 5.2. Gráfico de medias para el nivel de penetración según la sección para *Pinus pinaster* para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentra una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95% para el valor de la penetración en función de la sección de madera, siendo mayor la penetración en la sección radial que la sección semirradial.

- ***Populus x euramericana I-214:***

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de penetración por sección en el *Populus x euramericana I-214*.

Tabla 5.21. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,292266	0,747225			
<i>Comparación</i>		<i>Sigma1</i>	<i>Sigma2</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Valor</i>
Radial / Semirradial		2,27768	2,33225	0,953753	0,8879
Radial / Tangencial		2,27768	2,10042	1,1759	0,6393
Semirradial / Tangencial		2,33225	2,10042	1,23292	0,5541

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la varianza.

Tabla 5.22. Tabla ANOVA para penetración por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	16,5001	2	8,25006	1,65	0,1968
Intra grupos	484,127	97	4,991		
Total (Corr.)	500,627	99			

Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, podemos asegurar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de las distintas secciones, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos.

Tabla 5.23. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial		0,259524	1,10321
Radial - Tangencial		0,942857	1,05993
Semirradial - Tangencial		0,683333	1,10321

* indica una diferencia significativa.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la penetración entre secciones.

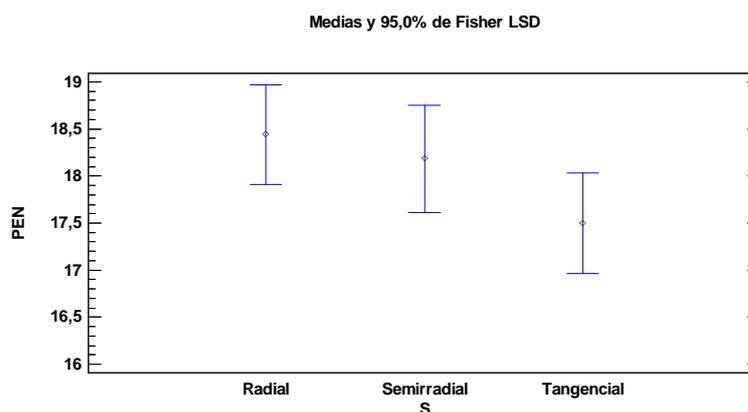


Figura 5.3. Gráfico de medias para el nivel de penetración según la sección para *Populus x euramericana* I-214 para un nivel de confianza del 95%.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% para el valor de la penetración en función de la sección de madera.

- ***Pinus sylvestris***:

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de penetración por sección en el *Pinus sylvestris*.

Tabla 5.24. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,359324	0,699074			
<i>Comparación</i>		<i>Sigma1</i>	<i>Sigma2</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Valor</i>
Radial / Semirradial		1,83141	1,66793	1,20562	0,6031
Radial / Tangencial		1,83141	2,02177	0,820551	0,5732
Semirradial / Tangencial		1,66793	2,02177	0,680602	0,2845

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la varianza.

Tabla 5.25. Tabla ANOVA para penetración por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	17,9318	2	8,96589	2,62	0,0779
Intra grupos	331,816	97	3,42078		
Total (Corr.)	349,747	99			

Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, podemos asegurar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de las distintas secciones, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos.

Tabla 5.26. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	-1,02849	0,904109
Radial - Tangencial		-0,647059	0,890305
Semirradial - Tangencial		0,381434	0,904109

* indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % entre las secciones radial y semirradial para la penetración.

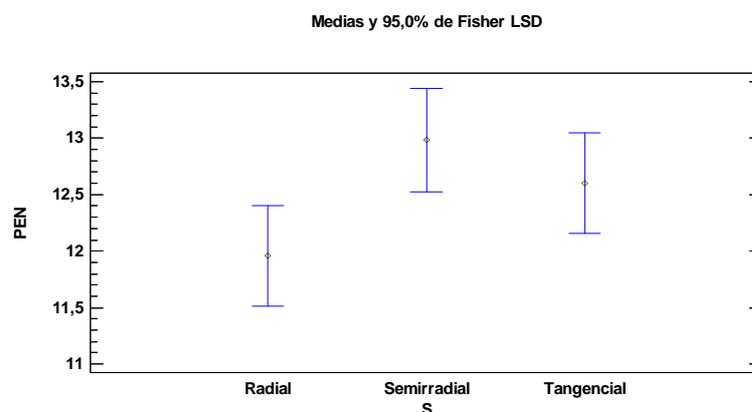


Figura 5.4. Gráfico de medias para el nivel de penetración según la sección para *Pinus sylvestris* para un nivel de confianza del 95%.

Atendiendo a la gráfica de medias se observan diferencias estadísticamente significativas secciones radial y semirradial con una menor penetración en la sección radial.

5.2.1.2 Análisis entre especies:

Se lleva a cabo un análisis de la penetración entre especies.

Se estudia la prueba de Levene para el nivel de penetración por especies.

Tabla 5.27. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P				
Levene	15,1056	2,67265E-9				
Comparación			Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
P. euramericana I-214 / P. pinaster			2,24874	1,83034	1,50944	0,0437
P. euramericana I-214 / P. sylvestris			2,24874	1,87958	1,4314	0,0759
P. euramericana I-214 / Q. pyrenaica			2,24874	0,830876	7,32499	0,0000
P. pinaster / P. sylvestris			1,83034	1,87958	0,948295	0,7946
P. pinaster / Q. pyrenaica			1,83034	0,830876	4,85278	0,0000
P. sylvestris / Q. pyrenaica			1,87958	0,830876	5,11737	0,0000

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

Tabla 5.28. Prueba de Kruskal-Wallis para penetración entre especies.

SP	Tamaño Muestra	Rango Promedio
P. euramericana I-214	100	323,025
P. pinaster	97	172,588
P. sylvestris	100	191,925
Q. pyrenaica	81	41,9136

Estadístico = 300,219 Valor-P = 0

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P menor de 0,05 que existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.29. Contraste entre especies con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P. euramericana I-214 - P. pinaster	*	6,14325	0,507608
P. euramericana I-214 - P. sylvestris	*	5,53	0,503728
P. euramericana I-214 - Q. pyrenaica	*	10,6152	0,532449
P. pinaster - P. sylvestris	*	-0,613247	0,507608
P. pinaster - Q. pyrenaica	*	4,472	0,536121
P. sylvestris - Q. pyrenaica	*	5,08525	0,532449

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % de la penetración para las cuatro especies.

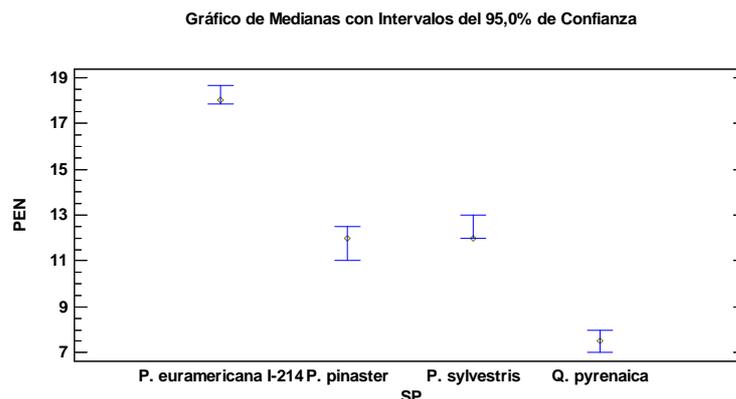


Figura 5.5. Gráfico de medianas para el nivel de penetración para las especies para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las cuatro especies, siendo la especie *Populus x euramericana* I-214 la especie donde se ha producido una mayor penetración y siendo *Quercus pyrenaica* la especie donde se ha producido la penetración menor. Estos valores están estrechamente relacionados por la densidad, por tanto, especies con densidad mayor como el *Quercus pyrenaica* obtienen menores valores de penetración y especies de menor densidad como *Populus x euramericana* I-214 obtiene valores de mayor penetración.

5.2.2. Densidad:

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de densidad por especies.

Tabla 5.30. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P				
Levene	45,7672	0				
Comparación			Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
P. euramericana I-214 / P. pinaster			10,9147	55,576	0,0385697	0,0000
P. euramericana I-214 / P. sylvestris			10,9147	51,8071	0,0443857	0,0000
P. euramericana I-214 / Q. pyrenaica			10,9147	97,3568	0,0125686	0,0000
P. pinaster / P. sylvestris			55,576	51,8071	1,15079	0,4888
P. pinaster / Q. pyrenaica			55,576	97,3568	0,325868	0,0000
P. sylvestris / Q. pyrenaica			51,8071	97,3568	0,283169	0,0000

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

Tabla 5.31. Prueba Kruskal-Wallis para la densidad entre especies.

SP	Tamaño Muestra	Rango Promedio
P. euramericana I-214	98	49,5
P. pinaster	100	185,04
P. sylvestris	98	213,194
Q. pyrenaica	94	340,394

Estadístico = 322,969 Valor-P = 0

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P menor de 0,05 que existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.32. Contraste entre especies con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P. euramericana I-214 - P. pinaster	*	-183,827	17,1827
P. euramericana I-214 - P. sylvestris	*	-205,693	17,2693
P. euramericana I-214 - Q. pyrenaica	*	-473,204	17,452
P. pinaster - P. sylvestris	*	-21,8663	17,1827
P. pinaster - Q. pyrenaica	*	-289,377	17,3664
P. sylvestris - Q. pyrenaica	*	-267,511	17,452

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % de la densidad para las cuatro especies.

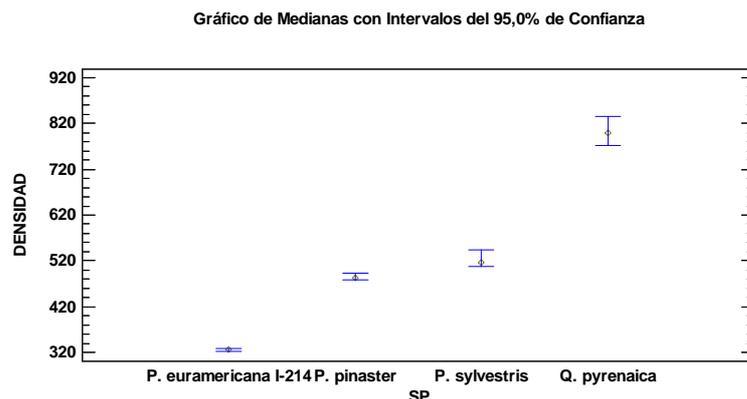


Figura 5.6. Gráfico de medianas para el nivel de densidad para las especies para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentran diferencias significativas entre las cuatro especies correspondiendo la mayor densidad a la especie *Quercus pyrenaica* y la densidad menor a la especie *Populus x euramericana I-214*.

5.2.3 Dureza:

5.2.3.1 Dureza por especies:

- **Dureza JANKA:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza media por el método JANKA por especies.

Tabla 5.33. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P				
Levene	66,2551	0				
Comparación			Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
P. euramericana I-214 / P. pinaster			0,369501	1,103	0,112222	0,0000
P. euramericana I-214 / P. sylvestris			0,369501	1,67079	0,0489088	0,0000
P. euramericana I-214 / Q. pyrenaica			0,369501	3,51018	0,0110808	0,0000
P. pinaster / P. sylvestris			1,103	1,67079	0,435823	0,0001
P. pinaster / Q. pyrenaica			1,103	3,51018	0,0987403	0,0000
P. sylvestris / Q. pyrenaica			1,67079	3,51018	0,22656	0,0000

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

Tabla 5.34. Prueba de Kruskal-Wallis para la dureza JANKA entre especies.

SP	Tamaño Muestra	Rango Promedio
P. euramericana I-214	98	49,5
P. pinaster	96	170,24
P. sylvestris	98	226,214
Q. pyrenaica	97	334,969

Estadístico = 326,628 Valor-P = 0

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P menor de 0,05 que existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.35. Contraste entre especies con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P. euramericana I-214 - P. pinaster	*	-4,52972	0,572405
P. euramericana I-214 - P. sylvestris	*	-6,03463	0,569447
P. euramericana I-214 - Q. pyrenaica	*	-12,5374	0,570913
P. pinaster - P. sylvestris	*	-1,50492	0,572405
P. pinaster - Q. pyrenaica	*	-8,00764	0,573863
P. sylvestris - Q. pyrenaica	*	-6,50272	0,570913

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % en la dureza JANKA para las cuatro especies.

Gráfico de Medianas con Intervalos del 95,0% de Confianza

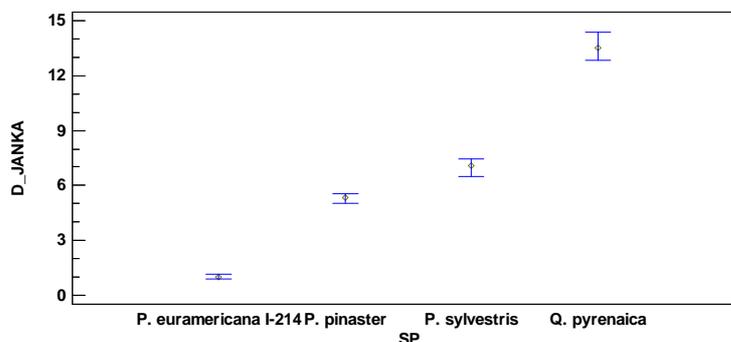


Figura 5.7. Gráfico de medianas para el nivel de dureza por el método JANKA por especies para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las cuatro especies correspondiendo la mayor dureza por el método JANKA con la especie *Quercus pyrenaica* y la menor con la especie *Populus x euramericana I-214*. Las especies *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* disponen de valores de dureza intermedios entre las anteriores especies mencionadas. Las especies de mayor densidad como *Quercus pyrenaica* obtienen unos valores altos de dureza JANKA mientras que especies de menor densidad como *Populus x euramericana I-214* obtiene menores valores de dureza JANKA por su menor densidad.

- **Dureza BRINELL:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza media por el método BRINELL por especies.

Tabla 5.36. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P				
Levene	37,6223	0				
Comparación			Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
P. euramericana I-214 / P. pinaster			0,440059	0,47247	0,867509	0,4830
P. euramericana I-214 / P. sylvestris			0,440059	0,948167	0,215403	0,0000
P. euramericana I-214 / Q. pyrenaica			0,440059	0,36425	1,45956	0,0679
P. pinaster / P. sylvestris			0,47247	0,948167	0,248301	0,0000
P. pinaster / Q. pyrenaica			0,47247	0,36425	1,68248	0,0123
P. sylvestris / Q. pyrenaica			0,948167	0,36425	6,77596	0,0000

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

Tabla 5.37. Prueba Kruskal-Wallis para la dureza BRINELL entre especies.

SP	Tamaño Muestra	Rango Promedio
P. euramericana I-214	99	61,9495
P. pinaster	99	153,333
P. sylvestris	97	258,134
Q. pyrenaica	93	313,054

Estadístico = 286,784 Valor-P = 0

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P menor de 0,05 que existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.38. Contraste entre especies con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P. euramericana I-214 - P. pinaster	*	-0,860107	0,168357
P. euramericana I-214 - P. sylvestris	*	-2,08545	0,169222
P. euramericana I-214 - Q. pyrenaica	*	-2,70454	0,171051
P. pinaster - P. sylvestris	*	-1,22534	0,169222
P. pinaster - Q. pyrenaica	*	-1,84443	0,171051
P. sylvestris - Q. pyrenaica	*	-0,619089	0,171903

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % en la dureza BRINELL entre las 4 especies.

Gráfico de Medianas con Intervalos del 95,0% de Confianza

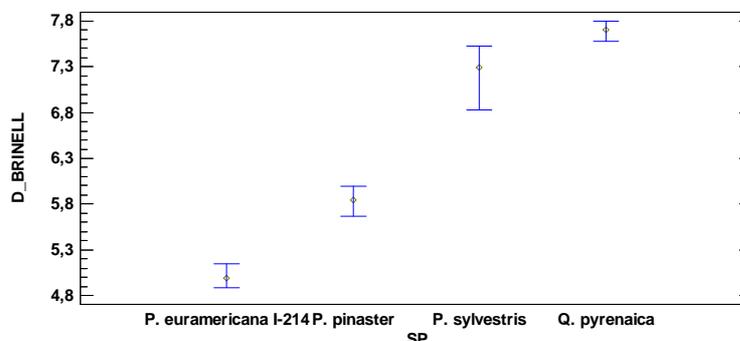


Figura 5.8. Gráfico de medianas para el nivel de dureza por el método BRINELL por especies para un nivel de confianza del 95%.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las cuatro especies correspondiendo la mayor dureza por el método BRINELL con la especie *Quercus pyrenaica* y la menor con la especie *Populus x euramericana* I-214. Las especies *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* disponen de valores de dureza intermedios entre las anteriores especies mencionadas, siendo mayor en la especie *Pinus sylvestris*. Las especies de mayor densidad como *Quercus pyrenaica* obtienen unos valores altos de dureza BRINELL mientras que especies de menor densidad como

Populus x euramericana I-214 obtiene valores menores de dureza BRINELL por su menor densidad.

Se comprueba que las diferencias por ambos métodos de dureza resultan ser muy parecidos en cuanto a los resultados obtenidos, siendo diferenciadas cada especie de madera por los valores obtenidos y manteniéndose por ambos métodos la especie *Quercus pyrenaica* como la más dura de las analizadas, seguida de *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y por último, la más blanda, *Populus x euramericana* I-214.

5.2.3.2 Dureza por especies en función de las secciones:

- ***Quercus pyrenaica*, Dureza JANKA:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método JANKA para *Quercus pyrenaica*.

Tabla 5.39. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,726263	0,486436			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		3,23893	2,69682	1,44244	0,2947
Radial / Tangencial		3,23893	2,55462	1,60749	0,2365
Semirradial / Tangencial		2,69682	2,55462	1,11442	0,7781

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la varianza.

Tabla 5.40. Tabla ANOVA para dureza JANKA por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	492,914	2	246,457	31,39	0,0000
Intra grupos	730,222	93	7,85185		
Total (Corr.)	1223,14	95			

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.41. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	5,63073	1,41203
Radial - Tangencial	*	3,8103	1,54789
Semirradial - Tangencial	*	-1,82043	1,34519

* indica una diferencia significativa.

Aparecen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % entre las secciones radial, tangencial y semirradial.

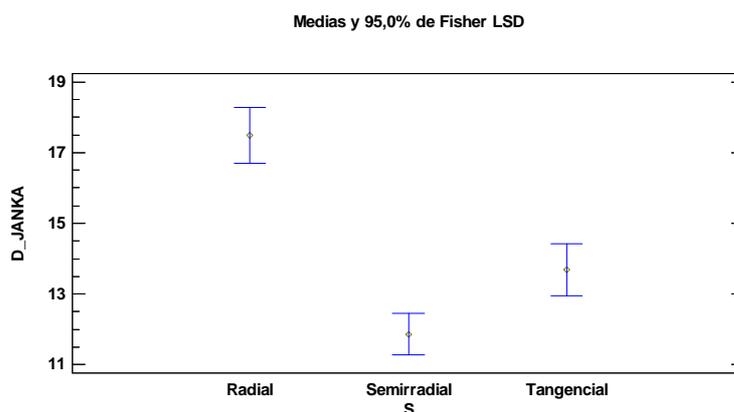


Figura 5.9. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método JANKA para el *Quercus pyrenaica* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Se pueden observar diferencias estadísticamente significativas entre las tres secciones, siendo la sección de mayor dureza JANKA la sección radial y la de menor dureza JANKA, la sección semirradial.

- ***Quercus pyrenaica*, Dureza BRINELL:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método BRINELL para *Quercus pyrenaica*.

Tabla 5.42. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	4,84255	0,0100847			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		0,519918	0,258467	4,04631	0,0001
Radial / Tangencial		0,519918	0,29545	3,09673	0,0045

Semirradial / Tangencial	0,258467	0,29545	0,765321	0,4525
--------------------------	----------	---------	----------	--------

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

Tabla 5.43. Prueba Kruskal-Wallis para la dureza BRINELL entre secciones.

S	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Radial	28	61,625
Semirradial	36	39,5139
Tangencial	28	40,3571

Estadístico = 12,931 Valor-P = 0,00155622

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P menor de 0,05 que existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.44. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	0,312483	0,183794
Radial - Tangencial	*	0,310709	0,194943
Semirradial - Tangencial		-0,00177368	0,183794

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas en la dureza BRINELL para la sección radial con respecto a las secciones tangencial y semirradial.

Gráfico de Medianas con Intervalos del 95,0% de Confianza

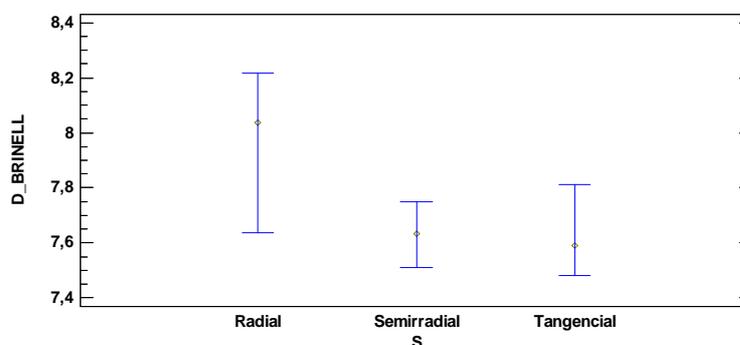


Figura 5.10. Gráfico de medianas para el nivel de dureza por el método BRINELL para el *Quercus pyrenaica* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Se puede observar una pequeña diferencia en el valor de la mediana para la variable dureza BRINELL en función de las secciones de la madera, siendo mayor la dureza en la sección radial que en las secciones semirradial y tangencial.

- ***Pinus pinaster*, Dureza JANKA:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método JANKA para *Pinus pinaster*.

Tabla 5.45. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	3,05608	0,0520418			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		1,22615	0,784682	2,44174	0,0117
Radial / Tangencial		1,22615	1,3294	0,850701	0,7281
Semirradial / Tangencial		0,784682	1,3294	0,3484	0,0028

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la media.

Tabla 5.46. Tabla ANOVA para dureza JANKA por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	10,0536	2	5,02681	4,78	0,0106
Intra grupos	93,5462	89	1,05108		
Total (Corr.)	103,6	91			

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.47. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	0,787626	0,535996
Radial - Tangencial		0,304594	0,644187

Semirradial - Tangencial		-0,483032	0,535996
--------------------------	--	-----------	----------

* indica una diferencia significativa.

Aparecen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la sección semirradial con respecto a la sección radial.

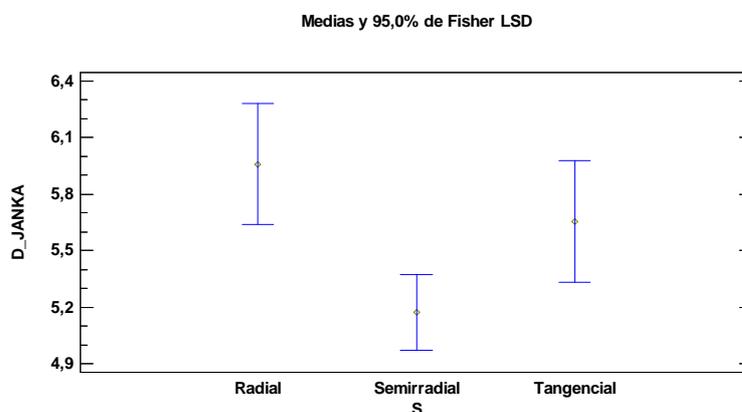


Figura 5.11. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método JANKA para el *Pinus pinaster* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Tal y como se aprecia en la gráfica de medianas, las diferencias entre las secciones radial y semirradial son pequeñas, siendo menor el valor de la sección semirradial para la dureza JANKA.

- ***Pinus pinaster*, Dureza BRINELL:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método BRINELL para *Pinus pinaster*.

Tabla 5.48. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,372664	0,689889			
Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor	
Radial / Semirradial	0,496361	0,482253	1,05937	0,8267	
Radial / Tangencial	0,496361	0,418101	1,4094	0,4645	
Semirradial / Tangencial	0,482253	0,418101	1,33042	0,4986	

Como el valor-P es superior a 0,05 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 las medias.

Tabla 5.49. Tabla ANOVA para dureza BRINELL por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,398692	2	0,199346	0,89	0,4136
Intra grupos	21,4776	96	0,223725		
Total (Corr.)	21,8763	98			

Puesto que el P-valor es mayor que 0,05, podemos asegurar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos.

Tabla 5.50. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial		0,162769	0,247159
Radial - Tangencial		0,0915854	0,300785
Semirradial - Tangencial		-0,0711832	0,242421

* indica una diferencia significativa.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la dureza BRINELL entre secciones.

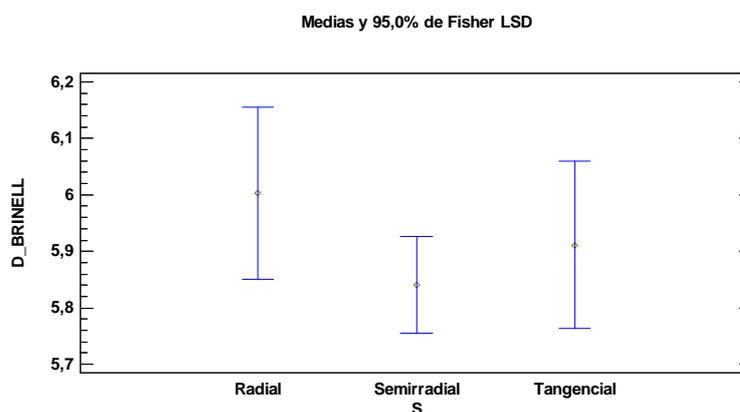


Figura 5.12. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método BRINELL para el *Pinus pinaster* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las tres secciones.

- ***Populus x euramericana* I-214, Dureza JANKA:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método JANKA para *Populus x euramericana* I-214.

Tabla 5.51. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	2,85389	0,0624691			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		0,489614	0,323788	2,28658	0,0257
Radial / Tangencial		0,489614	0,311602	2,46892	0,0101
Semirradial / Tangencial		0,323788	0,311602	1,07974	0,8238

Como el valor-P es superior a 0,05 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 las medias.

Tabla 5.52. Tabla ANOVA para dureza JANKA por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,74697	2	0,873485	5,85	0,0040
Intra grupos	14,4921	97	0,149403		
Total (Corr.)	16,2391	99			

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.53. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	0,245415	0,190872
Radial - Tangencial	*	0,297725	0,183384
Semirradial - Tangencial		0,0523099	0,190872

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la dureza JANKA con respecto a la sección radial.

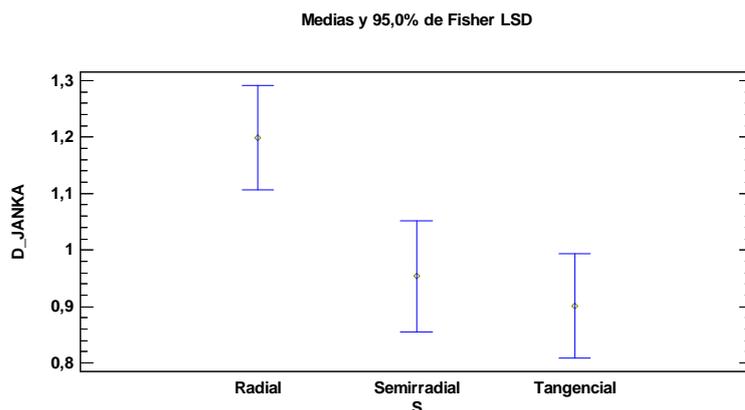


Figura 5.13. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método JANKA para el *Populus x euramericana* I-214 por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Se pueden observar diferencias estadísticamente significativas para la sección radial con respecto a las otras secciones. La sección radial presenta unos valores de dureza JANKA más elevados que en las secciones semirradial y tangencial.

- ***Populus x euramericana* I-214, Dureza BRINELL:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método JANKA para *Populus x euramericana* I-214.

Tabla 5.54. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,332349	0,718086			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		0,330195	0,302992	1,18762	0,6420
Radial / Tangencial		0,330195	0,269069	1,50596	0,2549
Semirradial / Tangencial		0,302992	0,269069	1,26805	0,5165

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la varianza.

Tabla 5.55. Tabla ANOVA para dureza BRINELL por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7,58655	2	3,79327	41,48	0,0000
Intra grupos	8,50459	93	0,0914472		

Total (Corr.)	16,0911	95			
---------------	---------	----	--	--	--

Puesto que el P-valor es menor que 0,05, podemos asegurar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las distintas especies, con un nivel de confianza del 95%.

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.56. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	0,495968	0,147253
Radial - Tangencial	*	0,668204	0,145986
Semirradial - Tangencial	*	0,172236	0,150556

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la dureza BRINELL con respecto a las tres secciones.

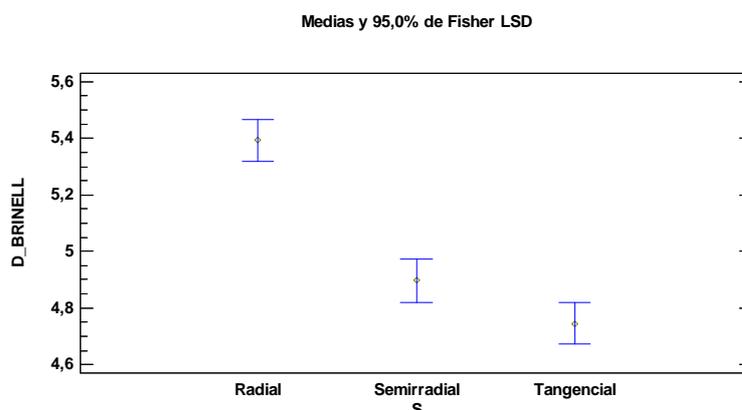


Figura 5.14. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método BRINELL para el *Populus x euramericana* I-214 por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Se pueden observar diferencias estadísticamente significativas entre las tres secciones, siendo la sección de mayor dureza BRINELL la sección radial y la de menor dureza BRINELL la sección tangencial, encontrándose en el medio la sección semirradial.

- ***Pinus sylvestris*, Dureza JANKA:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método JANKA para *Pinus sylvestris*.

Tabla 5.57. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	0,454207	0,636323			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		1,21312	1,11468	1,18442	0,6392
Radial / Tangencial		1,21312	1,35113	0,806139	0,5457
Semirradial / Tangencial		1,11468	1,35113	0,680618	0,2870

Como el valor-P es superior a 0,05 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 la varianza.

Tabla 5.58. Tabla ANOVA para dureza JANKA por secciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	126,75	2	63,3749	41,80	0,0000
Intra grupos	144,029	95	1,51609		
Total (Corr.)	270,779	97			

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

Se realiza una prueba de múltiples rangos en busca de los grupos diferenciados.

Tabla 5.59. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial	*	2,07655	0,606463
Radial - Tangencial		-0,587129	0,60178
Semirradial - Tangencial	*	-2,66368	0,606463

* indica una diferencia significativa.

Se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la dureza JANKA con respecto a la sección semirradial.

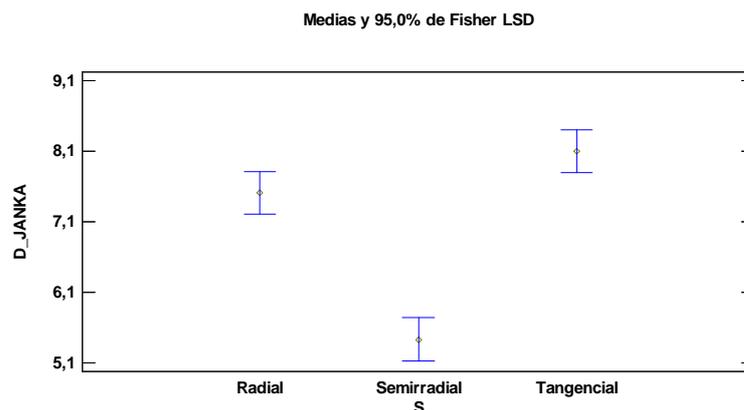


Figura 5.15. Gráfico de medias para el nivel de dureza por el método JANKA para el *Pinus sylvestris* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

Se observan diferencias estadísticamente significativas para la sección semirradial donde aparece con una menor dureza JANKA con respecto a las secciones radial y tangencial.

- ***Pinus sylvestris*, Dureza BRINELL:**

Se lleva a cabo la prueba de Levene para el nivel de dureza por el método BRINELL para *Pinus sylvestris*.

Tabla 5.60. Prueba de Levene.

	Prueba	Valor-P			
Levene	12,0833	0,0000208647			
Comparación		Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
Radial / Semirradial		0,800871	1,40859	0,323264	0,0021
Radial / Tangencial		0,800871	0,699519	1,31077	0,4433
Semirradial / Tangencial		1,40859	0,699519	4,0548	0,0001

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

Tabla 5.61. Prueba Kruskal-Wallis para dureza BRINELL en las secciones.

S	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Radial	33	56,2424
Semirradial	32	42,3125

Tangencial	34	51,1765
------------	----	---------

Estadístico = 3,90803 Valor-P = 0,141704

De aquí se llega a la conclusión por tener un Valor-P mayor de 0,05 que no existen diferencias significativas entre grupos.

Se realiza una prueba de múltiples rangos.

Tabla 5.62. Contraste entre secciones con un nivel de confianza del 95%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Radial - Semirradial		0,477078	0,498034
Radial - Tangencial		0,127438	0,490541
Semirradial - Tangencial		-0,34964	0,494415

* indica una diferencia significativa.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % para la dureza BRINELL con respecto a las secciones.

Gráfico de Medianas con Intervalos del 95,0% de Confianza

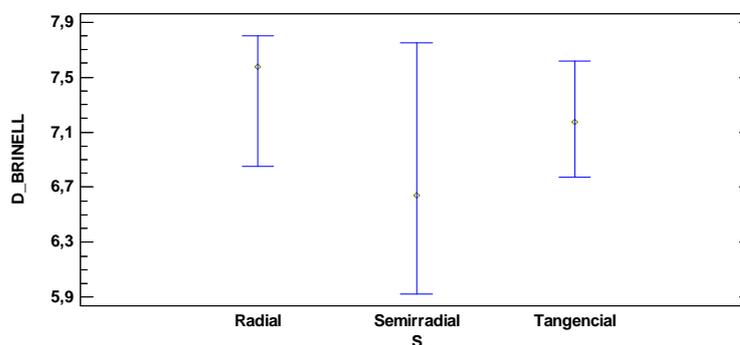


Figura 5.16. Gráfico de medianas para el nivel de dureza por el método BRINELL para el *Pinus sylvestris* por secciones para un nivel de confianza del 95%.

No se encuentran diferencias estadísticamente significativas para las tres secciones con respecto a la dureza BRINELL.

En la gran parte de los análisis de varianza realizados de dureza por los métodos JANKA y BRINELL con respecto a las secciones de madera, se han obtenido por lo general unos valores superiores de dureza en la sección radial.

5.3 REGRESIONES:

5.3.1 Regresiones por especies para la densidad en función de la penetración media:

A continuación se realizará un análisis en el que trataremos de establecer la relación existente entre los valores de penetración media obtenidos y los valores de densidad. Para ello utilizaremos el método de regresión simple. Se procederá a un análisis de cada especie y posteriormente se analizarán todas las especies en conjunto.

Tabla 5.63. Densidad en función de la penetración media.

Densidad en función de la penetración media				
Fuente	Especie	R ² (ajustado para g.l.)	C.C.	Modelo ajustado
Propia	<i>Q. pyrenaica</i>	84,55%	0,92034	Densidad = 0,000297413 + 0,000125151 * Penetración media
Propia	<i>P. pinaster</i>	41,88%	0,651697	Densidad = 268,511 + (2822,57/ Penetración media)
Propia	<i>P. x euramericana</i>	23,90%	0,496632	Densidad = 1/ (0,00239139 + 0,0000393892 * Penetración media)
Propia	<i>P. sylvestris</i>	42,43%	0,655806	Densidad = 1/ (0,000865411 + 0,0000822528 * Penetración media)
Bobadilla, I. et al (2007)	<i>P. pinaster</i>	63% (*)	-	Densidad = 741,496 - 20,83 * Penetración media
Bobadilla, I. et al (2007)	<i>P. sylvestris</i>	63% (*)	-	Densidad = 722,6209 - 20,83 * Penetración media

(*) R² conjunta para el modelo ajustado de cuatro especies del genero *Pinus*.

- ***Quercus pyrenaica*:**

En *Quercus pyrenaica*, el coeficiente de correlación indica una relación fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 84,54 % de la variabilidad entre densidad y penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre densidad y penetración media (Figura 5.17.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación fuerte entre ambas variables.

- ***Pinus pinaster*:**

En *Pinus pinaster*, el coeficiente de correlación indica una relación ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 41,88 % de la variabilidad entre densidad y penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre densidad y penetración media (Figura 5.18.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación ligera entre ambas variables. Los valores obtenidos frente a los de Bobadilla I. et al (2007) son algo menores, causados por errores en las mediciones por la sensibilidad de la máquina de ensayo IBERTEST.

- ***Populus x euramericana I-214:***

En *Populus x euramericana* el coeficiente de correlación indica una relación moderadamente ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 23,89 % de la variabilidad entre densidad y penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre densidad y penetración media (Figura 5.19.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación muy ligera entre ambas variables.

- ***Pinus sylvestris:***

En *Pinus sylvestris* el coeficiente de correlación indica una relación ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 42,42 % de la variabilidad entre densidad y penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre densidad y penetración media (Figura 5.20.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación ligera entre ambas variables. Los valores obtenidos frente a los de Bobadilla I. et al (2007).

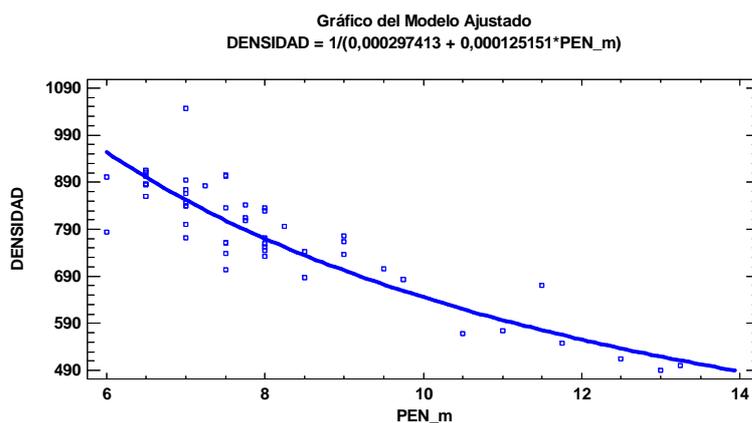


Figura 5.17. Gráfico del modelo ajustado para la densidad en función de la penetración media en *Quercus pyrenaica*.

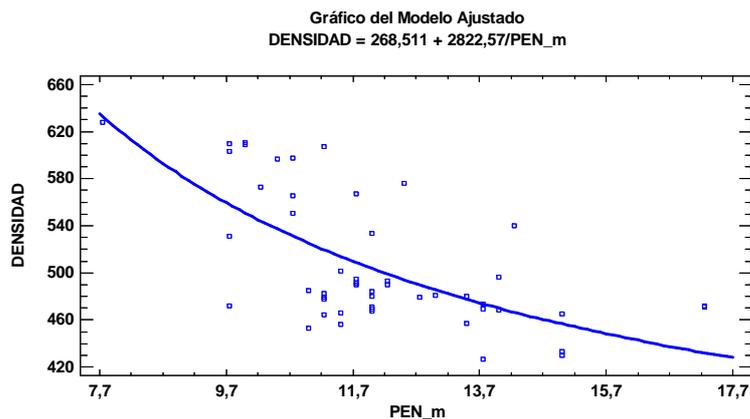


Figura 5.18. Gráfico del modelo ajustado para la densidad en función de la penetración media en *Pinus pinaster*.

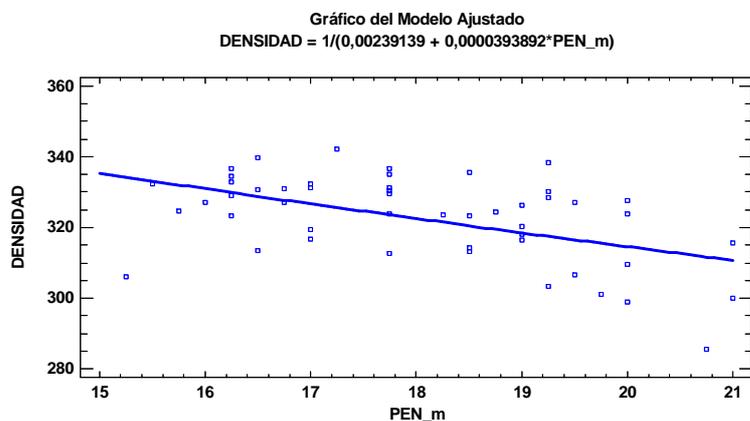


Figura 5.19. Gráfico del modelo ajustado para la densidad en función de la penetración media en *Populus x euramericana* I-214.

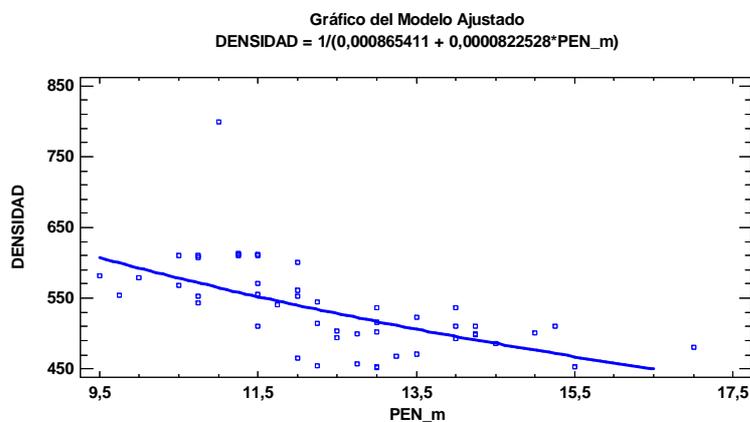


Figura 5.20. Gráfico del modelo ajustado para la densidad en función de la penetración media en *Pinus sylvestris*.

5.3.2 Regresiones para la densidad y penetración media:

Se realiza un análisis de la varianza para las cuatro especies, para la densidad en función de la penetración media

Tabla 5.64. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,18756E7	7	1,69651E6	879,25	0,0000
Residuo	756362,	392	1929,49		
Total (Corr.)	1,2632E7	399			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de densidad y la variable penetración media, 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 estas regresiones son los siguientes:

R-Cuadrada = 94,0123 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,9054 %

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 94,0123% de la variabilidad en densidad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 93,9054%. Estas cifras indican una muy fuerte relación entre la densidad y la penetración media. Dado que el valor-P es menor que 0,05, esto es indicativo de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

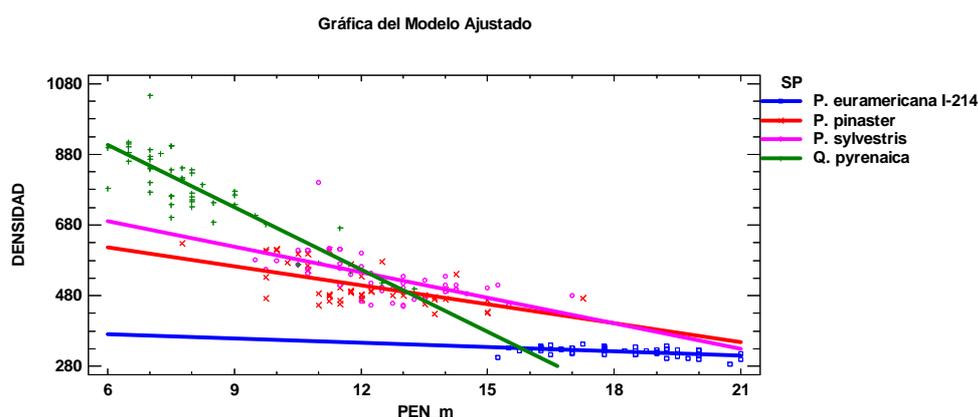


Figura 5.21. Gráfico del modelo ajustado para la densidad en función de la penetración media para las 4 especies.

5.3.3 Regresiones por especies para la dureza media JANKA y dureza media BRINELL en función de la densidad:

A continuación se realizará un análisis en el que trataremos de establecer la relación existente entre los valores de densidad obtenidos y los valores de dureza media JANKA y BRINELL. Para ello se utiliza el método de regresión simple. Se procederá a un análisis de cada especie y posteriormente se analizarán todas las especies en conjunto para el método JANKA, dadas las dificultades mostradas con este tipo de predicción para el método BRINELL.

Tabla 5.65. Dureza media en función de la densidad.

Dureza media en función de la densidad				
Método	Especie	R ² (ajustado para g.l.)	C.C.	Modelo ajustado
JANKA	<i>Q. pyrenaica</i>	90,50%	-0,951812	Dureza media JANKA = $1/(0,969574 - 0,134269 * \text{Ln}(\text{Densidad}))$
	<i>P. pinaster</i>	14,69%	0,394393	Dureza media JANKA = $0,969574 + 0,134269 * \text{Densidad}$
	<i>P. x euramericana</i>	-	-	-
	<i>P. sylvestris</i>	70,29%	-0,840188	Dureza media JANKA = $20,4914 - 7043,27 * \text{Densidad}$
BRINELL	<i>Q. pyrenaica</i>	75,12%	-0,868179	Dureza media BRINELL = $9,54482 - 1419,7 * \text{Densidad}$
	<i>P. pinaster</i>	9,82%	0,327629	Dureza media BRINELL = $4,45107 + 0,00276853 * \text{Densidad}$
	<i>P. x euramericana</i>	23,78%	0,495492	Dureza media BRINELL = $1,42695 + 0,0111895 * \text{Densidad}$
	<i>P. sylvestris</i>	14,55%	0,392572	Dureza media BRINELL = $1/(0,0739798 + 34,9111 * \text{Densidad})$

- ***Quercus pyrenaica*:**

En la especie *Quercus pyrenaica* el coeficiente de correlación indica una relación fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 90,50 % de la variabilidad entre la dureza JANKA y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos la regresión entre dureza JANKA y la densidad (Figura 5.22.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación fuerte entre ambas variables.

En cuanto al método BRINELL, el coeficiente de correlación indica una relación fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 75,1222 % de la variabilidad entre la dureza media BRINELL y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos la regresión entre dureza media BRINELL y la densidad (Figura 5.23.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación fuerte entre ambas variables.

- ***Pinus pinaster*:**

En la especie *Pinus pinaster* el coeficiente de correlación indica una relación muy ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 14,69 % de la variabilidad entre dureza JANKA media y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos la regresión entre dureza JANKA media y la densidad (Figura 5.24.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación muy ligera entre ambas variables, esto es debido a la baja densidad y baja dureza de dicha especie.

En cuanto al método BRINELL, el coeficiente de correlación indica una relación muy ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 9,82322 % de la variabilidad entre la dureza media BRINELL y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos la regresión entre dureza media BRINELL y la densidad (Figura 5.25.), no muestran semejanzas en los resultados, no obteniéndose una relación entre ambas variables o siendo muy ligera, derivado de la falta de precisión en maderas de densidades bajas como la presente de *Pinus pinaster*.

- ***Populus x euramericana I-214*:**

En lo referente a la especie *Populus x euramericana I-214*, los valores obtenidos en la regresión de la dureza media JANKA en función de la densidad no son los esperados por ausencia de una relación entre ambas variables debido al error en la precisión del método, originado por el material utilizado así como la precisión de este. El mayor error producido deriva de la precisión de medición de la máquina universal de ensayo IBERTEST en la medición de los valores de dureza en escalas pequeñas especialmente en maderas más blandas y con menor densidad como ocurre en la especie *Populus x euramericana I-214*.

En el método BRINELL, el coeficiente de correlación indica una relación ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 23,7813 % de la variabilidad entre la dureza media BRINELL y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza media BRINELL y la densidad (Figura 5.26), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación ligera entre ambas variables.

Esta relación muy ligera entre ambas variables, es derivada de la falta de precisión en maderas de densidades bajas como la presente de *Populus x euramericana*.

- ***Pinus sylvestris*:**

En la especie *Pinus sylvestris* el coeficiente de correlación indica una relación fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 70,29 % de la variabilidad entre dureza JANKA media y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza JANKA media y la densidad (Figura 5.27.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación fuerte entre ambas variables.

En lo referente al método BRINELL, el coeficiente de correlación indica una relación muy ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 14,5481 % de la variabilidad entre la dureza media BRINELL y la densidad. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza media BRINELL y la densidad (Figura 5.28.), no muestran semejanzas en los resultados, no obteniéndose una relación entre ambas variables o siendo muy ligera. Se ha obtenido una relación muy ligera entre ambas variables, derivado de la falta de precisión en maderas de densidades bajas como la presente de *Pinus sylvestris*.

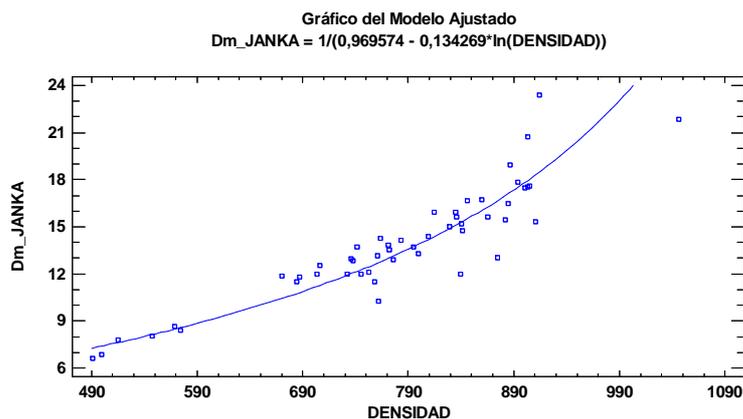


Figura 5.22. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la densidad para *Quercus pyrenaica*.

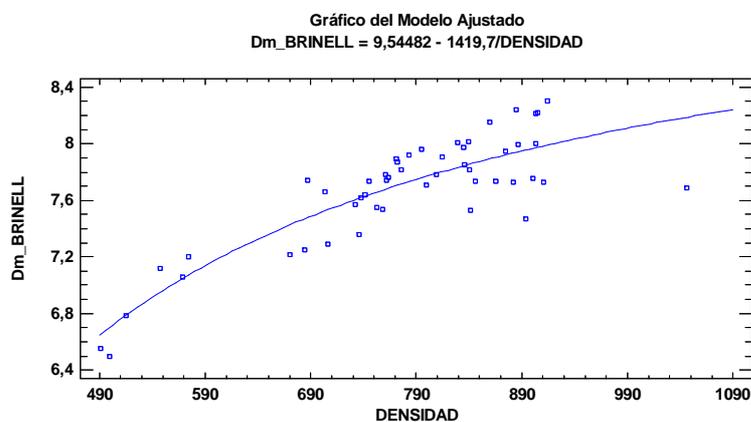


Figura 5.23. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media BRINELL en función de la densidad para *Quercus pyrenaica*.

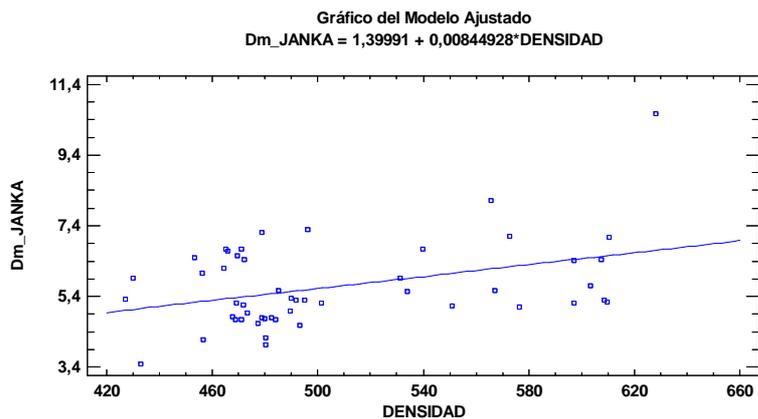


Figura 5.24. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la densidad para *Pinus pinaster*.

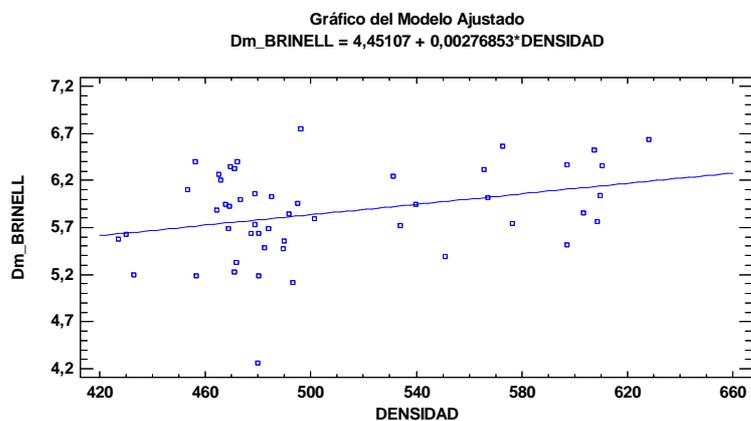


Figura 5.25. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media BRINELL en función de la densidad para *Pinus pinaster*.

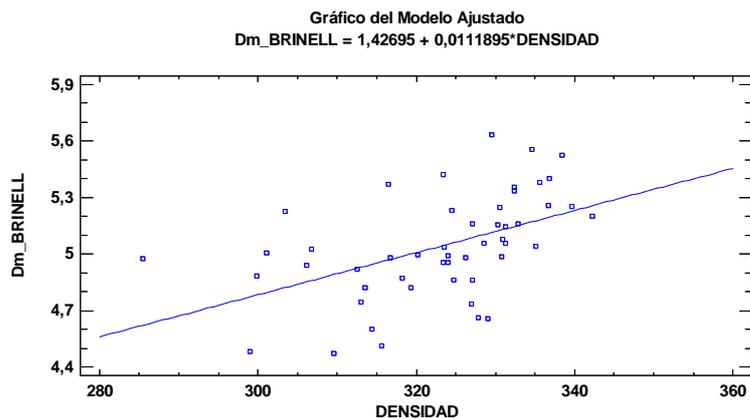


Figura 5.26. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media BRINELL en función de la densidad para *Populus x euramericana*.

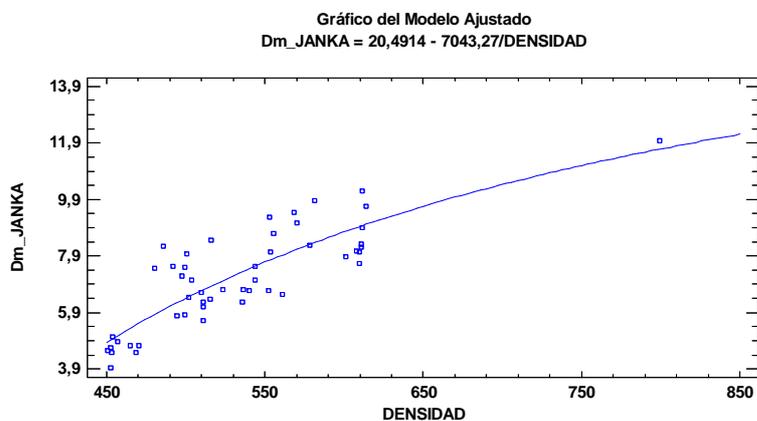


Figura 5.27. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la densidad para *Pinus sylvestris*.

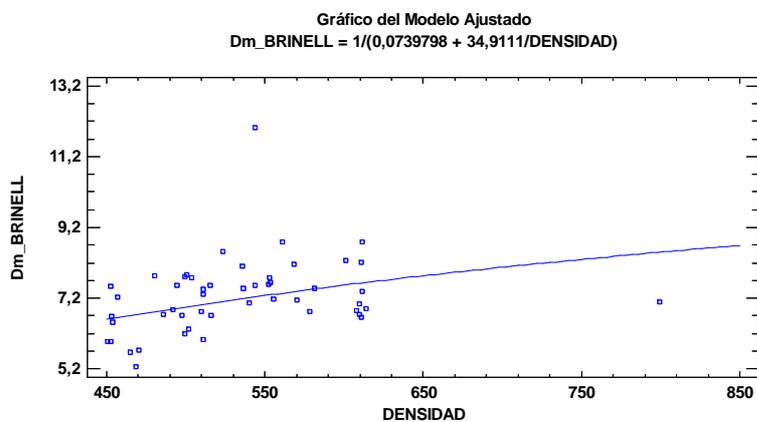


Figura 5.28. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media BRINELL en función de la densidad para *Pinus sylvestris*.

5.3.4 Regresiones para la dureza media JANKA en función de la densidad:

Se realiza un análisis de la varianza para las cuatro especies, para la dureza media JANKA en función de la densidad.

Tabla 5.66. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	9755,07	7	1393,58	1234,47	0,0000
Residuo	442,524	392	1,12889		
Total (Corr.)	10197,6	399			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre dureza media JANKA 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 estas regresiones son los siguientes:

R-Cuadrada = 95,6605 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 95,583 %

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95,6605 % de la variabilidad en densidad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 95,583 %. Estas cifras indican una muy fuerte relación entre la dureza media JANKA y la densidad. Dado que el valor-P es menor que 0,05, esto es indicativo de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

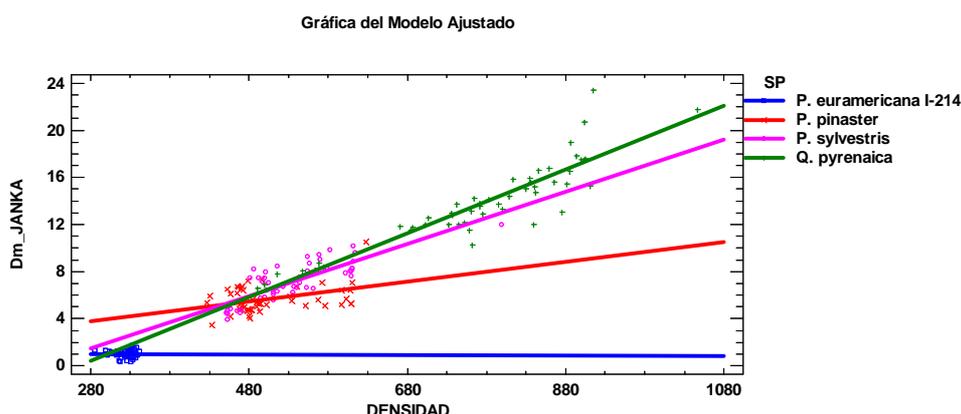


Figura 5.29. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la densidad para las cuatro especies.

5.3.5 Regresiones para dureza media BRINELL en función de la densidad:

Se realiza un análisis de la varianza para las cuatro especies, para la dureza media BRINELL en función de la densidad.

Tabla 5.67. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	472,643	7	67,5204	203,93	0,0000
Residuo	129,791	392	0,3311		
Total (Corr.)	602,434	399			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de densidad y la variable penetración media, 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 estas regresiones son los siguientes:

R-Cuadrada = 78,4555 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 78,0708 %

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 78,4555 % de la variabilidad en densidad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 78,0708 %. Estas cifras indican una muy fuerte relación entre la dureza media BRINELL y la densidad. Dado que el valor-P es menor que 0,05, esto es indicativo de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

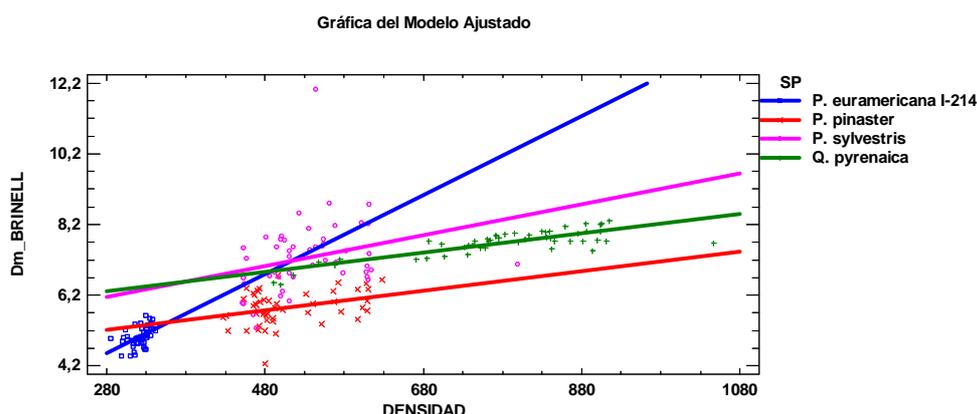


Figura 5.30. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media BRINELL en función de la densidad para las cuatro especies.

5.3.6 Regresiones por especies para la dureza media JANKA en función de la penetración media:

A continuación se realizará un análisis en el que trataremos de establecer la relación existente entre los valores de penetración media obtenidos y los valores de dureza media JANKA. Para ello utilizaremos el método de regresión simple. Se procederá a un análisis de cada especie y posteriormente se analizarán todas las especies en conjunto.

Tabla 5.68. Dureza media JANKA en función de la penetración media.

Dureza media JANKA en función de la penetración media			
Especie	R ² (ajustado para g.l.)	C.C.	Modelo ajustado
<i>Q. pyrenaica</i>	75,40%	0,869734	Dureza media JANKA=1/(-0,0161332 + 0,0114483 * Penetración media)
<i>P. pinaster</i>	20,23%	0,458667	Dureza media JANKA= 2,08478 + 42,5587* Penetración media
<i>P. x euramericana</i>	-	-	-
<i>P. sylvestris</i>	27,37%	0,530153	Dureza media JANKA= 0,0284291 + 87,6144 * Penetración media

- ***Quercus pyrenaica*:**

El coeficiente de correlación indica una relación muy fuerte entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 75,3951 % de la variabilidad entre la dureza JANKA media y la penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza media JANKA y la penetración media (Figura 5.31.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación fuerte entre ambas variables.

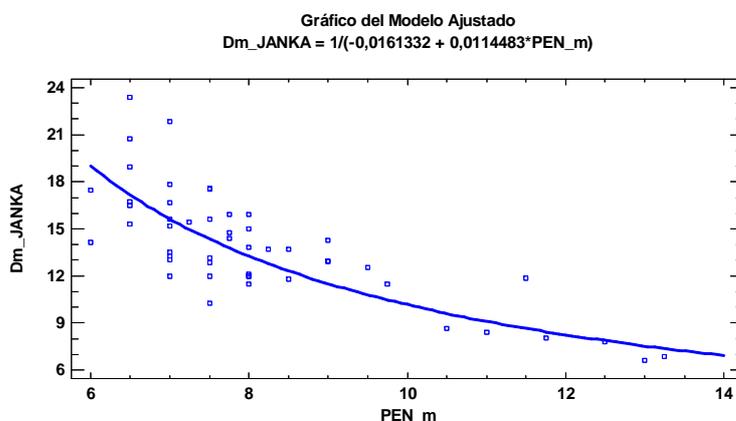


Figura 5.31. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la penetración media para *Quercus pyrenaica*.

- ***Pinus pinaster*:**

El coeficiente de correlación indica una relación ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 20,2318 % de la variabilidad entre la dureza JANKA media y la penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza media JANKA y la penetración media (Figura 5.32.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación ligera entre ambas variables.

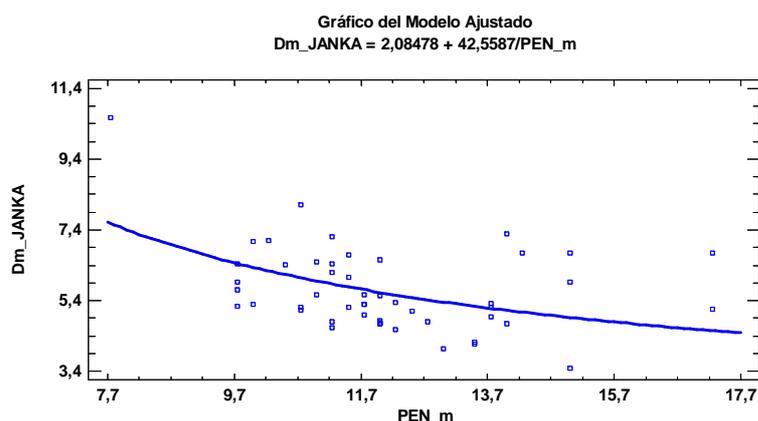


Figura 5.32. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la penetración media para *Pinus pinaster*.

- ***Populus x euramericana I-214*:**

Los valores obtenidos en la regresión de la dureza media JANKA en función de la penetración media no son los esperados por ausencia de una relación entre ambas variables debido al error en la precisión del método, originado por el material utilizado así como la precisión de este. El mayor error producido deriva de la precisión de medición de la máquina universal de ensayo IBERTEST en la medición de los valores de dureza en escalas pequeñas especialmente en maderas más blandas y con menor densidad como ocurre en la especie *Populus x euramericana I-214*.

- ***Pinus sylvestris*:**

El coeficiente de correlación indica una relación ligera entre las variables. Por su parte, el estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 27,3726 % de la variabilidad entre la dureza JANKA media y la penetración media. Como se puede observar en los análisis predictivos, la regresión entre dureza media JANKA y la penetración media (Figura 5.33.), muestra una semejanza en los resultados en cuanto que en ambos casos se obtiene una relación ligera entre ambas variables.

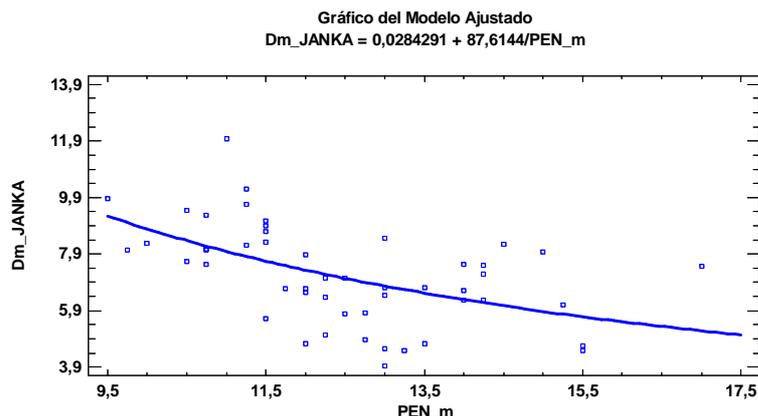


Figura 5.33. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la penetración media para *Pinus sylvestris*.

5.3.7 Regresiones para la dureza media JANKA en función de la penetración media:

Se realiza un análisis de la varianza para las cuatro especies, para la dureza media JANKA en función de la penetración media.

Tabla 5.69. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	9327,81	7	1332,54	600,57	0,0000
Residuo	869,776	392	2,21882		
Total (Corr.)	10197,6	399			

Como en los resultados del análisis de varianza, para la relación entre el nivel de densidad y la variable penetración media, 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 estas regresiones son los siguientes:

R-Cuadrada = 91,4708 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 91,3185%

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 91,4708 % de la variabilidad en densidad. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 91,3185%. Estas cifras indican una muy fuerte relación entre la dureza media JANKA y la densidad. Dado que el valor-P es menor que 0,05, esto es indicativo de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

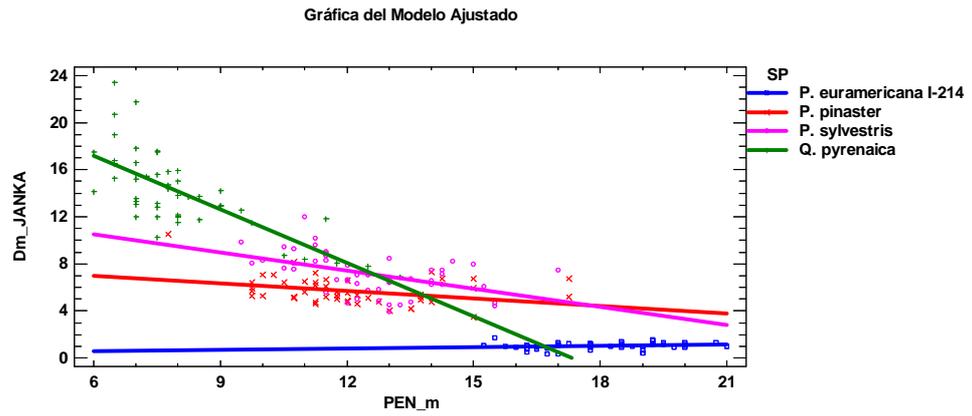


Figura 5.34. Gráfico del modelo ajustado para la dureza media JANKA en función de la penetración media para las cuatro especies.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES.

Se encuentran diferencias significativas en las cuatro especies para la **penetración entre especies**, con mayores valores para *Populus x eurameriacana* I-214, seguido de *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y finalmente con la menor penetración, *Quercus pyrenaica*. La **penetración por secciones** ha mostrado diferencias significativas entre distintas secciones para cada especie pero no se ha mantenido de manera homogénea que una misma sección obtuviera unas diferencias significativas independientemente de la especie.

En cuanto a la **densidad**, los mayores valores de densidad se corresponden con las menores penetraciones, encontrándose diferencias significativas, siendo *Quercus pyrenaica* la especie de mayor densidad, seguida de *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y finalmente *Populus x eurameriacana* I-214. Cabe destacar que *Pinus pinaster*, teniendo menor densidad que *Pinus sylvestris*, obtiene unos valores menores de penetración.

Para la **dureza por el método JANKA**, se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las cuatro especies, *Quercus pyrenaica* la que mayor dureza presenta seguida de *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y por último *Populus x euramericana* I-214. Los valores obtenidos relacionan a las especies de mayor densidad con mayores valores de dureza JANKA.

Entre secciones se encuentran diferencias estadísticamente significativas para la especie *Quercus pyrenaica* donde se obtienen unos mayores valores de dureza JANKA para la sección radial, seguidos de la sección tangencial y por último de la sección semirradial. Para la especie *Populus x euramericana* I-214 se obtienen diferencias para la sección radial siendo mayor la dureza que en las secciones tangencial y semirradial por el método JANKA. Para la especie *Pinus sylvestris* se obtienen unos mayores valores de dureza JANKA para la sección tangencial, seguida de la sección radial y por último la sección semirradial.

De igual manera, para la **dureza por el método BRINELL**, se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las cuatro especies correspondiendo la mayor dureza por el método BRINELL con la especie *Quercus pyrenaica*, seguida de *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y por último *Populus x euramericana* I-214. Los valores obtenidos relacionan a las especies de mayor densidad con mayores valores de dureza BRINELL.

En cuanto a la dureza BRINELL por secciones, se obtienen diferencias estadísticamente significativas para la especie *Quercus pyrenaica* obteniéndose una mayor dureza en la sección radial que en la sección tangencial (de igual manera como ocurría con el método JANKA). Para la especie *Populus x euramericana* I-214 se obtienen diferencias estadísticamente significativas entre la dureza por el método BRINELL entre secciones obteniéndose la mayor dureza para la sección radial, seguida de la semirradial y por último la sección tangencial.

Queda demostrada la dependencia de la variable **densidad** determinada mediante penetrómetro para la especie *Quercus pyrenaica* con una R^2 % ajust. de

84,55% con un coeficiente de determinación medio superior a 92% y con R^2 % ajust. con menores valores, superando el 41,00% para las especies *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*, contando con coeficientes de determinación superiores al 65%. Resultados que justifican su utilización como estimador de densidades especialmente para maderas duras 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. Se ha definido una regresión de predicción de la densidad en función de la densidad de la madera que podría utilizarse en el diagnóstico de madera puesta en obra para delimitar zonas sanas y zonas dañadas, con la limitación de la profundidad de penetración del penetrómetro.

Se comprueba la dependencia de la variable **dureza media** por el método **JANKA** según la **densidad**. La determinación de la dureza JANKA ha demostrado ser válida para la especie *Quercus pyrenaica* con una R^2 % ajust. de 90,50% con un coeficiente de determinación medio superior a 95% y para la especie *Pinus sylvestris* con una R^2 % ajust. de 70,29% con un coeficiente de determinación medio superior a 84%.

Se comprueba la dependencia de la variable **dureza media** por el método **BRINELL** según la **densidad**. La determinación de la dureza BRINELL ha demostrado ser válida para la especie *Quercus pyrenaica* con una R^2 % ajust. de 75,12% contando con un coeficiente de determinación medio superior a 86%.

Finalmente se comprueba la dependencia de la variable **dureza** por el método **JANKA** según la **penetración media**. La determinación de la dureza JANKA ha demostrado ser válida para la especie *Quercus pyrenaica* con una R^2 % ajust. de 75,40%, así como un coeficiente de determinación medio superior a 86%.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. FUENTES LITERARIAS

Guindeo, A.; García, E.; Peraza, F.; Arriaga, F.; Kasner, C.; Medina, G.; de Palacios, P.; Touza, M. (1997). **Especies de maderas**. AITIM.

Vignote-Peña, S. y Martínez Rojas, I. (2006). **Tecnología de la madera**. 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Vignote-Peña, S., Jiménez-Peris, F., Morales Méndez, E. y Gómez Pérez, C. (2000). **Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica**. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Mundi-Prensa.

Jonson, H. (1994). **La madera**. Ed. Blume, Barcelona

Casado Sanz, M. y Acuña Rello, L. (2000). **La madera en la construcción**. Universidad de Valladolid, E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia, Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario Itagra C.T., Palencia.

García Esteban, L., Guindeo Casasús, A., Peraza Oramas, C. y de Palacios de Palacios, P. (2003). **La madera y su anatomía: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular**. Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Jiménez Peris, F. J. (1999). **La madera: propiedades básicas**. Ed. GET Grupo Estudios Técnicos.

Peraza Sánchez, F., Arriaga Martitegui, F., Guindeo Casasús, A., García Esteban, L., Kasner Camacho, C., Medina Gallego, G., de Palacios de Palacios, P. y Touza Vázquez, M. (2004). **Especies de madera para carpintería, construcción y mobiliario**. Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera y Corcho, AITIM.

Wilson, K. & White, D. J. B. (1986). **The anatomy of wood: its diversity and variability**. Stobart & Son LTD, London.

Bobadilla, I., G. Íñiguez, M. Esteban, F. Arriaga, L. Casas. (2007). **Informes de la Construcción, Vol. 59, 506, 107-116**. AITIM.

Bobadilla, I., G. Íñiguez, M. Esteban, F. Arriaga, L. Casas. (2009). **Técnicas no destructivas en la inspección de estructuras de madera I: el penetrómetro**. AITIM.

7.2. PÁGINAS WEB:

<http://www.infomadera.net>

<http://www.monografias.com>

<http://blog.expertosenparquet.com>

http://grupos.unican.es/acanto/aep/BoIPas/la_madera_BMVP-2001.htm

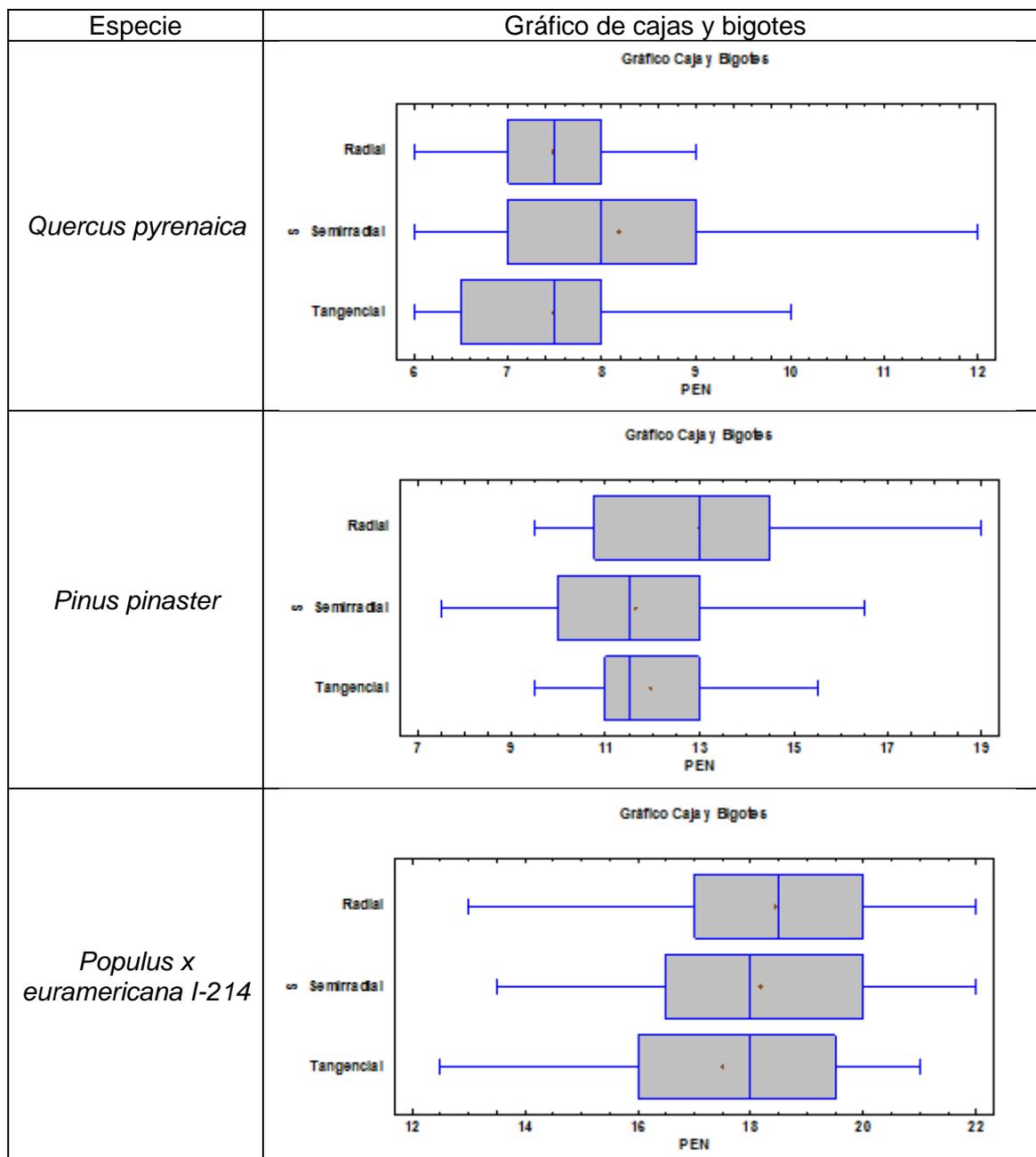
<http://www.fingerjoint.es/>

8. ANEXOS

8.1 ESTADÍSTICA COMPARATIVA:

8.1.1. Penetración:

8.1.1.1. Análisis por especies en función de las secciones:



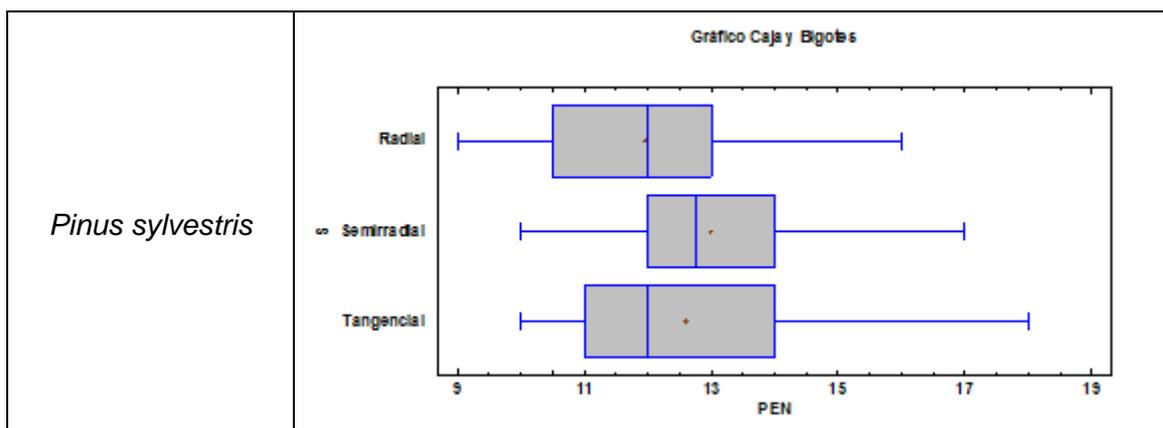


Figura a.1. Gráficos de cajas y bigotes para el nivel de penetración según la sección para las cuatro especies para un nivel de confianza del 95%.

8.1.1.2. Análisis entre especies:

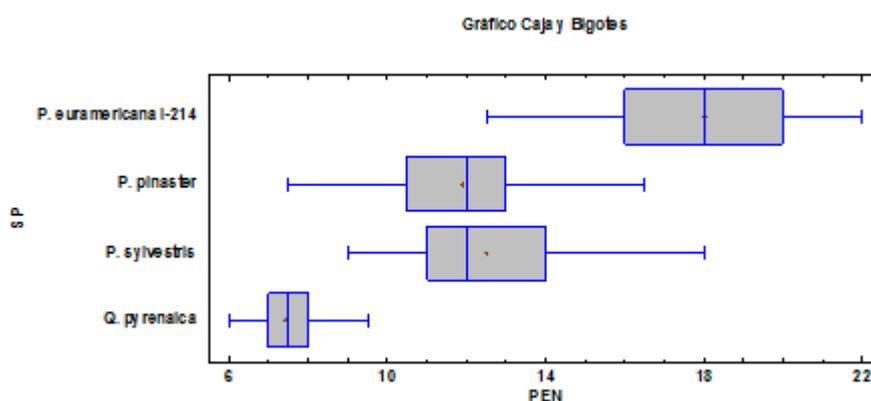


Figura a.2. Gráfico de cajas y bigotes para la penetración según la especie para un nivel de confianza del 95%.

8.1.2. Densidad:

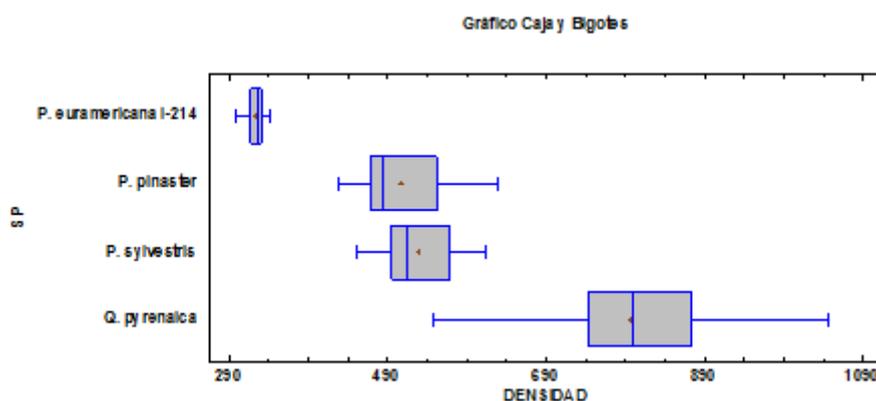
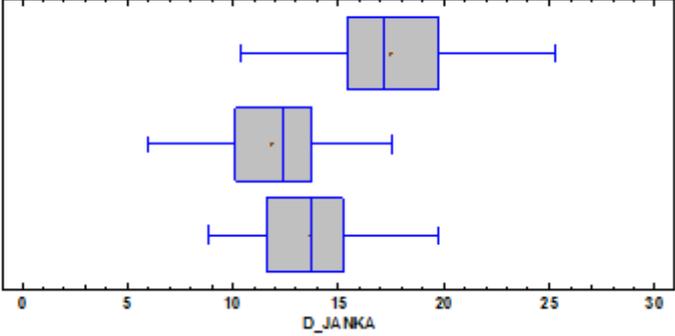
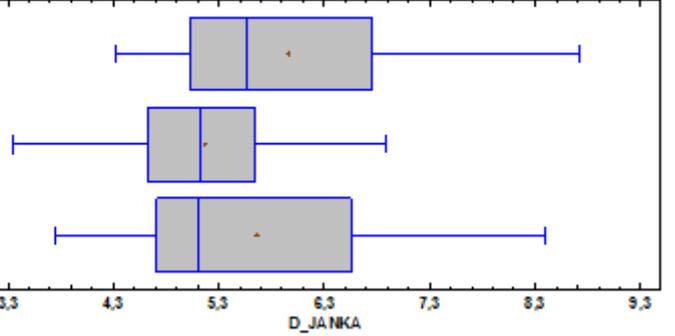
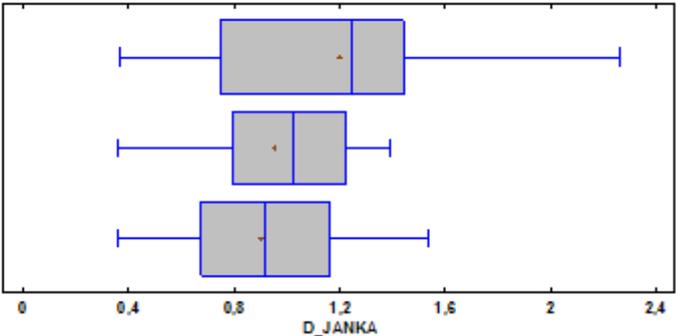


Figura a.3. Gráfico de cajas y bigotes para la densidad según la especie para un nivel de confianza del 95%.

8.1.3. Dureza JANKA:

8.1.3.1. Análisis por especies en función de las secciones:

Especie	Gráfico de cajas y bigotes
<i>Quercus pyrenaica</i>	<p style="text-align: center;">Gráfico Caja y Bigotes</p> 
<i>Pinus pinaster</i>	<p style="text-align: center;">Gráfico Caja y Bigotes</p> 
<i>Populus x euramericana I-214</i>	<p style="text-align: center;">Gráfico Caja y Bigotes</p> 

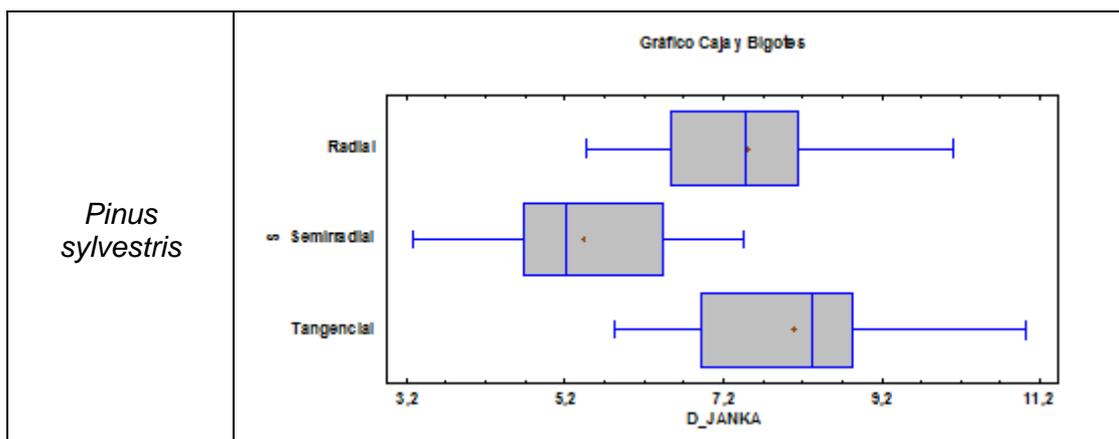


Figura a.4. Gráficos de cajas y bigotes para la dureza media JANKA según la sección para las cuatro especies para un nivel de confianza del 95%.

8.1.3.2. Análisis entre especies:

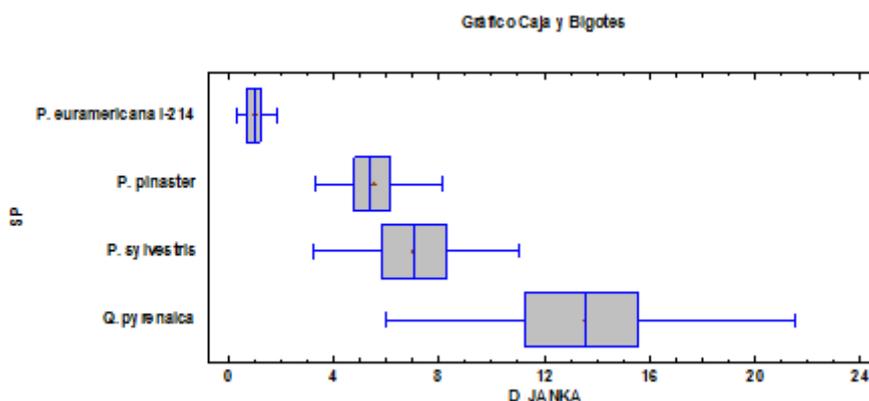
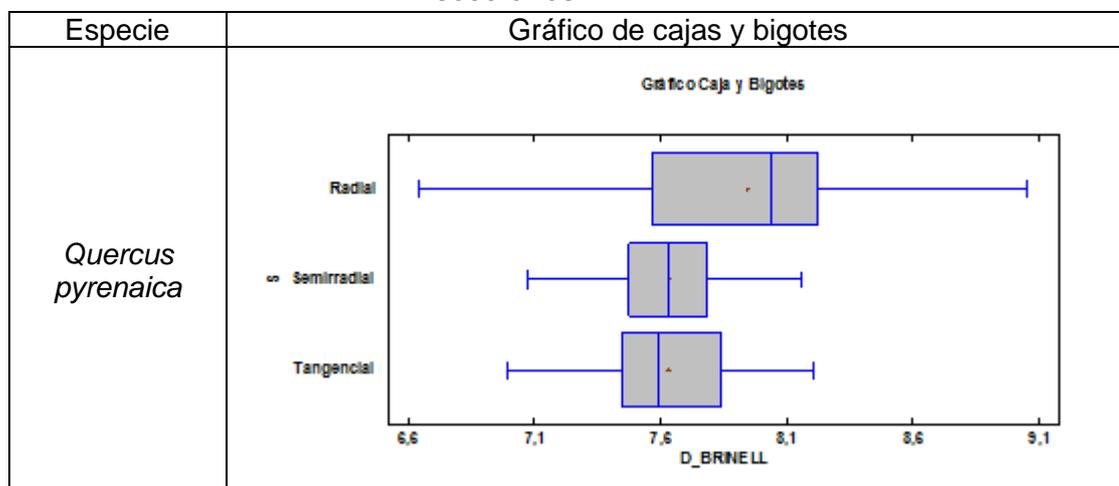


Figura a.5. Gráfico de cajas y bigotes para la dureza media JANKA según la especie para un nivel de confianza del 95%.

8.1.4. Dureza BRINELL:

8.1.4.1. Análisis por especies en función de las secciones:



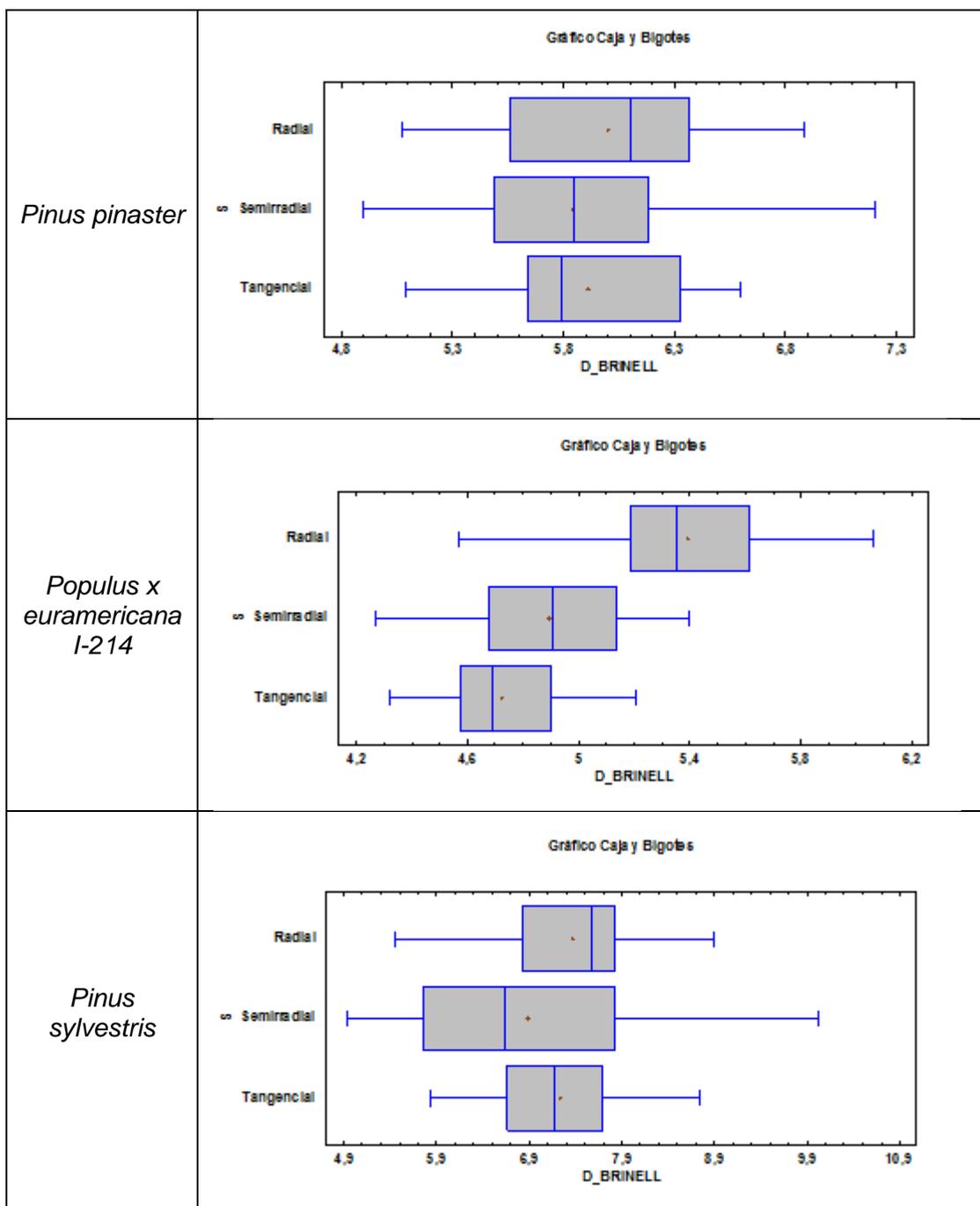


Figura a.6. Gráficos de cajas y bigotes para la dureza media BRINELL según la sección para las cuatro especies para un nivel de confianza del 95%.

8.1.4.2. Análisis entre especies:

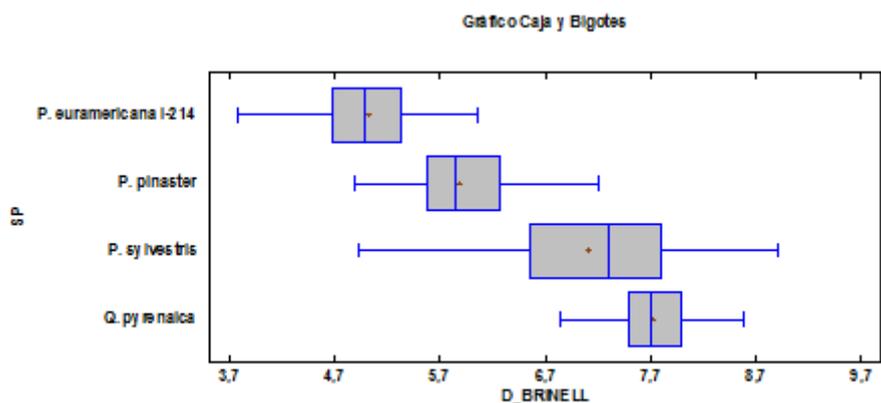


Figura a.7. Gráfico de cajas y bigotes para la dureza media BRINELL según la especie para un nivel de confianza del 95%.

8.2. REGRESIONES:

8.2.1. Regresiones de densidad en función de la penetración media.

Especie	Gráfico de residuos
<i>Quercus pyrenaica</i>	<p style="text-align: center;">Gráfico de Residuos $DENSIDAD = 1/(0,000297413 + 0,000125151 \cdot PEN_m)$</p>
<i>Pinus pinaster</i>	<p style="text-align: center;">Gráfico de Residuos $DENSIDAD = 268,511 + 2822,57/PEN_m$</p>

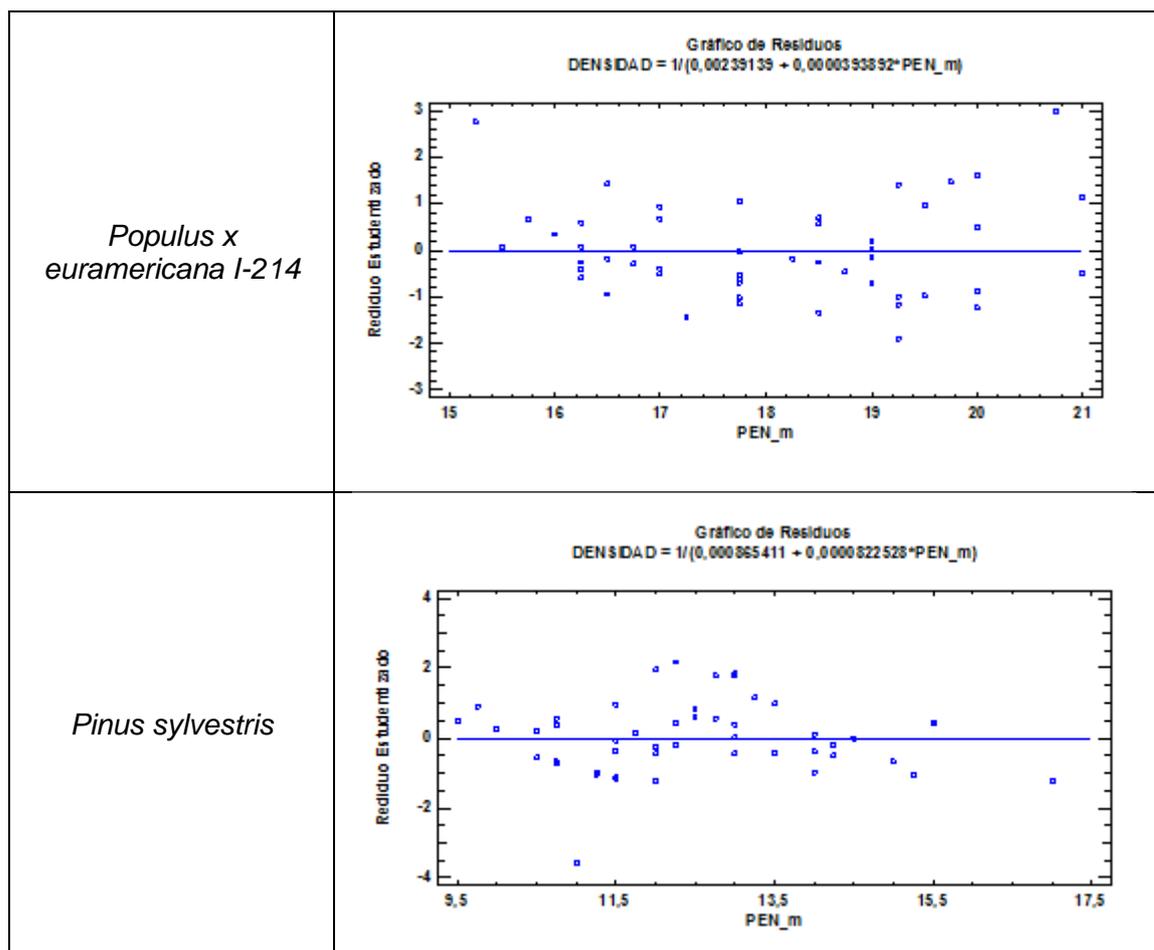
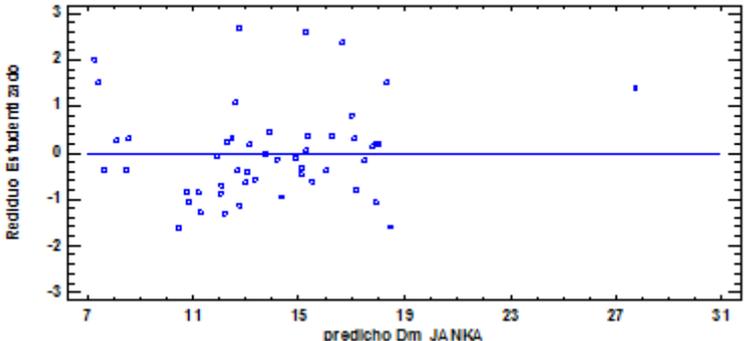
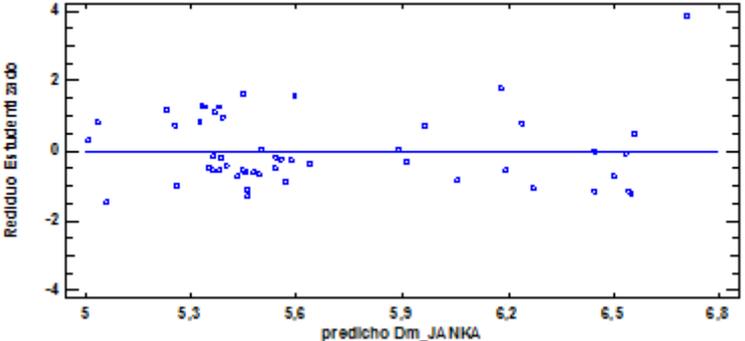
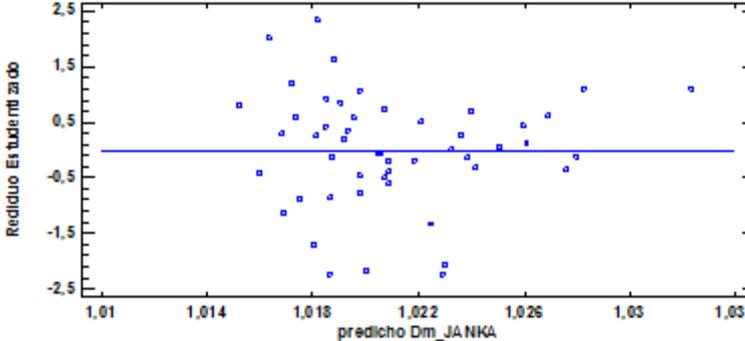


Figura a.8. Gráficos de residuos para las regresiones de densidad en función de la penetración media.

Tabla a.1. Pruebas de normalidad de los residuos para las regresiones de densidad en función de la penetración media.

Especie	Estadístico W de Shapiro-Wilk	P- valor
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,965828	0,0679843
<i>Pinus pinaster</i>	0,946245	0,00109712
<i>Populus x euramericana I-214</i>	0,956541	0,0109125
<i>Pinus sylvestris</i>	0,864062	3,19966E-13

8.2.2. Regresiones de dureza media JANKA en función de la densidad.

Especie	Gráfico de residuos
<i>Quercus pyrenaica</i>	<p data-bbox="774 331 1173 376">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = $1/(0,969574 - 0,134269 \cdot \ln(\text{DENSIDAD}))$</p> 
<i>Pinus pinaster</i>	<p data-bbox="790 779 1157 824">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = $1,39991 + 0,00844928 \cdot \text{DENSIDAD}$</p> 
<i>Populus x euramericana I-214</i>	<p data-bbox="805 1238 1173 1283">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = $1,11857 - 0,000302091 \cdot \text{DENSIDAD}$</p> 

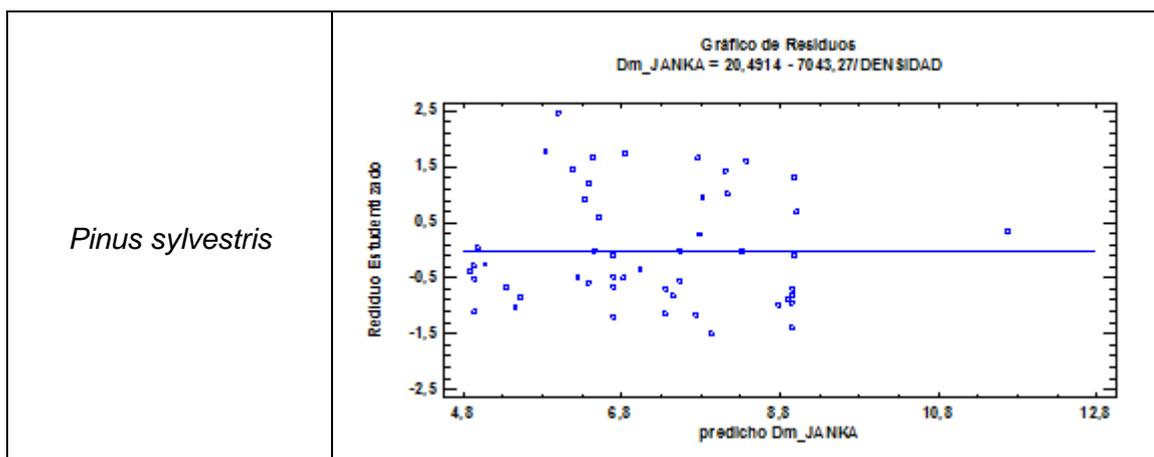
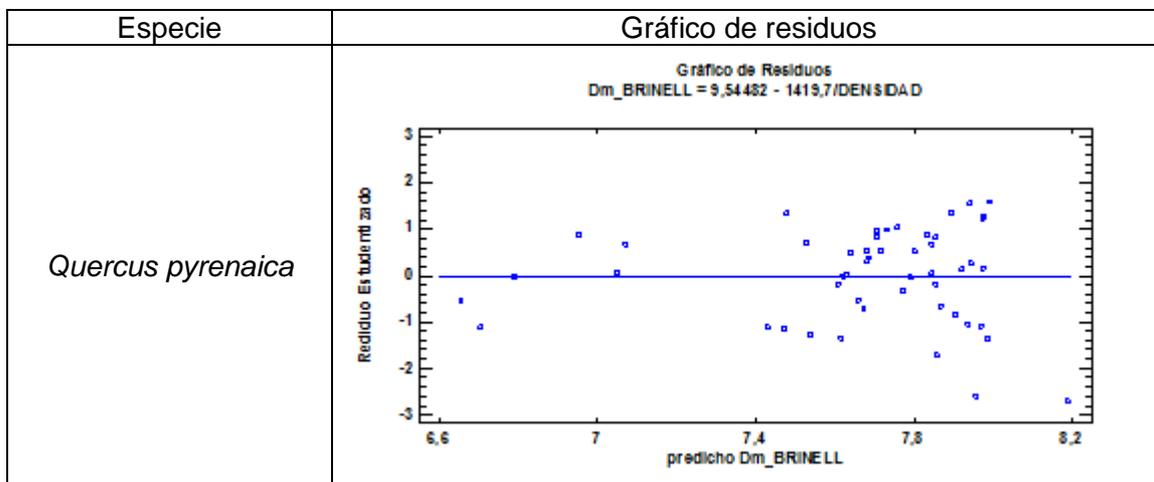


Figura a.9. Gráficos de residuos para las regresiones de dureza media JANKA en función de la densidad.

Tabla a.2. Pruebas de normalidad de los residuos para las regresiones de dureza media JANKA en función de la densidad.

Especie	Estadístico W de Shapiro-Wilk	P- valor
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,896378	2,61742E-9
<i>Pinus pinaster</i>	0,906696	4,3714E-8
<i>Populus x euramericana I-214</i>	0,953329	0,00546484
<i>Pinus sylvestris</i>	0,902695	1,47448E-8

8.2.3. Regresiones de dureza media BRINELL en función de la densidad.



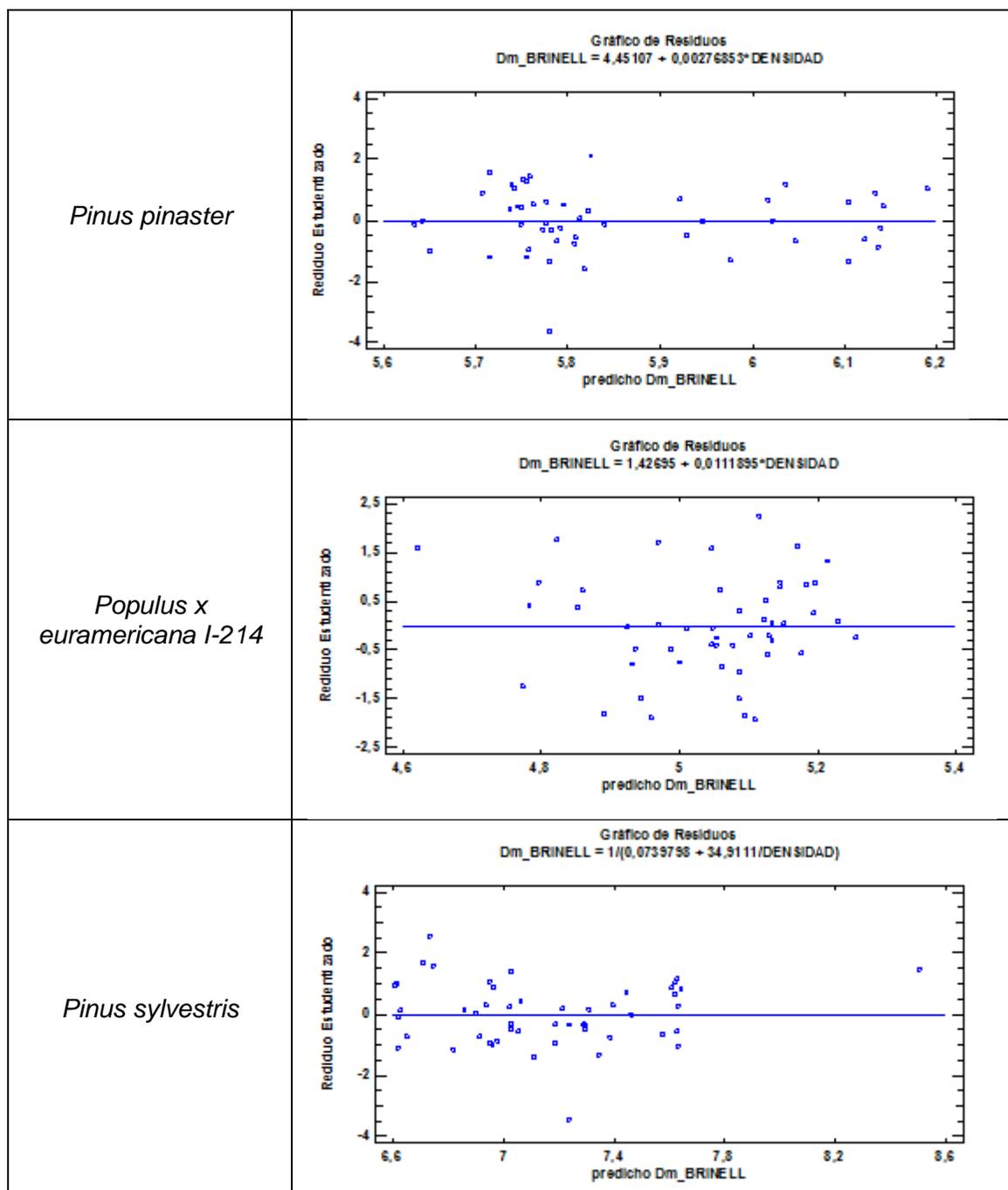
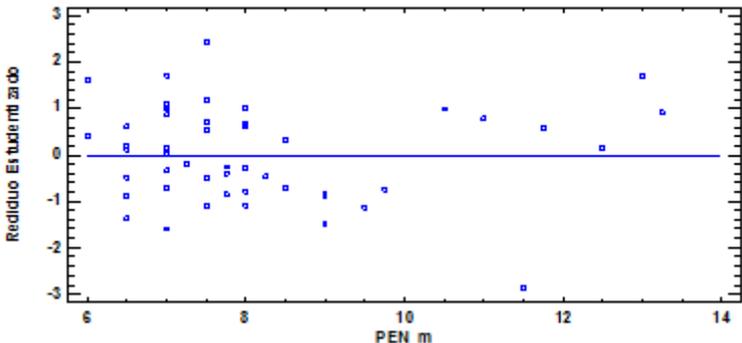
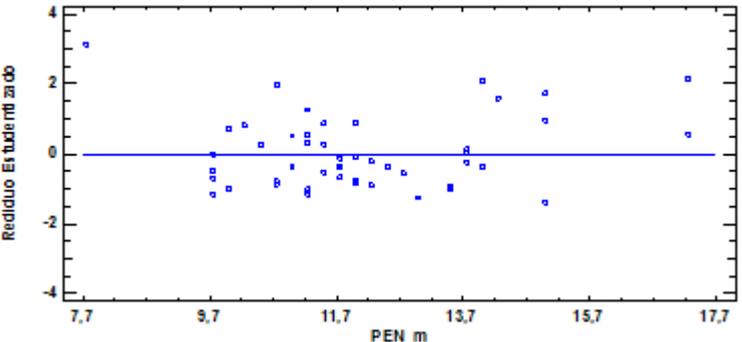
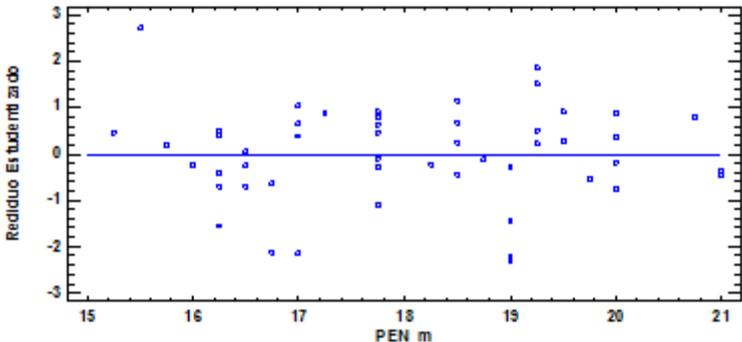


Figura a.10. Gráficos de residuos para las regresiones de dureza media BRINELL en función de la densidad.

Tabla a.3. Pruebas de normalidad de los residuos para las regresiones de dureza media BRINELL en función de la densidad.

Especie	Estadístico W de Shapiro-Wilk	P- valor
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,93879	0,000184117
<i>Pinus pinaster</i>	0,960709	0,0256783
<i>Populus x euramericana I-214</i>	0,958759	0,0173145
<i>Pinus sylvestris</i>	0,853679	1,70974E-14

8.2.4. Regresiones de dureza media JANKA en función de la penetración media.

Especie	Gráfico de residuos
<i>Quercus pyrenaica</i>	<p data-bbox="778 338 1150 376">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = 1/(-0,0161332 + 0,0114483*PEN_m)</p> 
<i>Pinus pinaster</i>	<p data-bbox="810 790 1114 828">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = 2,08478 + 42,5587/PEN_m</p> 
<i>Populus x euramericana I-214</i>	<p data-bbox="778 1238 1150 1276">Gráfico de Residuos Dm_JANKA = 0,706637 + 0,000959892*PEN_m^2</p> 

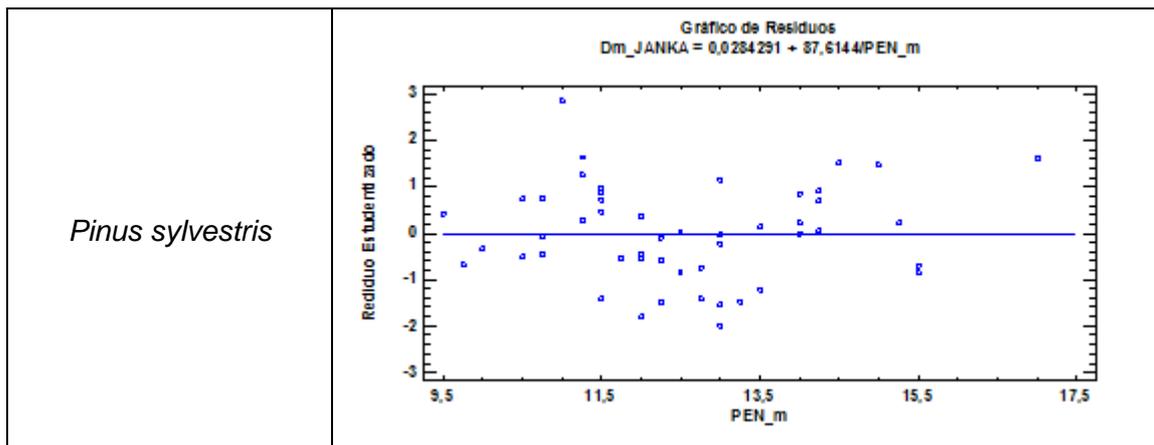


Figura a.11. Gráficos de residuos para las regresiones de dureza media JANKA en función de la penetración media.

Tabla a.4. Pruebas de normalidad de los residuos para las regresiones de dureza media JANKA en función de la penetración media.

Especie	Estadístico W de Shapiro-Wilk	P- valor
<i>Quercus pyrenaica</i>	0,966328	0,0743676
<i>Pinus pinaster</i>	0,901485	1,06022E-8
<i>Populus x euramericana I-214</i>	0,95337	0,00551456
<i>Pinus sylvestris</i>	0,970407	0,148545