



---

**Universidad de Valladolid**  
**Campus de Palencia**

## **ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Máster Universitario en Ingeniería de Montes**

CARACTERIZACIÓN ELASTO-MECÁNICA DE PROBETAS A  
ESCALA ESTRUCTURAL DE MADERA DE *PINUS RADIATA*  
D.DON Y *PINUS SYLVESTRIS* L.

**JULIO 2017**

**Alumno: MARÍA PAZ HERNÁNDEZ RUIZ**

**Tutora: MILAGROS CASADO SANZ**

**Cotutor: ROBERTO SAN MARTÍN FERNÁNDEZ**



# INDICE

<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. ESTADO ACTUAL DEL MERCADO DE LA MADERA Y DE LA INDUSTRIA FORESTAL.....	3
2.1.1. LA INFRAUTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES .....	3
2.1.2. ESTADO DEL MERCADO DE LA MADERA Y DE LA INDUSTRIA FORESTAL.	4
2.1.3. NECESIDAD DE INNOVACIÓN DE PROCESOS Y PRODUCTOS FORESTAL	4
2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS ESPECIES OBJETO DEL PRESENTE ESTUDIO.	5
2.2.1. DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L.....	5
2.2.2. DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL <i>PINUS RADIATA</i> D.DON.....	9
2.3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	12
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>4. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS PROBETAS UTILIZADAS.....	16
4.2. CLASIFICACIÓN VISUAL SEGÚN NORMA UNE-EN 56544:2011 .....	16
4.3. EQUIPOS DE TRABAJO EMPLEADOS .....	25
4.4. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	35
4.4.1. MATERIAL UTILIZADO .....	35
4.4.2. SELECCIÓN Y NUMERACIÓN DEL MATERIAL .....	35
4.4.3. MEDICIÓN DE DIMENSIONES Y DENSIDAD.....	36
4.4.4. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD.....	36
4.4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	37
4.4.5.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	38
4.4.5.2 ESTADÍSTICA COMPARATIVA.....	41
4.4.5.3. ESTADÍSTICA PREDICTIVA .....	43
4.5. ASIGNACIÓN DE CLASES RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 338:2016.	45
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>47</b>



5.1. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN VISUAL.....	47
5.2. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS POR ESPECIE	52
5.2.1. PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS DE <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. ....	52
5.2.2. PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS DE <i>PINUS RADIATA</i> D.DON.....	54
5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS POR ESPECIE .....	58
5.3.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MOE ESTIMADO UTILIZANDO EQUIPOS DE ULTRASONIDOS Y LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN SEGÚN NORMA EN 408 PARA <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. ....	58
5.3.1.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (PLG) EN PROBETAS DE <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. ....	58
5.3.1.2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO (SYLVATEST TRIO) Y (FAKOPP) EN PROBETAS DE <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. ....	59
5.3.1.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO FLEXIÓN (M-UN) EN PROBETAS DE <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. ....	59
5.3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MOE ESTIMADO UTILIZANDO EQUIPOS DE ULTRASONIDOS Y LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN SEGÚN NORMA EN 408 PARA <i>PINUS RADIATA</i> D.DON.....	62
5.3.2.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (PLG) EN PROBETAS DE <i>PINUS RADIATA</i> D.DON.....	62
5.3.2.2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO (SYLVATEST TRIO) Y (FAKOPP) EN PROBETAS DE <i>PINUS RADIATA</i> D.DON.....	62
5.3.2.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO FLEXIÓN (M-UN) EN PROBETAS DE <i>PINUS RADIATA</i> D.DON .....	63
5.3.3. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA .....	65
5.3.3.1. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON PLG.....	65
5.3.3.2. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON SYLVATEST TRIO® (MEDIDA DIRECTA).....	67
5.3.3.3. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON SYLVATEST TRIO® (MEDIDA INDIRECTA) .....	68



5.3.3.4. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON FAKOPP (MEDIDA DIRECTA).....	70
5.3.3.5 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON FAKOPP (MEDIDA INDIRECTA) .....	71
5.3.3.6. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL MOR OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN .....	73
5.3.3.7. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL MOEG OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN .....	74
5.3.3.8. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LA DENSIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA .....	76
5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A PARTIR DE VARIABLES MEDIDAS EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	77
5.5. RESULTADO DE LA ASIGNACIÓN DE CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 338:2016. ....	86
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>90</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>94</b>
8.1. RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS MOEd .....	94
8.2. GRÁFICO DE RESIDUOS PARA MOEd. HIPÓTESIS DE HOMOCEDASTICIDAD.....	103





## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

En la redacción de este TFM se han empleado acrónimos y abreviaturas que se han recogido en este apartado, con el fin de facilitar tanto su comprensión en la lectura como de referencia durante ella.

ANOVA	Análisis de la varianza
C.S.	Curtosis Estandariza
cm	Centímetro
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
C.V.	Coefficiente de Variación
d	Densidad
DD	Directa
Dimen.	Dimensiones
D.S.	Desviación Estándar
EFSOS	European Forest Sector Outlook Study
EN	Norma Europea
ETSIIAA	Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias
f	Frecuencia
FAK	Equipo de ultrasonidos Fakopp
H	Contenido de humedad
ha	Hectáreas
Hz	Hercios
IND	Indirecta
Kg	Kilogramo
m	Metro
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Max.	Valor Máximo
Mín.	Valor Mínimo
MOE	Módulo de Elasticidad
MOEd o E <i>dyn</i>	Módulo de Elasticidad Dinámico
MOEG	Módulo de Elasticidad Global a Flexión
MOR	Tensión de rotura a flexión/ Módulo de Rotura
MPa	Megapascal
M-UN	Maquina de Ensayos Universal
n	Número de muestras (probetas)
Parám.	Parámetro
PEM-CyL	Plan Estratégico de Movilización de Castilla y León
PLG	Equipo de vibraciones Portable Lumber Grader
R.	Rango
s	Segundo
SG. S.	Sesgo Estandarizado
SIMWOOD	SUSTAINABLE INNOVATIVE MOBILISATION OF WOOD
SYL	Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®
UD.	Unidad
UNE	Una Norma Española
V	Velocidad



V DD - FAK	Velocidad media Directa medida con equipo Fakopp
V DD - SYL	Velocidad media Directa medida con equipo Sylvatest Trio ®
V IND - FAK	Velocidad media Indirecta medida con equipo Fakopp
V IND - SYL	Velocidad media Indirecta medida con equipo Sylvatest Trio ®
V-PLG	Velocidad media medida con equipo de vibraciones Portable Lumber Grader



# ÍNDICE DE FIGURAS

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

**Figura 1:** Presencia de *Pinus sylvestris* L. en España. Fuente IFN ..... 6

**Figura 2:** Representación de la relación de comunidades autónomas con presencia de *Pinus sylvestris* L. en España. Elaboración propia a partir de datos del tercer IFN ..... 7

**Figura 3:** Presencia de *Pinus radiata* D.Don en España. Fuente IFN..... 9

**Figura 4:** Representación de la relación de comunidades autónomas con presencia de *Pinus radiata* D.Don en España. Elaboración propia a partir de datos del tercer IFN.. 10

## MATERIAL Y MÉTODOS

**Figura 5:** Dimensiones de una pieza de madera ..... 17

**Figura 6:** Criterio general de medición de nudos en cara y en canto ..... 17

**Figura 7:** Medición y evaluación de nudos de margen ..... 18

**Figura 8:** Criterios de medición y evaluación de nudos de arista..... 18

**Figura 9:** Criterios de medición de nudos agrupados ..... 19

**Figura 10:** Criterios de medición de fendas..... 20

**Figura 11:** Medición de la desviación de la fibra..... 21

**Figura 12:** Medición de la anchura máxima del anillo..... 21

**Figura 13:** Medición de las gemas ..... 22

**Figura 14:** Medida directa realizada con Sylvatest Trio ®. Elaboración propia ..... 25

**Figura 15:** Medida indirecta realizada con Sylvatest Trio ®. Elaboración propia ..... 25

**Figura 16:** Toma de medida directa con Sylvatest Trio ® en laboratorio ..... 26

**Figura 17:** Toma de medida indirecta con Sylvatest Trio ® en laboratorio ..... 26

**Figura 18:** Medida directa realizada con Microsecond Timer de Fakopp (MST).  
Elaboración propia ..... 27

**Figura 19:** Medida indirecta realizada con Microsecond Timer de Fakopp (MST).  
Elaboración propia ..... 27

**Figura 20:** Toma de medida directa e indirecta con Microsecond Timer de Fakopp  
(MST) ..... 27

**Figura 21:** Toma de medida con PLG (Portable Lumber Grader) ..... 28



<b>Figura 22:</b> Equipo de análisis de la vibración longitudinal (PLG). Fuente: Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural .....	29
<b>Figura 23:</b> Equipo PLG (Portable Lumber Grader) conectada a un ordenador y pantalla final en la que se muestra la medida de frecuencia de vibración en Hz.....	29
<b>Figura 24:</b> Vista general de la Máquina Universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest ® utilizada en los ensayos de flexión y de rotura .....	30
<b>Figura 25:</b> Interfaz en la que se muestran los parámetros característicos de uno de los ensayos ejecutado.....	30
<b>Figura 26:</b> Extensómetro o sensor de deformación y momento inmediatamente después de la ejecución del ensayo de rotura .....	31
<b>Figura 27:</b> Interfaz de resultados obtenida al finalizar un ensayo de flexión y de rotura .....	31
<b>Figura 28:</b> Estado de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de médula en las probetas.....	31
<b>Figura 29:</b> Estado de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de singularidades como nudos .....	32
<b>Figura 30:</b> Estado de una de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de desviación de fibra.....	32
<b>Figura 31:</b> Detalle de probetas pertenecientes al lote de <i>Pinus sylvestris</i> L. identificadas y preparadas para la posterior clasificación visual.....	32
<b>Figura 32:</b> Balanza de precisión digital .....	33
<b>Figura 33:</b> Detalle de los orificios en testas para la realización de la medida directa con equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ® .....	33
<b>Figura 34:</b> Detalle de los orificios en cantos para la realización de la medida indirecta con equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ® .....	34
<b>Figura 35:</b> Taladro eléctrico .....	34
<b>Figura 36:</b> Probeta de <i>Pinus radiata</i> D.Don con su código identificativo formado por una letra y un número.....	35
<b>Figura 37:</b> Probeta de <i>Pinus sylvestris</i> L. con su código identificativo formado por una letra y un número.....	35
<b>Figura 38:</b> Pesada de una de las probetas. Se pesaron todas las probetas de ambos lotes.....	36
<b>Figura 39:</b> Rebanadas procedentes de las probetas iniciales, las cuales pesamos y secamos para obtener la humedad de los lotes .....	37





<b>Figura 40:</b> Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística descriptiva) .....	40
<b>Figura 41:</b> Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística comparativa).....	43
<b>Figura 42:</b> Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística predictiva).....	44

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>Figura 43:</b> Resultado de la clasificación visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	48
<b>Figura 44:</b> Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	48
<b>Figura 45:</b> Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. diferenciando madera estructural y madera no estructural.....	49
<b>Figura 46:</b> Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don diferenciando madera estructural y madera no estructural.....	49
<b>Figura 47:</b> Análisis del porcentaje de rechazo por parámetro de clasificación para <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	50
<b>Figura 48:</b> Análisis del porcentaje de rechazo por parámetro de clasificación para <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	50
<b>Figura 49:</b> Nudo de cara y nudo de canto .....	51
<b>Figura 50:</b> Nudo de margen y nudo de arista. ....	51
<b>Figura 51:</b> Nudos agrupados en el canto y orificio generado por un nudo saltadizo ...	51
<b>Figura 52:</b> Médula y fendas.....	51
<b>Figura 53:</b> Entrecasco, bolsas de resina y anillos de crecimiento.....	52
<b>Figura 54:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través del PLG de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	66
<b>Figura 55:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida directa con Sylvatest Trio ® de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	68



<b>Figura 56:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Sylvatest Trio ® de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L.....	69
<b>Figura 57:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida directa con Fakopp de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	71
<b>Figura 58:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Fakopp de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	72
<b>Figura 59:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOR obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	74
<b>Figura 60:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEG obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	75
<b>Figura 61:</b> Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar densidad obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de <i>Pinus radiata</i> D.Don y <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	77
<b>Figura 62:</b> Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V-PLG .....	79
<b>Figura 63:</b> Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V DD-SYL.....	79
<b>Figura 64:</b> Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V IND-SYL.....	82
<b>Figura 65:</b> Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V DD-FAK .....	84
<b>Figura 66:</b> Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V IND-FAK .....	85

## **ANEXOS**

<b>Figura 67:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través del PLG – Distribución teórica normal.....	93
<b>Figura 68:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida directa (DD) con Sylvatest Trio ® (SYL) – Distribución teórica normal.....	94



<b>Figura 69:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida indirecta (IND) con Sylvatest Trio ® (SYL) – Distribución teórica normal .....	95
<b>Figura 70:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida directa (DD) con Fakopp (FAK) – Distribución teórica normal .....	96
<b>Figura 71:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida indirecta (IND) con Fakopp (FAK) – Distribución teórica normal.....	97
<b>Figura 72:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOR obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal .....	98
<b>Figura 73:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOEG obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal .....	99
<b>Figura 74:</b> Gráfico cuantil-cuantil. MOE obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal .....	100
<b>Figura 75:</b> Gráfico cuantil-cuantil. Densidad obtenida a través de secado de muestras provenientes de las probetas – Distribución teórica normal .....	101
<b>Figura 76:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de PLG .....	102
<b>Figura 77:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida directa con Sylvatest Trio ® .....	102
<b>Figura 78:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Sylvatest Trio ®.....	103
<b>Figura 79:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida directa con Fakopp.....	103
<b>Figura 80:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Fakopp.....	104
<b>Figura 81:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOR obtenido a través de la Máquina Universal .....	104
<b>Figura 82:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOEG obtenido a través de la Máquina Universal .....	105
<b>Figura 83:</b> Gráfico residuos frente a predichos para el MOE obtenido a través de la Máquina Universal .....	105
<b>Figura 84:</b> Gráfico residuos frente a predichos para la densidad obtenida a través del secado en estufa de las muestras procedentes de probetas.....	106



# ÍNDICE DE TABLAS

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

<b>Tabla 1:</b> Relación de comunidades autónomas con presencia de <i>Pinus sylvestris</i> L. en España .....	6
<b>Tabla 2:</b> Relación de comunidades autónomas con presencia de <i>Pinus radiata</i> D.Don en España .....	9

## MATERIAL Y METODOS

<b>Tabla 3:</b> Especificaciones seguidas para la clasificación de piezas de sección rectangular (UNE-EN 56544:2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.....	24
<b>Tabla 4:</b> Valores asociados a clase resistente según norma UNE-EN 338:2016. Madera aserrada de uso estructural. Coníferas y chopo.....	46

## RESULTADOS Y DISCUSION

<b>Tabla 5:</b> Clasificación visual del lote de probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. según Norma UNE-EN 56544:2011 .....	47
<b>Tabla 6:</b> Clasificación visual del lote de probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don según Norma UNE-EN 56544:2011 .....	48
<b>Tabla 7 :</b> Análisis descriptivo de las propiedad físicas de las probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	52
<b>Tabla 8:</b> Tabla comparativa densidad y tamaño medio anillo con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN <i>et al.</i> , (1998). para <i>Pinus sylvestris</i> L. ...	53
<b>Tabla 9:</b> Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	53
<b>Tabla 10:</b> Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo ultrasonidos (Sylvatest Trio ®) y (Fakopp) probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	53
<b>Tabla 11:</b> Tabla comparativa entre los valores obtenidos en el presente TFM y los valores publicados por (Montero <i>et al.</i> , 2013) .....	54





<b>Tabla 12:</b> Análisis descriptivo de las propiedades físicas de las probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	54
<b>Tabla 13:</b> Tabla comparativa densidad, tamaño medio anillo, MOR Y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998). para <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	55
<b>Tabla 14:</b> Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	55
<b>Tabla 15:</b> Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de ultrasonidos (SylvatestTrio ®) y (Fakopp) probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	56
<b>Tabla 16:</b> Tabla comparativa V SYL-DD, V IND-SYL con valores obtenidos por INIA, 2011. para <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	56
<b>Tabla 17:</b> Comparativa de características de las dos maderas objeto de este TFM siendo los valores medios en madera libre de defectos los recogidos por PEÑA y VIGNOTE (2006) y las obtenidas en el presente TFM con madera con singularidades.....	57
<b>Tabla 18:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas con el PLG en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	58
<b>Tabla 19:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de ultrasonidos (Sylvatest Trio ®) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	59
<b>Tabla 20:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOE calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de flexión según norma EN 408 en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.....	59
<b>Tabla 21:</b> Tabla comparativa MOE Y MOR con valores obtenidos por MONTERO et al., 2013. para <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	60
<b>Tabla 22:</b> Tabla comparativa V DD-SYL, V IND-SYL, V DD-FAK, V IND-FAK, V-PLG con valores obtenidos por MONTERO, M.J., 2013. para <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	60
<b>Tabla 23:</b> Tabla comparativa $\delta$ , MOE, MOR, MOEd SYL y V DD-SYL con valores obtenidos por HERMOSO, E., 2001. para <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	61
<b>Tabla 24:</b> Tabla comparativa MOR Y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998). para <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	61



<b>Tabla 25:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas mediante vibraciones inducidas (PLG) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	62
<b>Tabla 26:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en los ensayo de ultrasonidos (Sylvatest Trio ®) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	62
<b>Tabla 27:</b> Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de flexión según norma EN 408 en probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	63
<b>Tabla 28:</b> Tabla comparativa MOR y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998). para <i>Pinus radiata</i> D.Don.....	64
<b>Tabla 29:</b> MOEd obtenidos ordenados de mayor a menor para la especie <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	64
<b>Tabla 30:</b> MOEd obtenido ordenados de mayor a menor para la especie <i>Pinus radiata</i> D.Don .....	64
<b>Tabla 31:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEd PLG del análisis comparativo <i>P.radiata</i> – <i>P.sylvestris</i> .....	65
<b>Tabla 32:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd PLG (Intervalos de confianza del 95%) .....	65
<b>Tabla 33:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd –PLG.....	66
<b>Tabla 34:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEd DD-SYL del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	67
<b>Tabla 35:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd DD-SYL (Intervalos de confianza del 95%) .....	67
<b>Tabla 36:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD–SYL. ....	67
<b>Tabla 37:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEd IND-SYL del análisis comparativo .....	68



<b>Tabla 38:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd IND-SYL (Intervalos de confianza del 95%) .....	69
<b>Tabla 39:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-SYL.....	69
<b>Tabla 40:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEd DD-FAK del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	70
<b>Tabla 41:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd DD-FAK (Intervalos de confianza del 95%) .....	70
<b>Tabla 42:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD-FAK.....	70
<b>Tabla 43:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEd IND-FAK del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	71
<b>Tabla 44:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd IND-FAK (Intervalos de confianza del 95%) .....	72
<b>Tabla 45:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-FAK....	72
<b>Tabla 46:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOR del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	73
<b>Tabla 47:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOR (Intervalos de confianza del 95%) .....	73
<b>Tabla 48:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOR .....	73
<b>Tabla 49:</b> Análisis de varianza para el parámetro MOEG del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	74
<b>Tabla 50:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEG (Intervalos de confianza del 95%).....	75
<b>Tabla 51:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEG .....	75



<b>Tabla 52:</b> Análisis de varianza para el parámetro $\delta$ del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> .....	76
<b>Tabla 53:</b> Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro $\delta$ (Intervalos de confianza del 95%).....	76
<b>Tabla 54:</b> Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro $\delta$ .....	76
<b>Tabla 55:</b> Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V-PLG .....	78
<b>Tabla 56:</b> Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V-PLG) .....	78
<b>Tabla 57:</b> Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (densidad, anchura anillos y V-PLG) .....	78
<b>Tabla 58:</b> Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V DD-SYL.....	79
<b>Tabla 59:</b> Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V DD-SYL) .....	80
<b>Tabla 60:</b> Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (densidad, anchura anillos y V DD-SYL).....	80
<b>Tabla 61:</b> Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V IND-SYL....	81
<b>Tabla 62:</b> Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V IND-SYL) .....	81
<b>Tabla 63:</b> Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V IND-SYL).....	82
<b>Tabla 64:</b> Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V DD-FAK ....	83
<b>Tabla 65:</b> Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V DD-FAK) .....	83





<b>Tabla 66:</b> Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V DD-FAK).....	83
<b>Tabla 67:</b> Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V IND-FAK ...	84
<b>Tabla 68:</b> Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (anchura de los anillos, densidad, y V IND-FAK) .....	84
<b>Tabla 69:</b> Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V IND-FAK).....	85
<b>Tabla 70:</b> Asignación de clase resistente atendiendo a las propiedades densidad, (MOR) y (MOE).....	86
<b>Tabla 71:</b> Asignación de clase resistente atendiendo a la clase visual .....	86

## **ANEXOS**

<b>Tabla 72:</b> Pruebas de Bondad-de-Ajuste para MOEd-PLG (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	93
<b>Tabla 73:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-SYL (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	94
<b>Tabla 74:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-SYL (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	95
<b>Tabla 75:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-FAK (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	96
<b>Tabla 76:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-FAK (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	97
<b>Tabla 77:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOR M-UN (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	98
<b>Tabla 78:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOEG M-UN (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	99
<b>Tabla 79:</b> Pruebas de bondad de ajuste para MOE M-UN (MPa). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	100



<b>Tabla 80:</b> Pruebas de bondad de ajuste para la densidad (Kg/cm <sup>3</sup> ). Prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	101
--	-----



# **1. RESUMEN**



## 1. RESUMEN

La oportunidad de este Trabajo Fin de Máster (en adelante TFM) deriva del cada vez más elevado uso de la madera de *Pinus radiata* D. Don y de *Pinus sylvestris* L. en la construcción en España.

El creciente uso de madera de *Pinus radiata* D. Don en sectores como la construcción se debe a poseer buenas características básicas como la versatilidad, alto grado de homogeneidad, buen comportamiento mecánico, bajo porcentaje de corteza referente al volumen total, madera fácil de trabajar, ofrece valores idóneos para la penetración de útiles cortantes, clavos y tornillos, estabilidad aceptable frente a hinchazón y merma producida por la humedad. Las características anteriormente enumeradas hacen que la madera de pino insigne tenga buena aptitud para su uso en diferentes industrias como la de chapa y desenrollo, industria del aserrío, industria de tablero alistonado y para madera estructural.

La segunda especie tratada en este estudio es el *Pinus sylvestris* L. conocido popularmente como pino de Valsaín, pino silvestre o pino albar entre otros nombres. Actualmente es considerado uno de los mejores pinos de España debido a características del fuste como calidad, limpieza y rectitud. Señalar que la resina puede dificultar en ocasiones el mecanizado de la madera y dificulta la obtención de pasta. Comportamientos como el secado rápido sin deterioro de su calidad, su buena aptitud para la obtención de chapa tanto por desenrollo como por corte a la plana, facilidad para el encolado con cualquier tipo de cola, también para el acabado y clavado/atornillado con alta resistencia al arranque hace que sea una de las especies más utilizadas en la fabricación de madera laminada además de su extendido uso en carpintería, construcción, ebanistería y serrería.

El material base de este trabajo fueron 2 lotes de probetas, uno de la especie *Pinus radiata* D. Don y otro lote de *Pinus sylvestris* L. Cada uno de estos lotes formado por 40 probetas de dimensiones 6 x 4 x 120 cm, a escala estructural.

En primer lugar se realizó la clasificación visual de las 80 probetas conforme a las disposiciones e instrucciones descritas en la norma UNE-EN 56544:2011, registrando los diferentes parámetros de clasificación que explican cada calidad visual asignada.

En segundo lugar se caracterizó elastomecánicamente la madera de las anteriores especies mediante ensayos no destructivos utilizando diferentes equipos (Vibraciones inducidas; PLG, ultrasonidos; Sylvatest Trio<sup>®</sup> y Fakopp) y destructivos (Maquina Universal de Ensayos) con el objetivo de determinar algunas propiedades físicas y mecánicas como el Modulo de Elasticidad Dinámico (MOEd) obtenido a través de diferentes métodos, el Módulo de rotura (MOR), el Módulo de Elasticidad Estático (MOE) y el Modulo de Elasticidad Global (MOEG). En cuanto a los valores medios obtenidos de MOR para *Pinus sylvestris* L. y para *Pinus radiata* D. Don fueron 52,46 MPa y 40,32 MPa respectivamente. El valor medio obtenido al determinar la densidad para *Pinus sylvestris* L. y para *Pinus radiata* D. Don fue de 525,14 Kg/m<sup>3</sup> y 484,08Kg/m<sup>3</sup> respectivamente. En cuanto al MOE medio obtenido para *Pinus sylvestris* L. y para *Pinus radiata* D. Don fue 13932,50 MPa y 9914,32 MPa. Cuando se concluyó la totalidad de los ensayos en laboratorio se llevó a cabo un análisis estadísticos con los datos obtenidos en laboratorio compuesto de una primera parte de estadística descriptiva de las propiedades físicas, de las velocidades obtenidas mediante ensayos

no destructivos y de los Módulos de Elasticidad Dinámicos(MOEd) obtenidos a través de las diferentes velocidades medidas, en una segunda parte se realizó una estadística comparativa a través de la realización de un Análisis de la Varianza (ANOVA) de los MOEd, junto con la densidad, MOR, MOEG y Módulo de Elasticidad (MOE), en los que se obtuvo en todos ellos que existían diferencias significativas entre ambos lotes de madera y finalmente se concluyó el tratamiento estadístico con un análisis estadístico predictivo con el fin de conocer la ecuación de un modelo basado en los diferentes parámetros obtenidos en laboratorio con el que poder calcular mediante la aplicación del modelo el MOEG, obteniéndose como mejor modelo una ecuación con tres parámetros (anchura de los anillos, densidad y velocidad medida con PLG) cuyo  $R^2$  es del 68,20 %. Todo ello se realizó con el fin de poder conocer mejor las aptitudes de estas dos maderas para ser utilizadas como elemento estructural además de definir las relaciones entre los diferentes parámetros determinados.



## **2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**



## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

### 2.1 ESTADO ACTUAL DEL MERCADO DE LA MADERA Y DE LA INDUSTRIA FORESTAL

La madera cada vez va ganando más adeptos en el mercado de la construcción y el interiorismo y esto es así no sólo porque los nuevos productos se dirigen a aplicaciones específicas en los que su adaptación al uso es casi perfecta sino porque, también, en un entorno de construcción sostenible los valores medioambientales de la madera y sus derivados ganan cada vez más relevancia (FERNÁNDEZ GOLFÍN, J.I. y HERMOSO, E. 2015).

#### 2.1.1 LA INFRAUTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES.

Según las estimaciones de FAO (2009), la demanda mundial de madera se va a incrementar mucho en el futuro próximo. La madera en rollo industrial crecería en un 45 %, desde 1.682 millones de m<sup>3</sup>/año en 2005 hasta 2.436 en 2030, mientras que la producción bioenergética aumentaría casi un 50 %, pasando de 719 a 1.075 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTOE) en el mismo intervalo. A escala europea, la demanda de madera industrial crecería en el periodo más del 50%, y la producción bioenergética en un 227% (TOLOSANA, E., 2016).

Frente a esta perspectiva, el aprovechamiento de madera en España se considera en las últimas décadas muy escaso en relación con la disponibilidad, evaluándose las extracciones anuales de madera y leña en torno al 41% del crecimiento anual de su volumen en los bosques españoles (BELTRÁN, M; VERICAT, P.; PIQUÉ, M. Eds., 2013; SECF, 2013).

Esta infrautilización de los recursos forestales y en particular de la madera en el estado español es bastante mayor que en la mayoría de países de la Unión Europea, donde el porcentaje que suponen las extracciones sobre el crecimiento ronda el 59 % (MAGRAMA, 2014).

En Europa, la problemática falta de uso de los recursos forestales ha dado lugar a iniciativas institucionales, como la "Guía de prácticas adecuadas para la movilización sostenible de la madera en Europa" (Comisión Europea, 2010), a proyectos activos del séptimo programa marco de la U.E. (Programa SIMWOOD, 2013-2017); El séptimo programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico (7PM) es el principal instrumento de la Unión europea en materia de financiación de la investigación en Europa.

Con el programa SIMWOOD (SUSTAINABLE INNOVATIVE MOBILISATION OF WOOD) se pretende movilizar a los propietarios para cubrir la demanda de productos forestales mediante el desarrollo de gestión forestal y asegurar la sostenibilidad de las funciones de los bosques con lo que se conseguiría reforzar la silvicultura y la industria forestal.

En España se ha desarrollado, con financiación del FEADER, un Plan de Activación Socioeconómica del Sector Forestal (2014-2020) por parte del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), uno de cuyos objetivos es

“fomentar el aprovechamiento y movilización de los productos forestales y los sectores económicos asociados”. También se han desarrollado Proyectos de Desarrollo Rural financiados por los mismos fondos FEADER, como RedFor (COSE, 2011). Dentro de cada una de las Comunidades Autónomas se está llevando a cabo diferentes actuaciones a través de diversos instrumentos para mejorar la movilización de recursos forestales, un ejemplo de ello es el Plan Estratégico de Movilización de Castilla y León (PEM-CyL) en la comunidad de Castilla y León.

La industria forestal y el mercado laboral relacionado con el sector forestal también se está viendo afectado por la puesta en marcha de iniciativas como SIMWOOD y PEM-CyL ya que al mejorar la gestión de las masas forestales se podría satisfacer mejor la demanda creciente de madera además haciendo que las fuentes de materia prima para esta industria sea más fiable y de este modo poderse asegurar un crecimiento estable.

### **2.1.2 ESTADO DEL MERCADO DE LA MADERA Y DE LA INDUSTRIA FORESTAL**

En los países desarrollados, la contribución de las masas forestales al desarrollo económico, aunque su aportación al PIB sea relativamente modesta, es significativa sobre todo por su potencial de desarrollo en un contexto de “Economía Verde” (UNECE/FAO, 2013).

Pese a los esfuerzos que el sector forestal ha estado realizando en comunicación, la sociedad no es aún plenamente consciente del papel que bosques y áreas forestales tienen en la producción de bienes y servicios que necesitan en su vida diaria, o cuál es su contribución en el empleo o desarrollo económico, especialmente de zonas rurales. Por el contrario la opinión pública percibe, en general, a la industria forestal, como un sector anticuado de filosofía meramente extractiva. Sin embargo, pese a su enorme variabilidad entre subsectores y países, los hechos muestran un sector industrial que ha sido capaz de adaptarse a los cambios tecnológicos, sociales y económicos ocurridos durante su larga historia de trabajo basado en un recurso renovable incomparable como lo es la madera. (PICOS, J. 2015).

### **2.1.3 NECESIDAD DE INNOVACIÓN DE PROCESOS Y PRODUCTOS FORESTAL**

Es numerosa la documentación que augura un aumento del consumo de madera y la necesidad de adecuarse del sector forestal a esta potencial demanda. Entre toda la bibliografía relacionada con este tema cabe destacar el EFSOS II “European Forest Sector Outlook Study II”, promovido por la UNECE/FAO, 2011.y cuyo ámbito es la UE27 junto con países del Este y Sureste de Europa. En dicho estudio se expone que en el intervalo de años del 2010 al 2030 la demanda de madera en Europa aumente, en el caso más optimista, un 21 % (201,7 millones de m<sup>3</sup> de madera en rollo equivalente) y un 47% (453,2 millones de m<sup>3</sup> en rollo equivalente) en el caso de que se cumpliesen los objetivos de producción bioenergética. Incluso éste último escenario, parte de supuestos muy favorables de: eficiencia energética; importantes incrementos de otras energías renovables; modestos crecimientos del empleo de madera para

elaboración de materiales tradicionales y nuevos biomateriales; y manteniendo el mismo área forestal. EFSOS II establece que, por tanto, para incrementar el suministro de madera en las tasas previstas podría hacer necesario emplear superficies de producción adicionales mediante el establecimiento de cultivos de crecimiento rápido sobre terrenos agrícolas. En este sentido, concluye que obtener 100 millones de m<sup>3</sup> adicionales obligaría, con productividades medias, a utilizar unos 5 millones de hectáreas.

Para adaptarnos al posible cambio de la demanda de productos forestal se deben de desarrollar las siguientes líneas de trabajo:

- Introducción de innovaciones para optimizar el aprovechamiento de recursos forestales.
- Optimización de aserrado, secado y protección de madera.
- Ingeniería de productos de madera (chapas de frondosas y coníferas, contrachapado, tableros LVL, OSB y MDF).
- En el sector de la construcción se centran en el desarrollo de materiales que tengan mejor comportamiento acústico, resistente al fuego, durabilidad, impacto ambiental, sostenibilidad y comportamiento estructural de edificios.

## 2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS ESPECIES OBJETO DEL PRESENTE ESTUDIO

Destacar que el *Pinus radiata* D.Don es la especie forestal más cultivada a nivel mundial debido a su elevada productividad. Más concretamente en España esta especie supone un 1,44 % del bosque nacional y un 94,64 % de las masas de esta especie del territorio español tiene origen artificial.

El *Pinus sylvestris* L. es la especie arbórea de mayor extensión en Europa y la mayor área natural conocida.

### 2.2.1 DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL *PINUS SYLVESTRIS* L.

**Nombre científico:** *Pinus sylvestris* L.

**Nombre común / comercial:** Pino silvestre, Pino albar, Pino Valsaín, Pino rojo, Pino Burgos y Pino Soria.

**Distribución en el mundo:** Se trata del pino con mayor área natural y el de más difusión tanto en Europa como en Asia. Se extiende en dirección sur-norte desde Sierra Nevada hasta el norte de Noruega; y en dirección oeste-este, desde Escocia hasta los Urales y desde allí hasta las partes más orientales de China y Rusia.

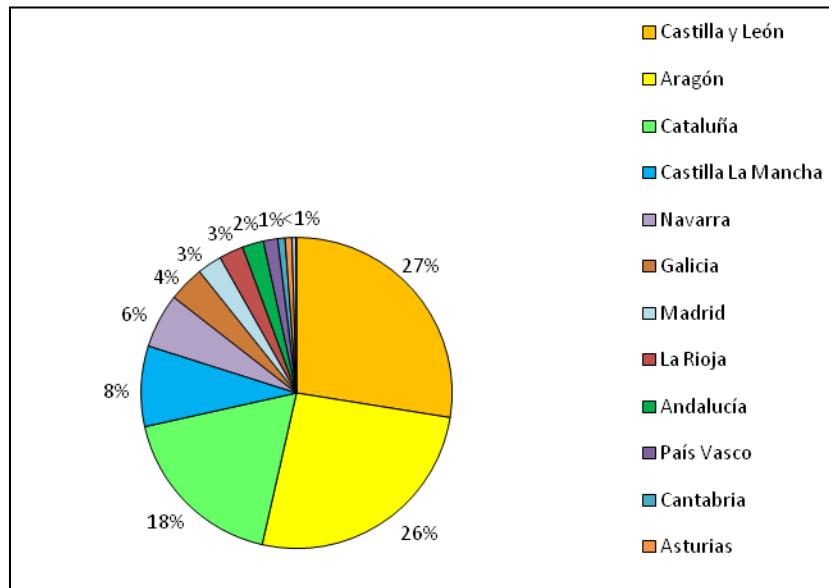
**Distribución en España:** Su área natural tanto desde el punto de vista de extensión como desde el punto de vista de variedad se traduce en una gran amplitud ecológica. Existen tres grandes zonas donde se presenta esta especie; en las cordilleras pirenaica, Ibérica y Central. Existen otras representaciones de menor rango como el pinar de Lillo en la provincia de León o el Sierra Nevada entre otras.



**Figura 1:** Presencia de *Pinus sylvestris* L. en España. Fuente IFN

Relación de Comunidades Autónomas con presencia de <i>Pinus sylvestris</i> L. en España	
Comunidad Autónoma	Superficie (ha)
Castilla y León	285.092
Aragón	269.533
Cataluña	186.061
Castilla La Mancha	86.632
Navarra	58.594
Galicia	38.521
Madrid	26.367
La Rioja	26.317
Andalucía	22.922
País Vasco	15.469
Cantabria	7.863
Asturias	7.105
Comunidad Valenciana	4.220
Extremadura	862
<b>TOTAL</b>	<b>1.035.558</b>

**Tabla 1:** Relación de comunidades autónomas con presencia de *Pinus sylvestris* L. en España.



**Figura 2:** Representación de la relación de comunidades autónomas con presencia de *Pinus sylvestris* L. en España. Elaboración propia a partir de datos del tercer IFN.

**Ecología:** Especie que gusta de continentalidad, prefiriendo los sustratos arenosos y derivados de rocas ácidas. El óptimo se presenta hacia los 1500 m, situándose la mayoría de las masas entre 100 y 2000 metros de altitud, aunque es muy frecuente que rebase estos límites ampliamente en ambos sentidos.

**Descripción del fuste:** De elevada talla pudiendo llegar a los 30- 40 metros de altura. El porte se trasforma desde un característico porte cónico-piramidal en su etapa joven hasta una deformación de diferente grado en pies viejo. El tronco es derecho, cilíndrico y recto especialmente cuando crece en espesura, con una ramificación escasa que debido a la poda natural en las partes bajas desaparece. La corteza es delgada primero gris-verdosa, luego escamosa asalmonada en el tercio superior del fuste y base de las ramas. Es característica la corteza más gruesa y fisurada longitudinalmente de los pies viejos.

**Crecimiento:** El crecimiento en altura se suele retardar hasta los 40 años y cesa entre los 100- 120 años. Podríamos definir un crecimiento volumétrico variable entre 2,7 a 8,5 m<sup>3</sup>/ ha año (Sistema Central), entre 2,7 a 7,8 m<sup>3</sup>/ ha año (Sistema Ibérico) y entre 3,2 a 7,1 m<sup>3</sup>/ ha año (Pirineos)

**Descripción de las trozas:** La conicidad es menos acusada que en otras especies de pino. La nudosidad depende de la procedencia y de los tratamientos selvícolas efectuados, siendo en España normal la existencia de pocos nudos en las primeras trozas de los árboles maduros, y nudos bastante números en trozas superiores siendo estos últimos de tamaño más elevado.

**Defectos de las trozas:** Pueden presentar azulado siendo señal de una mala gestión en la masa; corazón podrido frecuente en pies pasados de turno.

**Descripción macroscópica:** Muy variable en función de las distintas de procedencia. Aunque de forma muy general podemos señalar que la albura es muy clara tirando a color amarillento, mientras que el duramen es de color rosado tirando a marrón rojizo siendo fácil distinguir el duramen de la albura. La coloración de los nudos también es variable desde marrón oscuro hasta negruzco. Se suelen distinguir perfectamente en los anillos de crecimiento variando su anchura desde 1-3 mm hasta los 7-8 mm, siendo la madera de otoño marrón la cual suele destacar sobre la madera de primavera blanco- amarillenta. La fibra en general es recta y el grano se puede clasificar como fino a medio-basto. La presencia de canales resiníferos es elevada caracterizándose por ser poco visibles, de pequeño a mediano tamaño apareciendo en la sección transversal como puntos blancos y en secciones longitudinales como finas líneas de corto longitud. El olor de la resina es intenso y persistente en el tiempo aun después del secado.

**Aplicaciones:**

1. Postes: Utilizado para la obtención de este tipo de productos debido a su excelente porte, mediana durabilidad y fácil tratamiento.

2. Apeas, estacas y productos para la agricultura: Los rollos de silvestre de pequeñas dimensiones cumple la exigencia que tienen estos productos aunque de forma habitual se tratan para aumentar su durabilidad natural.

3. Madera maciza: Es una de las principales aplicaciones de esta especie debido a su fácil mecanización, sus características estéticas, su escasa contracción volumétrica, y su resistencia mecánica permite un amplio uso en productos industriales de la madera. Las mejores calidades de esta madera son destinadas a fabricación de muebles. Otros uso de las mejores calidades es la carpintería de hueco como puertas rústicas, ventanas y escaleras. Y la carpintería de revestimiento. La carpintería de ribera y la carpintería estructural requieren exigencias como la resistencia mecánica. Otros usos frecuentes de las madera de silvestres es para encases, embalajes, palet, traviesas para ferrocarril y moldes para encofrados.

4. Madera laminada: Es una de las especies más utilizadas para la fabricación de madera laminada.

5. Tableros alistonados: La madera de pino de Valsaín presenta muy buenas características para este tipo de producto debido a su estabilidad se pueden obtener listones anchos, aunque como inconveniente cabe destacar la diferencia en aspecto entre el duramen y la albura.

6. Tableros de partículas: Para la obtención de este tipo de tablero priman características como el escaso contenido en resinas y su blancura, circunstancia que mejora la resistencia y la apariencia estética del tablero.

7. Tableros de fibras: Debido a la esbeltez de la fibra (media- alta) de la madera de esta especie se obtiene un tablero de media-alta calidad.

8. Chapa y tablero contrachapado: La madera de mejores calidades se destinan habitualmente a la obtención de chapa plana con el fin de utilizar las chapas finales como revestimiento final de tableros de todo tipo.



### 2.2.2 DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA, CARACTERÍSTICAS Y USOS DEL *PINUS RADIATA* D.DON

**Nombre científico:** *Pinus radiata* D.Don

**Nombre común / comercial:** Pino radiata, Pino insigni o Pino de Monterrey.

**Distribución en el mundo:** Su área natural es muy reducida (4000 hectáreas aproximadamente) situada en la costa californiana además de Santa Rosa, Santa Cruz y Guadalupe. Actualmente se encuentra muy extendida por su uso en repoblaciones por el Suroeste de Europa, Nueva Zelanda, Chile, Sudáfrica y Suroeste de Australia. Es la especie más cultivada a nivel mundial debido a su elevada productividad.

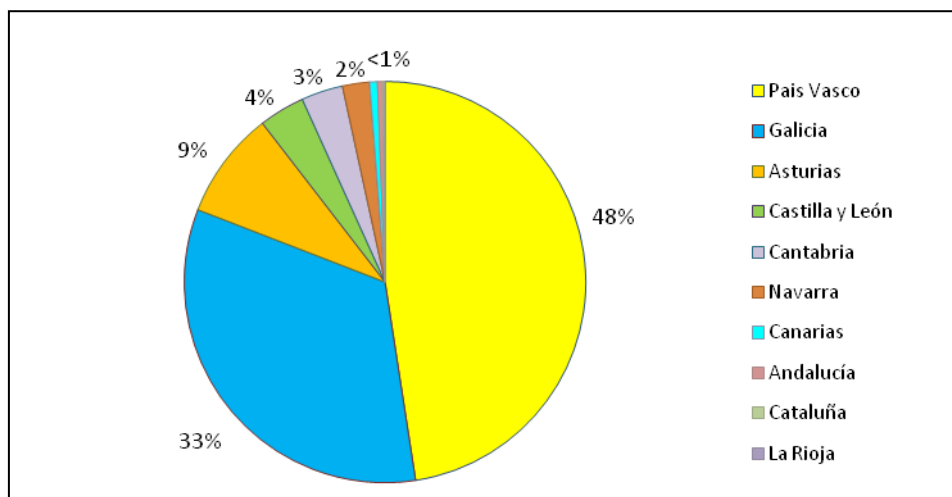
**Distribución en España:** Se ha difundido mediante repoblaciones por toda la Cornisa Cantábrica, acentuándose su presencia en el Galicia y el País Vasco.

Relación de Comunidades Autónomas con presencia de <i>Pinus radiata</i> D.Don en España	
Comunidad Autónoma	Superficie (ha)
País Vasco	125.220
Galicia	87.709
Asturias	22.797
Castilla y León	9.728
Cantabria	8.843
Navarra	5.725
Canarias	1.654
Andalucía	1.168
Cataluña	391
La Rioja	36
<b>TOTAL</b>	<b>263.271</b>

**Tabla 2:** Relación de comunidades autónomas con presencia de *Pinus radiata* D.Don en España.



**Figura 3:** Presencia de *Pinus radiata* D.Don en España. Fuente IFN



**Figura 4:** Representación de la relación de Comunidades Autónomas con presencia de *Pinus radiata* D.Don en España. Elaboración propia a partir de datos del tercer IFN.

**Ecología:** Las masas naturales crecen sobre una alta variedad de roca madre como pizarras, esquistos, areniscas marinas, areniscas silíceas poco consolidadas, granitos y calizas. Los suelos también son muy variados teniendo predilección por suelos ácidos o muy ácidos siendo la mayoría profundos, franco arenosos y buena permeabilidad. En su área natural cabe destacar la gruesa capa de hojarasca y residuos que acumula en su superficie alcanzando grosores de 8 a 15 cm originando un rico humus su parte inferior.

**Descripción del fuste:** Árbol elevado que puede llegar fácilmente a los 30 m aunque podemos decir que su altura media es de 20 m. Su porte es regular y piramidal en su juventud y finalmente globoso y ensanchado. Su tronco es recto y relativamente cónico los primeros años. Podemos encontrar una relación a mayor calidad de la masa más acusada es la conicidad. Reseñable es que la conicidad no depende de la densidad de la masa. Presenta ramas verticiladas con una distancia entre verticilos que oscila alrededor de medio metro.

**Descripción de las trozas:** poseen una buena conformación general, son derechas y algo cónicas. Frecuentemente presentan madera de compresión, representando por término medio 15 % del total de la madera. Es también relativamente frecuente la presencia de madera juvenil constituida por los primeros 5 a 6 anillos, la cual tiende a disponerse formando un cilindro a lo largo de él, caracterizándose esta madera por poseer menor densidad, peores propiedades mecánicas y contracciones longitudinales del orden del doble que presenta la madera normal. Generalmente si no se han realizado las podas oportunas las trozas presentan un número elevado de nudos distribuidos regularmente, en forma de verticilada cada 50 cm. El porcentaje medio de corteza es de 14,5 % aunque puede alcanzar valores máximos del 40% y valores mínimos del 4 % en función de la posición del árbol dentro de la masa de la que forma parte.

**Crecimiento:** El turno de máxima renta en especie varía entre 28 y 44 años, y el crecimiento medio de la masa principal a los 30 años, entre 8,1 y 19,8 m<sup>3</sup>/ha año.

**Defectos de las trozas:** La durabilidad de las trozas es bastante escasa, viéndose afectada de forma rápida por hongos cromógenos que causan el azulado, primero por en sus caras más externas para después extenderse en un periodo corto de tiempo al resto de la troza.

**Descripción macroscópica:** La madera de albura tiene color blanco amarillento, que se oscurece relativamente rápido al exponerla a la luz, mientras que el duramen es poco diferenciable teniendo color pardo amarillento a pardo marrón. La madera de radiata es principalmente madera de albura con turno de corta inferiores a los del resto de los pinos españoles por lo que la mayoría de la madera no llega a la edad de tránsito de albura a duramen (12-15 años). Los anillos de crecimiento no son muy diferenciables apareciendo de 1 a 5 por centímetro (su valor medio de 1,5 anillos/cm). La madera de primavera es blanca amarillenta, la transición entre madera de primavera y madera de otoño se realiza gradualmente. La madera de otoño, de color pardo claro suele ser estrecha sobre todo si se compara con la de primavera., siendo la relación entre ambas pequeña y contante, por lo que podemos decir que su textura es pequeña. Los cales resiníferos de tamaño pequeño a mediano, se reparten por ambas madera tanto en la de primavera como en la de otoño, apreciándose pequeños puntos oscuros en la sección trasversal o como final líneas pardas en la sección longitudinal. Destacable es la rectitud de la fibra y el grano es de fino a medio. Respecto a su peso podemos decir que es de ligera a mediana, es dura y muy poco resinosa, aunque en fresco posee un vivo olor a resina. Los nudos son abundantes de pequeño tamaño siendo diferenciables por su color grisáceo claro.

**Aplicaciones:**

1. Industria del aserrío: la forma que presentan sus troncos así como sus propiedades físico mecánicas hace que se alcancen altos rendimientos en los procesos de aserrado de piezas pertenecientes a esta especie. La posibilidad de disponer de piezas con dimensiones elevadas sin variar la rectitud de la fibra y sin presencia de curvaturas permite un buen rendimiento de aserraderos automatizados. Además señalar que la madera de pino insigne responde de manera adecuada a procesos de secado tanto al aire como artificial. Las piezas con largos elevados (alrededor de 3m) sin excentricidades y con buen porcentaje de madera de albura para la obtención de tablón y viguetas demandadas en la construcción como piezas estructurales hacen que estas piezas sean las más codiciadas.

2. Chapa y desenrollo: características sobresalientes para la obtención de chapa destinada para tableros contrachapados o estructurales, sin embargo su pobreza en el dibujo la hace que la utilización de esta madera con fines decorativos sea escasa.

3. Tableros aglomerados: siendo una madera de calidad media para el uso de ésta en la producción de tableros de partículas por su bajo contenido en resinas favoreciendo el encolado de las partículas. Por la blancura y esbeltez de las fibras también es empleado en tablero de fibras.

4. Pasta de celulosa: Esta especie indicada especialmente en la fabricación de pasta mecánica (producida mediante desfibrado mecánico del rollizo) aunque existe una pérdida de rendimiento del proceso debido a las manchas producidas por la presencia de nudos encareciendo el proceso de blanqueo.

5. Carpintería y ebanistería: Características como la homogeneidad, elevada estabilidad, fácil encolado, y dureza son características que la hacen una madera muy útil en la fabricación de perfiles para ventanas y puertas.

6. Tablero alistonado: uniendo pequeñas piezas de madera maciza mediante colas se obtiene como resultado un tablero con un comportamiento mecánico excelente con gran resistencia. Además la naturalidad, belleza y posibilidad de transformación de este material hace que su demanda para la industria del mueble sea elevada.

7. Madera estructural: Para vigas, pilares, pórticos, cerchas, tirantes, correas pudiendo ser de madera maciza o bien como madera reconstruida mediante encolado y laminada.

### 2.3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

A continuación se enumeran en orden cronológico los diferentes documentos (tesis, publicaciones...) que han servido como base para la elaboración de la parte de discusión de este TFM por ser documentación relacionada con la temática de este documento, destacar que se trata de trabajos centrados en el estudio de la madera de procedencia española:

- *Documento publicado en Materiales de construcción. Vol.48. n° 252: 45-59 elaborado por J.L Fernández-Golfín, M.R. Díez y A. Gutiérrez, en el año 1998: Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544.CIFOR (INIA).*

Se presentan los resultados de la caracterización mecánica de la madera aserrada de tamaño (150 x 50 x 3000 mm) y usos estructurales de "*Pinus sylvestris* L., *Pinus radiata* D.Don y *Pinus pinaster* Ait." de diferentes procedencias, llevada a cabo en el Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del INIA. Se aportan los valores característicos y clases de resistencia que corresponden a las clases de calidad definidas en la norma UNE-EN 56544:2011. Se efectúa una comparación y análisis de los resultados obtenidos, extrayendo conclusiones respecto del diferente comportamiento observado para las cuatro especies. Se analiza la adecuación de la norma de clasificación visual de la madera aserrada UNE-EN 56544:2011 para las tres especies

- *Tesis doctoral realizada por E. Hermoso en el año 2001 en la Universidad Politécnica de Madrid: Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L.*

Se recoge el proceso de caracterización mecánica para la madera aserrada de pino silvestre de tamaño estructural de varias procedencias y dimensiones (en milímetros: 2000 x 100 x 40, 2000 x 100 x 50, 3000 x 150 x 40, 3000 x 150 x 50, 3000 x 150 x 70 y 4000 x 200 x 70). Para ello efectúan los cálculos necesarios para obtener los reglajes de ajustes de la máquina de clasificación para esta especie, así como los valores de paso entre calidades, según la norma EN 14081-2; Además se comparan los rendimientos obtenidos en los métodos de clasificación y se analiza la efectividad de las variables y parámetros utilizados actualmente en la determinación de la calidad. Finalmente se hace una comparación con los resultados alcanzados para otras

especies (*Pinus nigra*, *Pinus radiata*, *Pinus pinaster*) en estudios similares y con los datos resultantes de la caracterización con probetas de pequeñas dimensiones.

- *Tesis doctoral realizada por G., Íñiguez. en el año 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural en la Universidad Politécnica de Madrid.*

Se recogen los análisis, resultados, y conclusiones obtenidas mediante la clasificación visual y aplicación de otras técnicas no destructivas, junto a la evaluación de las propiedades mecánicas, de madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Se trabajó con 395 piezas de madera aserradas estructural, con dimensiones transversales entre 150 x 200 mm y 220 x 250 mm de las siguientes coníferas *Pinus radiata* D.Don, *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco. Se realizó la clasificación visual de toda la muestra obteniéndose un alto porcentaje de rechazos y advirtiéndose una baja predicción de las propiedades resistentes de los grupos de calidad obtenidos justifica la necesidad de una modificación de la normativa actual. Además la aplicación de técnicas no destructivas ha validado y reforzado la idea sobre precisión, portabilidad y facilidad de empleo de éstos métodos. Finalmente se hace una comparativa con los resultados alcanzados para estas especies con los datos obtenidos de otros estudios con probetas de menor escuadría

- *Informe del desarrollo del proyecto sobre caracterización mecánica de vigas de gruesa escuadría de pino radiata elaborado en el año 2011 por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria (INIA).*

Proyecto destacable por varios motivos como ser el colofón de 25 años caracterizando la madera de *Pinus radiata* D.Don, en colaboración de entes públicos y privados debido a que el sector forestal vasco y su industria transformadora se han preparado durante años para garantizar tanto al usuario como a los prescriptores y a la opinión pública la sostenibilidad de la gestión forestal que se practica en el monte así como la correcta trazabilidad y custodia de la madera a su paso por los diferentes eslabones monte-industria-utilizador final. Se trabajó con dos lotes de que se clasificó según su escuadría, con dimensiones 250 x 150 x 4300 mm y 250 x 200 x 5000 mm; se realizó la clasificación visual y la clasificación por ultrasonidos para terminar con ensayo destructivo, el cual permitió no sólo conocer las propiedades reales del material sino que, además, y mediante comparación, valorar los resultados de los ensayos no destructivos.

- *Tesis doctoral realizada por M.J. Montero en el año 2013. Clasificación de la madera estructural de gran escuadría de Pinus sylvestris L. mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid.*

Aborda el estudio de algunas técnicas no destructivas para la clasificación de madera de *Pinus sylvestris* L. de procedencia española y de gruesa escuadría para uso estructural. Se estimó el módulo de elasticidad y de la resistencia se utilizaron técnicas basadas en la propagación de la onda a través de la madera (Sylvatest® y Microsecond Timer. Se estimó la densidad con ayuda del Pilodyn. Se relacionó las

variables obtenidas en los ensayos con la clasificación visual obtenida y con las propiedades de la madera determinadas mediante ensayo mecánico. Además se estudió la influencia de la humedad en la velocidad de propagación de la onda en la madera. La muestra de estudio fueron 244 piezas de dimensiones 150 x 200 x 4000 mm y 100 x 150 x 3000 mm.

- *Documento publicado en Maderas, Cienc. tecnol. [online]. 2015, vol.17, n.2, pp.407-420. Epub 19-Mar-2015. ISSN 0718-221X elaborado por M.J. Montero, J. de la mata, M. Estebany E. Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain.*

Se abordó el estudio de la influencia de la humedad en la velocidad de propagación de la onda en madera siguiendo el objetivo de conocer la forma en la que influye la humedad en las propiedades mecánicas de la madera. Para ello se utilizaron 26 piezas de dimensiones 100 x 150 x 3000 mm y se fueron evaluando con diferentes valores de humedad dentro de un rango de 35,5 % a 9 %, llevándose en cada uno de los puntos de humedad evaluados una medición de velocidad de propagación.

### **3. OBJETIVOS**





### 3. OBJETIVOS

El principal objetivo es caracterizar elasto-mecánicamente probetas a escala estructural de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.

Los objetivos secundarios planteados a alcanzar en el presente TFM son los siguientes:

- Estudiar el estado del arte sobre el uso y características de la madera de ambas especies en el ámbito nacional.
- Realizar la clasificación visual de las probetas a escala estructural según normas UNE.
- Determinar de las propiedades elastomecánicas de la madera de ambas especies según norma UNE-EN 408:2011.
- Estimar el módulo de elasticidad dinámico de la madera de pino radiata y pino silvestre a partir de ensayos no destructivos con ultrasonidos y mediante vibraciones inducidas.
- Analizar estadísticamente los resultados de las propiedades elastomecánicas de ambas especies de pinos.
- Determinar clase resistente de las probetas según Normas UNE- EN 338:2016.
- Comparar métodos de ensayos comúnmente utilizados para determinar las clase resistente de madera estructural, métodos destructivos (ensayos de rotura) y métodos no destructivos (ultrasonidos y vibraciones).



## **4. MATERIAL Y MÉTODOS**



## 4. MATERIAL Y MÉTODOS

### 4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS PROBETAS UTILIZADAS

Se trabajó con dos lotes diferentes de probetas. Por un lado un grupo de 40 probetas de la especie *Pinus radiata* D. Don y por otro lado un segundo lote de también de 40 probetas de *Pinus sylvestris* L. Se obtuvieron piezas de ambas especies con dimensiones 6 x 4 x 120 cm de diferentes tipos de cortes tanto tangenciales como radiales.

### 4.2. CLASIFICACIÓN VISUAL SEGÚN NORMA UNE-EN 56544:2011

Se llevó a cabo la clasificación de las probetas objeto de este TFM basándonos en la norma UNE-EN 56544:2011, la cual establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de uso estructural de las principales especies de coníferas españolas, de sección rectangular.

El campo de aplicación de esta norma se extiende a madera aserrada destinada a uso estructural de las siguientes especies de procedencia española:

- **Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.).**
- Pino laricio (*Pinus nigra* Arn. var. *Saltzmanii*).
- Pino gallego y pino pinaster de la meseta (*Pinus pinaster* Ait.).
- **Pino insignis (*Pinus radiata* D. Don).**

Siendo dos de las anteriores, el pino silvestre y el pino insignis las especies objeto de nuestro estudio.

Para la clasificación visual de nuestras probetas nos basamos en la evaluación de las siguientes características y singularidades:

#### 1. Características generales

##### 1.1. Contenido de humedad.

En contenido de humedad se define como la masa de agua contenida en madera, expresada en porcentaje respecto de su masa anhidra.

El contenido de humedad de la madera en el momento de la clasificación se expresa mediante las siguientes clases de humedad:

- Madera seca (DRY GRADED): Cuando el contenido de humedad medio sea inferior o igual al 20 % (25 % para piezas de sección mayor de que 200 cm<sup>2</sup>), sin que ninguna medida individual exceda del 25 % (30 % para piezas de sección mayor a 200 cm<sup>2</sup>).

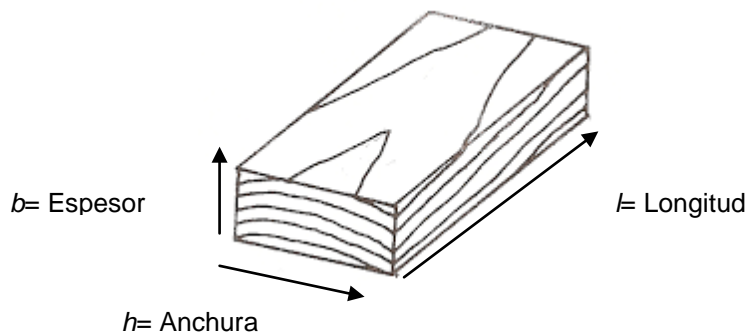
- Madera húmeda (WET GRADED): cuando el contenido de humedad no cumpla los criterios de la clase anterior.

### 1.2. Densidad.

La densidad se medirá como la relación entre masa y volumen de las piezas, determinando ambos valores a la misma humedad.

### 1.3. Dimensiones.

En el contexto de la norma que se está utilizando en este TFM, debe entenderse como anchura de la cara ( $h$ ), la mayor dimensión perpendicular al eje longitudinal a la pieza y como espesor o grosor ( $b$ ), la distancia entre las caras.

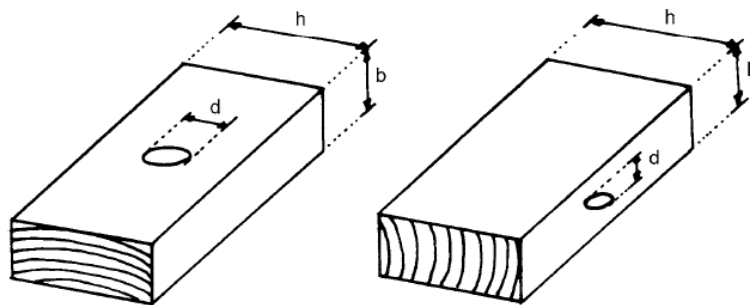


**Figura 5:** Dimensiones de una pieza de madera.

## 2. Singularidades ligadas a la anatomía de la madera

### 2.1. Nudos.

El sistema de medición utilizado en este TFM está de acuerdo con el utilizado en la norma UNE-EN 1310:1997 (apartado 4.1.2.). De acuerdo con él, los diámetros de los nudos se medirán perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza.



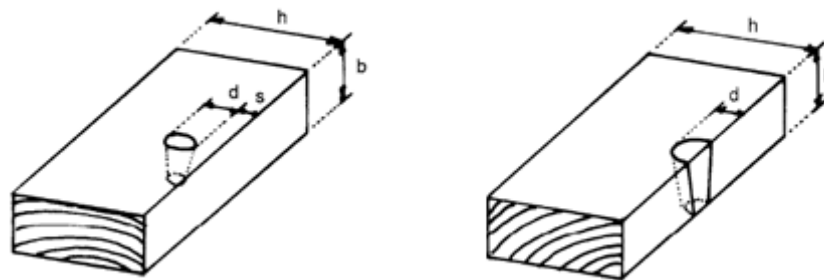
**Figura 6:** Criterio general de medición de nudos en cara y en canto.

En los nudos que se ha encontrado corteza se ha medido junto al nudo.

Los orificios dejados por los nudos saltadizos se medirán como si fueran nudos.

Se medirán los nudos en todas las superficies que se manifiesten. Se evaluarán mediante la relación entre el diámetro y la dimensión de la superficie donde se manifieste, “d/h” para los nudos en la cara, y “d/b” para los nudos en el canto. Existen dos excepciones: los nudos de margen y los nudos de arista.

Nudo de margen: son aquellos nudos de cara que se encuentran a una distancia del canto “s” inferior a su diámetro “d”. Los nudos del margen se medirán en la cara pero se evaluarán como si fueran de canto: con la relación entre el diámetro del nudo y el grosor de la pieza “d/b” y se clasificarán de acuerdo con las exigencias del nudo de canto.



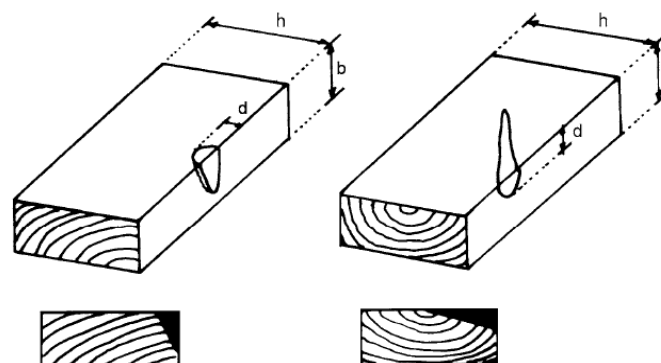
Si  $s \leq d$ , se mide la cara y se evalúa en el canto (d/b)

Se mide en la cara y se evalúa en el canto (d/b)

Si  $s > d$ , se mide y evalúa en la cara (d/h)

**Figura 7:** Medición y evaluación de nudos de margen.

Nudo de arista: son aquellos que se manifiestan en dos superficies contiguas, cara y canto. Se miden en aquellas superficies que los corte más perpendicularmente; si es en la cara se tratan como nudos de margen y si es en el canto como nudo de canto. En ambos casos la evaluación será “d/b”. En caso de duda se tomará el mayor valor (el máximo entre  $d_1$  y  $d_2$ ).

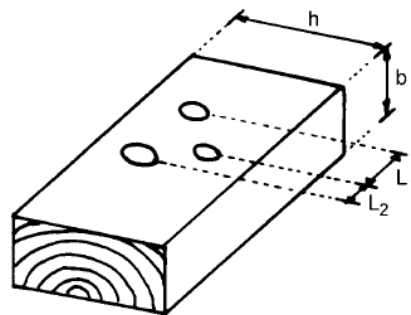


Evaluación de nudo de canto

**Figura 8:** Criterios de medición y evaluación de nudos de arista

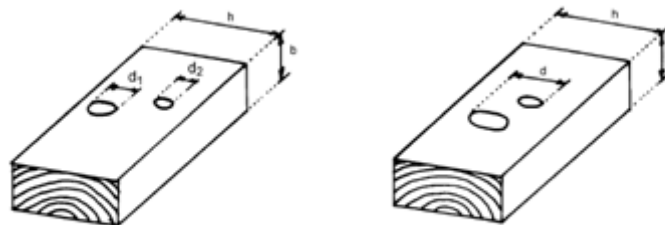
**Nudos agrupados:** Se denominan así sobre la cara o sobre el canto, aquellos nudos cuya distancia entre centros, medida según el eje longitudinal de la pieza, sea inferior a;

- 150 mm, cuando la anchura de la pieza sobrepase los 150 mm, o
- la anchura de la pieza, cuando ésta sea inferior o igual a 150 mm.



Nudos agrupados si  $L_1$  y  $L_2 < 150$  mm para  $h > 150$  mm y  $L_1$  y  $L_2 < h$  para  $h \leq 150$  mm

La medida de los nudos agrupados se hará como la suma de los diámetros cuando no se solapen sobre la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, se medirá globalmente.



Diámetro del nudo:  $d = d_1 + d_2$

Diámetro del nudo:  $d$

**Figura 9:** Criterios de medición de nudos agrupados

## 2.2. Bolsas de resina.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1310:1997, se medirán según su longitud (en mm), en dirección paralela al eje de la pieza.

## 2.3. Entrecasco.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1310:1997, se medirán según su longitud (en mm), en dirección paralela al eje de la pieza.



#### 2.4. Fendas.

De acuerdo con la norma UNE-EN 844:1997 se denomina fenda a toda separación de las fibras (puede ser raja o hendidura) en dirección longitudinal.

Las fendas pueden tener diversos orígenes desde producidas en el secado denominadas fendas de contracción, como producidas por heladuras, rayos, etc.

Fenda pasante: Fenda que se extiende en dos superficies opuestas.

Fenda de cara: fenda que se manifiesta en la cara.

Fenda de canto: fenda que se manifiesta en el canto.

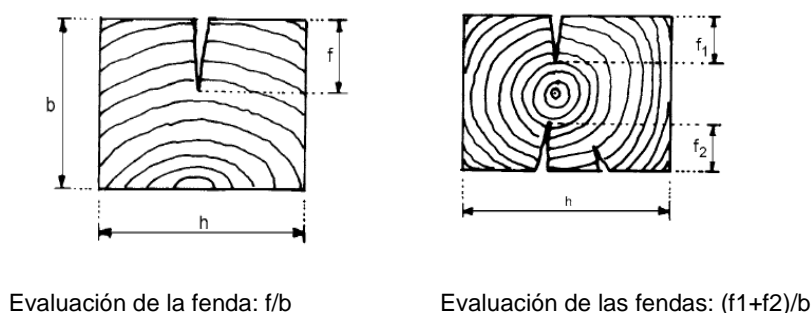
Fenda de testa: fenda que se manifiesta en la testa.

Son solo permitidas las fendas de contracción y en los términos considerados en la tabla 3.

El criterio de evaluación de esta singularidad será el siguiente; se determinará la proyección de la profundidad de las fendas sobre el canto de la sección. La profundidad de las fendas se medirá en el punto de máxima de éstas. No se tendrá en cuenta aquellas fendas que tengan una longitud inferior a la menor dimensión de las dos siguientes;  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la pieza o 1 m.

Se podrán despreciar las fendas cuya anchura no supere 1mm.

El coeficiente “f” de clasificación para este concepto se calculará considerando la proyección sobre el canto de la profundidad mayor a lo largo de toda la pieza, y dividiéndola por el espesor. En el caso de fendas solapadas en la misma cara, se calculará la proyección máxima que engloba a todas ellas. Cuando existen varias fendas en la misma dirección se evaluarán sumando las proyecciones máximas de cada cara.

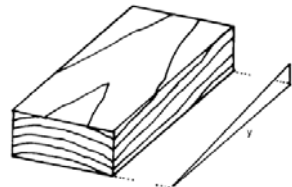


**Figura 10:** Criterios de medición de fendas

### 2.5. Desviación de la fibra.

Refiriéndonos a la desviación general, no teniendo en cuenta las desviaciones locales producidas frecuentemente por presencia de nudos.

De acuerdo con la norma UNE-EN 844:1997 se denomina desviación de la fibra a su desviación media respecto del eje longitudinal de la pieza. Esta desviación se medirá sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable.



Medición de la desviación: x/y

**Figura 11:** Medición de la desviación de la fibra.

### 2.6. Madera de reacción y juvenil.

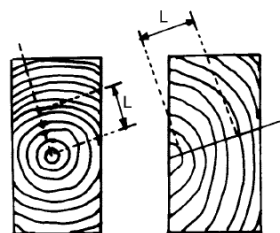
La madera juvenil afecta principalmente a algunas especies de coníferas en los primeros anillos de crecimiento. Se caracteriza por presentar una estructura anatómica diferente a la madera "adulta". La madera juvenil provoca valores elevados de la contracción longitudinal.

La importancia de su presencia radica en que cuando se secan maderas con elevados porcentajes de madera juvenil suelen producirse también elevados porcentajes de curvaturas de cara y de canto. La presencia de madera juvenil junto con la de reacción suele ser la causada más habitual de las deformaciones de cara y canto de la madera durante su secado.

La madera juvenil es reconocible en la sección transversal por la presencia de anillos de crecimiento anormalmente anchos, asociados a una fuerte curvatura de éstos.

### 2.7. Anillos de crecimiento.

La anchura máxima de anillo se determinará en el segmento recto más largo que se puede trazar perpendicularmente a los anillos de crecimiento y que atraviesen a la pieza transversalmente. La medida comenzará en el extremo más cercano a la medula, determinándose el valor medio de la anchura de los cinco primeros anillos de crecimiento. Si la medula no estuviera presente, se medirá los cinco primeros anillos de crecimiento del lado más cercano a la medula.



**Figura 12:** Medición de la anchura máxima del anillo.

### 3. Singularidades ligadas al aserrado de las piezas

#### 3.1. Gemas.

Superficie redondeada original de un tronco, con o sin corteza, que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada. (Fernández Golfín-Seco et al., 2003).

De acuerdo con la norma UNE-EN 1310:1997, la gema se evaluará por su longitud, expresada como fracción de la longitud total de la pieza; y por su anchura; medida en el canto o en la cara, tanto como diferencia relativa, entre el valor nominal y el real de la anchura del canto o de la cara en el punto de máxima diferencia. Si la gema se manifiesta en más de una zona de una misma arista se sumarán las diferentes longitudes.

Evaluación de la sección transversal:

$$g = \text{máx. } (h-h_1/h; b-b_1/b; b-b_2/b)$$

Donde;

b y h espesor y anchura de la pieza en milímetros

$h-h_1$ ,  $b-b_1$ ,  $b-b_2$  espesor o anchura reducida por la gema, en milímetros

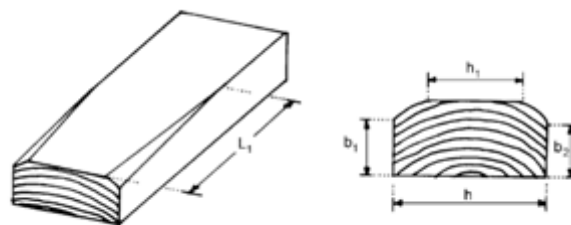
Evaluación de la longitud:

$$L-L_1/L$$

Donde:

L longitud total de la pieza

$L_1$  longitud de la gema en milímetros



**Figura 13:** Medición de las gemas.

### 3.2. Médula.

De acuerdo con la Norma UNE-EN 844:1977, la medula es la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente por tejido blando. Corresponde al tallo inicial, alrededor del cual se produjo el crecimiento en espesor. Su estructura anatómica es distinta al del resto de la madera y el problema de su presencia no radica en su influencia en la resistencia global de la pieza sino en que la madera su próxima puede ser madera juvenil.

### 4. Alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera

#### 4.1. Alteraciones por hongos (azulado, pasmo, pudriciones, etc.).

Azulado: Alteración del color natural de la madera de las coníferas. Es producido por un ataque de hongos cromógenos, generalmente ascomicetes, los cuales se alimentan del contenido interno de la célula (sustancias de almacenamiento), si bien no afectan a la pared celular, por lo que no influye en la posterior resistencia a la madera.

#### 4.2. Alteraciones por plantas parásitas (muérdago).

Planta parásita denominada *Viscum album* y sus subespecies que afectan a la madera de coníferas y frondosas de árboles en pie.

**Tabla 3:** Especificaciones seguidas para la clasificación de piezas de sección rectangular (UNE-EN 56544:2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$\varnothing \leq 1/5$ de "h"	$\varnothing \leq 1/2$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$\varnothing \leq 1/2$ de "b" y $\varnothing \leq 30$ mm	$\varnothing \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLOS DE CRECIMIENTO <sup>1)</sup>			
Pino silvestre		$\leq 4$ mm	Sin limitaciones
Pino laricio		$\leq 5$ mm	Sin limitaciones
Pino gallego y pino pinaster		$\leq 8$ mm	Sin limitaciones
Pino insigne (radiata)		$\leq 10$ mm	Sin limitaciones
FENDAS	De contracción <sup>2)3)</sup>	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	- Acebolladuras	No permitidas	
	- Rayo		
	- Heladura		
	- Abatimiento		
BOLSAS DE RESINA Y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor de 80 mm	
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 1/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
GEMAS			
- longitud		$\leq 1/4$ de "L"	$\leq 1/3$ de "L"
- anchura y espesor		$G \leq 1/4$	$G \leq 1/3$
MÉDULA		No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS			
- Muérdago ( <i>V. album</i> )		No se admite	
- Azulado		Se admite	
- Pudrición		No se admite	
- Galerías de insectos xilófagos		No se admiten	
DIMENSIONES Y TOLERANCIAS		Según las especificaciones de la norma UNE-EN 336:2014	
DEFORMACIONES MÁXIMAS <sup>2) 4)</sup>			
- Curvatura de cara		10 mm (para una longitud de 2 m)	20 mm (para una longitud de 2 m)
- Curvatura de canto		8 mm (para una longitud de 2m)	12 mm (para una longitud de 2m)
- Alabeo		1mm (por cada 25 mm de h)	2 mm (por cada 25 mm de h)
- Atejado o abarquillado		1/25 de h	1/25 de h
1) Estas características sólo se consideran si se comercializan en húmedo.			
2) Estas características no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.			
3) Referidas a un 20% de humedad. Las fendas de contracción sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: ¼ de la longitud de la pieza y 1 m.			
4) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Puede aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.			
Para secciones cuya relación h/b $\leq 1,5$ , las cuatro superficies serán consideradas como caras.			

### 4.3. EQUIPOS DE TRABAJO EMPLEADOS

#### Máquina de medición por ultrasonidos o método de transmisión por ultrasonidos de la marca Sylvatest Trio ®

El equipo consta de un emisor y un receptor que se colocan enfrentados en las dos testas de cada una de las probetas, emitiéndose una serie de pulsos de ondas que recorren longitudinalmente la pieza de madera. El tiempo que emplea la onda en recorrer la pieza es registrado y recogido por el aparato. Este equipo los pulsos son generados eléctricamente.

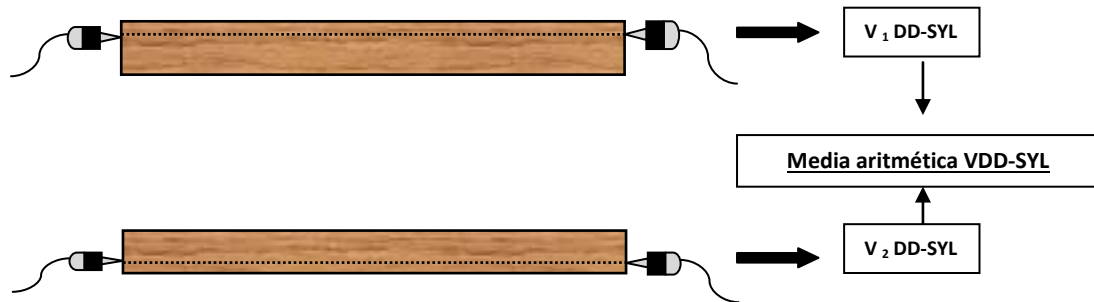


Figura 14: Medida directa realizada con Sylvatest Trio ®. Elaboración propia.

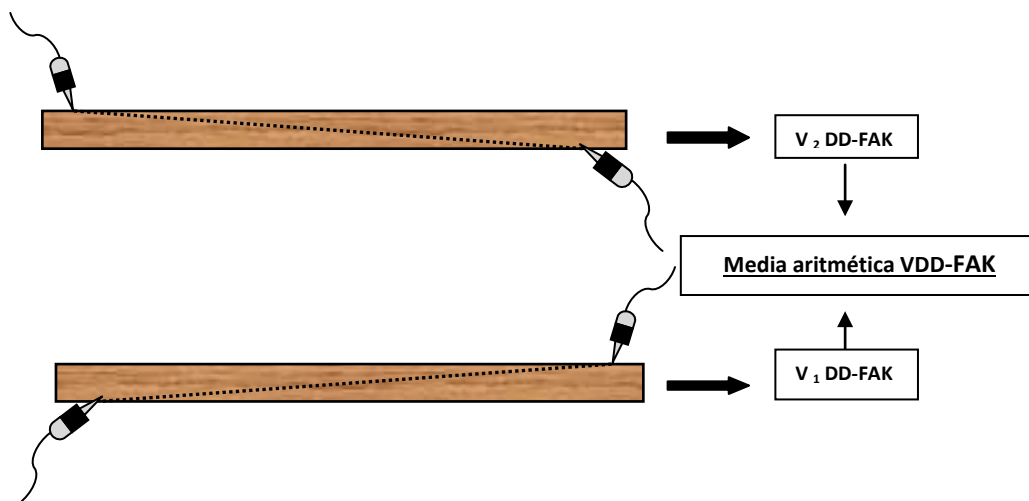


Figura 15: Medida indirecta realizada con Sylvatest Trio ®. Elaboración propia.

Se realizaron dos mediciones directas y dos mediciones indirectas en cada una de las probetas, utilizándose la media aritmética de cada una de ellas en cada tipo de medición, de esta forma obtuvimos la velocidad de propagación utilizando la siguiente fórmula:

$$V = \frac{L}{t}$$

Donde:

L: Longitud de la probeta en m.

t: Tiempo empleado en recorrer la pieza (s)

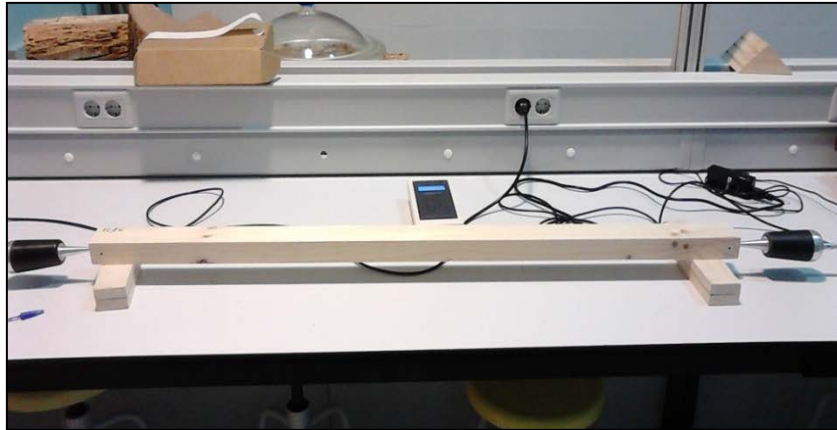
Y también obtuvimos el MOE dinámico con la aplicación de la siguiente relación:

$$MOE_{din} = \delta * V^2$$

Donde:

$\delta$ : Densidad del material en Kg/m<sup>3</sup>.

V: Velocidad de propagación (m/s).



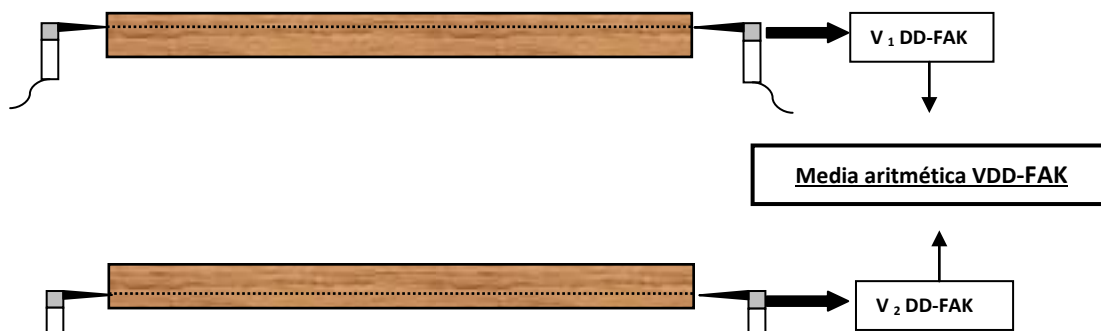
**Figura: 16:** Toma de medida directa con Sylvatest Trio ® en laboratorio.



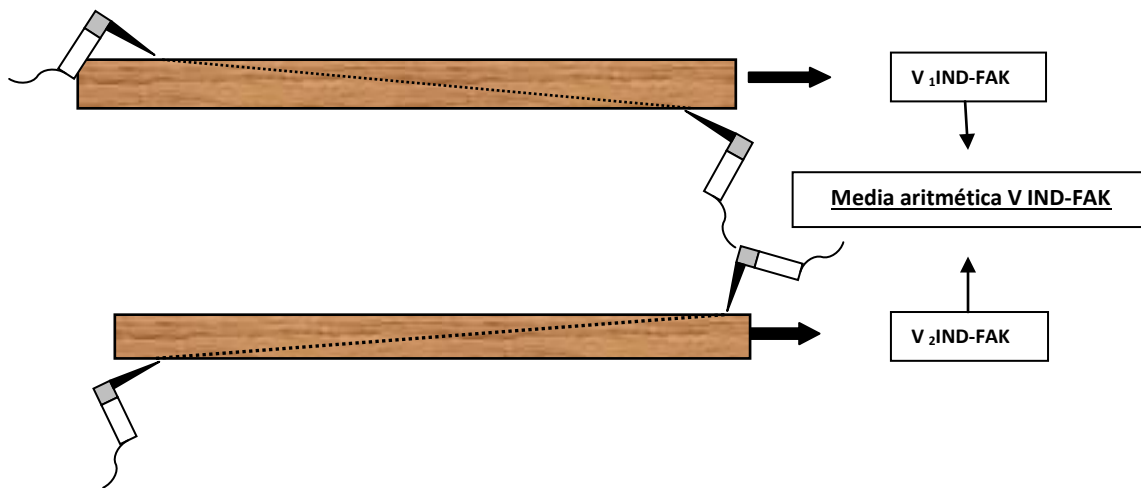
**Figura: 17:** Toma de medida indirecta con Sylvatest Trio ® en laboratorio.

### **Máquina de medición por ultrasonidos o método de transmisión por ultrasonidos Microsecond Timer de Fakopp (MST)**

Este equipo consta de un martillo, dos sensores con cables integrados que actuaran uno como emisor y otro como receptor y una unidad de control con un visor en el que queda reflejado el tiempo transcurrido en microsegundos. En este equipo los impulsos son generados mediante excitación mecánica del transductor emisor, con este aparato también se realizaron dos medidas directas y dos medidas indirectas en cada una de las piezas de madera utilizando la media aritmética para la obtención de la velocidad de propagación.

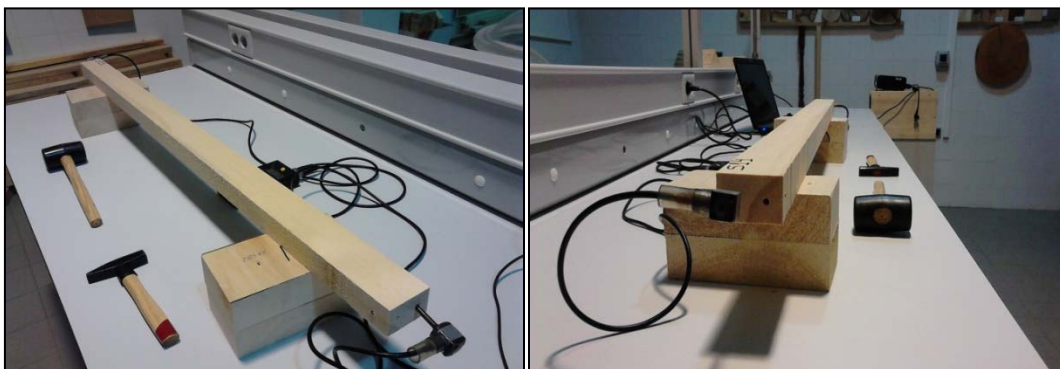


**Figura 18:** Medida directa realizada con Microsecond Timer de Fakopp (MST). Elaboración propia.



**Figura 19:** Medida indirecta realizada con Microsecond Timer de Fakopp (MST). Elaboración propia.

Este método también está basado en la relación existente entre la velocidad de propagación de una onda (la que generamos nosotros con el impacto del martillo en el emisor) con el módulo de elasticidad y la densidad. Por lo que se utilizaron las mismas relaciones que en el apartado anterior.



**Figura: 20:** Toma de medida directa e indirecta con Microsecond Timer de Fakopp (MST).

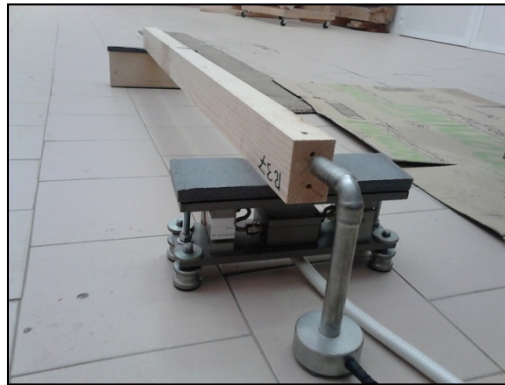


### Equipo PLG (Portable Lumber Grader).

El equipo denominado PLG (Portable Lumber Grader) es un equipo portátil utilizado para la clasificación de madera aserrada basándose en el análisis de una vibración longitudinal inducida por lo que le podemos clasificar dentro de los métodos no destructivos.

El procedimiento de ensayo consistió en colocar cada una de las 80 probetas sobre dos soportes con apoyos que permitieran la vibración libre a través de la longitud de la pieza.

La pieza es golpeada en una de sus extremos utilizando un martillo generando una onda de presión que recorre longitudinalmente toda la pieza. Esta señal acústica es registrada por un micrófono que colocamos anteriormente en el lado contrario de la probeta, siendo sintetizado mediante un analizador de sonidos (software que recoge la señal). De esta forma se calcula la frecuencia fundamental de vibración longitudinal de la pieza con el fin de poder clasificarla utilizando la frecuencia natural de la pieza para llegar a definir la calidad del material.



**Figura: 21:** Toma de medida con PLG (Portable Lumber Grader).

Con el dato de frecuencia podemos calcular el módulo de elasticidad dinámico a partir de la siguiente expresión:

$$E_{din} = (2 * L * f)^2 * \delta$$

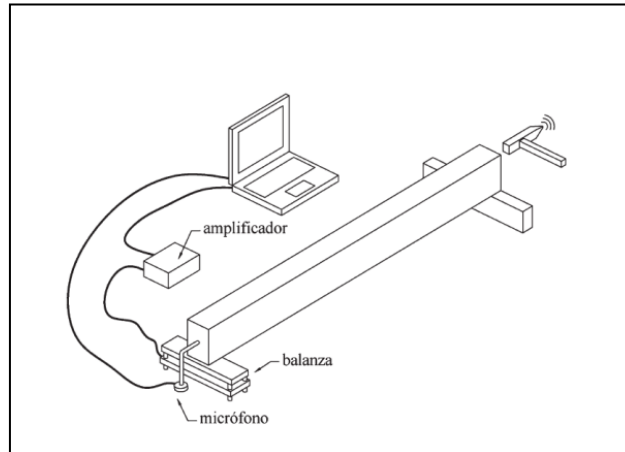
Donde:

$E_{din}$ : Módulo de Elasticidad Dinámico en N/ m<sup>2</sup>;

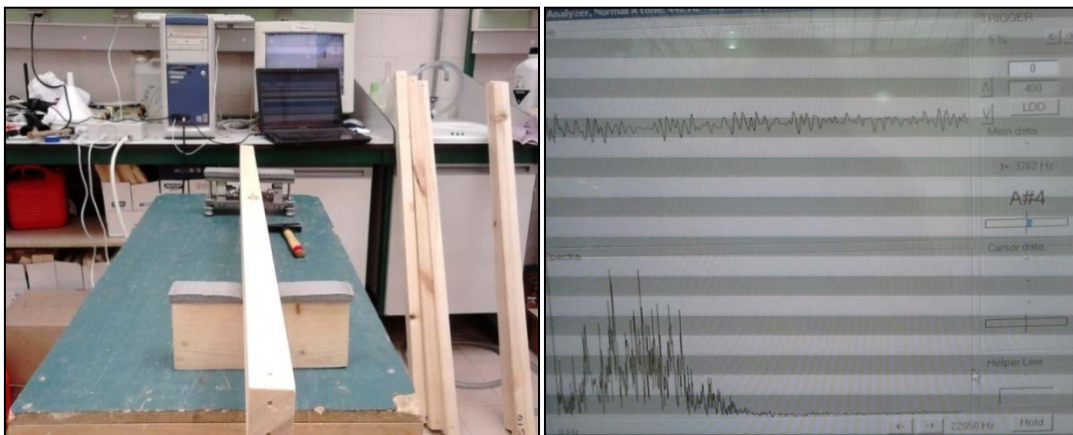
L: Longitud de la probeta en m.

f : Frecuencia natural de vibración longitudinal en Hz.

$\delta$ : Densidad del material en Kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 22:** Equipo de análisis de la vibración longitudinal (PLG). Fuente: Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural.



**Figura 23:** Equipo PLG (Portable Lumber Grader) conectada a un ordenador y pantalla final en la que se muestra la medida de frecuencia de vibración en Hz.

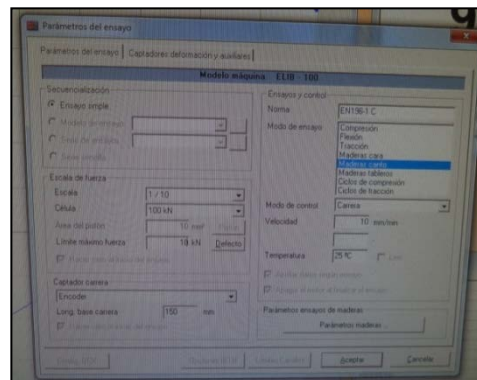
### **Máquina Universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest®**

Se trata de una máquina electromagnética que permite al usuario la ejecución de ensayos universales de amplia variedad como ensayos de tensión, dureza, torsión, compresión entre otros. Este equipo consta de una bancada metálica resistente de grandes dimensiones, sobre la que existe la posibilidad de la colocación de diferentes accesorios en función del objeto y los parámetros del ensayo a ejecutar. Esta máquina debe estar conectada siempre a un ordenador que dispondrá de un software exclusivo y adaptado para la realización de los diferentes ensayos mostrando los resultados.



**Figura: 24:** Vista general de la Máquina Universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest ® utilizada en los ensayos de flexión y de rotura.

Realizaremos un ensayo de flexión estática para conocer el MOEG, el cuál culminaremos con la obtención del MOR en un ensayo de rotura, basándonos en ambos ensayos en la norma UNE-EN-408:2011. Para llevar a cabo estos dos ensayos se acoplo a la maquina universal uno de sus múltiples accesorios que consistía en una viga metálica de gran tamaño la cual actuara sobre las probetas en su parte central de uno de sus cantos. Las probetas posadas sobre dos apoyos que son variables adaptándose a las dimensiones de las probetas a ensayar.



**Figura: 25:** Interfaz en la que se muestran los parámetros característicos de uno de los ensayos ejecutados.

Con el software instalado en el ordenador que se encuentra conectado con la maquina universal controlaremos el momento justo en el que debemos colocar el extensómetro o sensor de deformaciones de forma perpendicular en la parte central del canto de la probeta con el que realizamos el ensayo de flexión donde obtuvimos la primera medida de deformación de la parte central para en ese momento retirar el extensómetro o culminar con la ejecución del ensayo de rotura.



**Figura: 26:** Extensómetro o sensor de deformación y momento inmediatamente después de la ejecución del ensayo de rotura.

El resultado final de los anteriores ensayos fue la obtención de cada una de las 80 probetas de su Módulo de rotura a la flexión (MOR) y su Módulo de elasticidad global a la Flexión (MOEG).

Campo	Valor	Unidad
Fecha de ensayo	10/05/2016 11:00	
Referencia	Pino radiata 17	
Modo de ensayo	Maderas canto	
Velocidad	10	mm/min
Célula	100	kN
MOR408	22.716	MPa
MOET 384	0	MPa
MOE (Enil)	0	MPa
MOEG [Emg]	0	MPa
MOEGCTO	0	MPa
Área	102.03	mm <sup>2</sup>
Fuerza máxima	3.466	kN
Resistencia máxima	33.966	MPa
Pendiente 1 WA 20	0	mm/kN
Pendiente 2 WA 20	0	mm/kN
Pendiente 3 WA 50	0	mm/kN

**Figura: 27:** Interfaz de resultados obtenida al finalizar un ensayo de flexión y de rotura.

Al obtener el MOEG pudimos calcular el Módulo de elasticidad dinámico del material (MOE). Destacar que al tratarse este de un ensayo destructivo las probetas de madera quedaron inservibles.



**Figura 28:** Estado de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de médula en las probetas.



**Figura 29:** Estado de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de singularidades como nudos.



**Figura 30:** Estado de una de las probetas después de llevar a cabo el ensayo de rotura. Rotura causada por la presencia de desviación de fibra.

### Material complementario

#### Rotuladores permanentes

Empleados en la identificación de cada una de las probetas de los dos lotes. Con un código para identificar a que especie pertenecía y que numero de pieza.



**Figura 31:** Detalle de probetas pertenecientes al lote de *Pinus sylvestris* L. identificadas y preparadas para la posterior clasificación visual.

#### Balanza de precisión digital

Utilizada para pesar cada una de las 80 probetas en los ensayos en los momentos de determinación de la humedad y determinación de la densidad.



**Figura 32:** Balanza de precisión digital.

#### Calibre

Este instrumento también conocido como pie de Rey le empleamos para medir las dimensiones de las piezas obtenidas de las probetas para el cálculo de la humedad. Los valores de precisión de las piezas analizadas fueron de dos decimales.

#### Estufa

Se secaron las rebanadas obtenidas de diez probetas de cada una de las especies, durante 24 horas a una temperatura aproximada de 104 °C con el fin de conocer la humedad a la que se encontraban nuestras probetas.

#### Taladro eléctrico

Se realizaron 2 orificios en cada una de las dos testas de cada pieza de madera además de otros 2 agujeros en cada canto de cada probeta para la correcta colocación de los sensores de forma cónica de equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio<sup>®</sup>.



**Figura 33:** Detalle de los orificios en testas para la realización de la medida directa con equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio<sup>®</sup>.



**Figura 34:** Detalle de los orificios en cantos para la realización de la medida indirecta con equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®.



**Figura 35:** Taladro eléctrico.

#### Flexómetro con precisión de 1mm

Se utilizó en varias fases como en la clasificación visual para la medida de singularidades como nudos, también se utilizó en el momento de colocación de los palpadores al utilizar los dos aparatos de ultrasonidos tanto Sylvatest Trio ® como el Fakopp.

También se empleó en el ensayo de flexión para la correcta colocación de las probetas en la maquina universal.

#### Sierra circular

Utilizada en la obtención de las probetas además y para la obtención de las piezas de menor tamaño que utilizamos para la obtención de la humedad.

Los equipos e instrumentos descritos en este apartado pertenecen al Laboratorio de Maderas de la E.T.S.I.I. Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

#### 4.4. METODOLOGÍA EMPLEADA

##### 4.4.1. MATERIAL UTILIZADO

Se aserraron piezas de madera de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D.Don con procedencia del País Vasco, con el fin de obtener probetas de ambas especies con unas características determinadas. Estos trabajos de obtención de las probetas objeto del TFM se llevaron a cabo en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, de la Universidad de Valladolid.

La manipulación de las iniciales piezas para su posterior aserrado lo llevo a cabo personal especializado utilizando sierras circulares y de banda que se encuentran en este laboratorio.

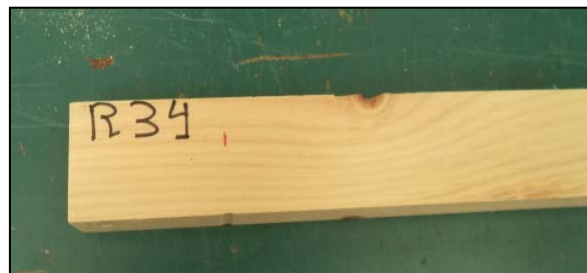
Se obtuvieron un total de 80 probetas de ambas especies con dimensiones 6 x4 x 120 cm de diferentes tipos de cortes tanto tangenciales como radiales, reflejando estas dimensiones una situación de madera estructural a escala 1/5.

##### 4.4.2. SELECCIÓN Y NUMERACIÓN DEL MATERIAL

Después de la obtención de las probetas se hizo una selección entre las probetas obtenidas eliminando las piezas con defectos visibles como irregularidades que pudieran falsear los futuros resultados. Se intentó que fueran piezas lo más representativas de cada una de las especies a la que pertenecían.

A continuación se llevó a cabo la identificación de cada una de las probetas seleccionadas adjudicándolas un código formado por una letra y un número.

La letra fue "S" para las probetas de *Pinus sylvestris* L. y "R" para las probetas de *Pinus radiata* D.Don acompañada por un número del 1 al 40.



**Figura 36:** Probeta de *Pinus radiata* D.Don con su código identificativo formado por una letra y un número.



**Figura 37:** Probeta de *Pinus sylvestris* L. con su código identificativo formado por una letra y un número.



#### 4.4.3. MEDICIÓN DE DIMENSIONES Y DENSIDAD

Se dimensionaron cada una de las probetas con precisión milimétrica ayudándonos de un calibre, estas dimensiones las utilizamos en diferentes partes del trabajo, siendo una de las más importantes la estimación de la densidad.

Conociendo:

L = longitud de la probeta (cm).

h = altura de la probeta (cm).

b = anchura de la probeta (cm).

Y sabiendo que el volumen de la probeta se obtiene con la siguiente relación:

$V = L \cdot h \cdot b$ , obteniendo como resultado el volumen en  $\text{cm}^3$  de cada una de las probetas.

A continuación se llevó a cabo la pesada de cada una de las probetas utilizando una balanza de precisión, recogiendo cada medida de masa (en gramos).



**Figura 38:** Pesada de una de las probetas. Se pesaron todas las probetas de ambos lotes.

Con los dos datos anteriormente recogidos de cada una de las probetas, por un lado Volumen ( $\text{cm}^3$ ) y por otro lado la masa, y utilizando la relación conocida:

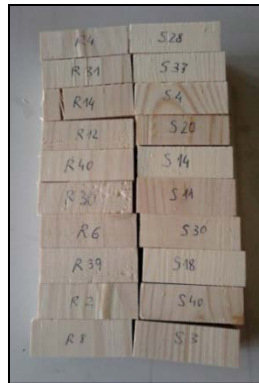
$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = \text{Masa (g)} / \text{Volumen (cm}^3\text{)}$$

De esta forma se obtuvo la densidad de cada una de las probetas que formaban parte del trabajo.

#### 4.4.4. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD

Para la obtención de la humedad se llevó a cabo el procedimiento descrito en las normas UNE-EN 56529:77 “Caracterización físico mecánica de la madera, determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro”.

La forma de proceder fue la siguiente: Se seleccionaron 10 probetas de cada una de las dos especies, de las que se obtuvo una rebanada.



**Figura 39:** Rebanadas procedentes de las probetas iniciales, las cuales pesamos y secamos para obtener la humedad de los lotes.

A continuación estas rebanadas ser identificaron con el mismo código que tenían las probetas de donde se obtuvieron y se pesaron.

Después de obtener su peso con la balanza de precisión se procedió a secado en estufa durante 27 horas y a una temperatura de 103 °C. Tras el secado se realizó una segunda pesada.

Mediante la ecuación:

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

Donde;

H= Contenido de humedad de la rebanada

Ph= Peso húmedo de la rebanada (g)

Po = Peso seco de la rebanada (g)

De esta forma pudimos conocer una estimación de la humedad media de cada una de las especies.

#### 4.4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Durante el periodo de trabajo en laboratorio se fueron recogiendo todas las medidas directas realizadas y las obtenidas a través de los diferentes métodos de ensayos ya sean no destructivos o destructivos en un fichero excel siempre referenciando cada una de las medidas a la probeta en la que se realizaba la medida para después introducir todos los datos obtenido en el Software "STATGRAPHICS CENTURIÓN XVII".

En primer lugar se hizo un análisis descriptivo de cada una de las variables que obtuvimos directamente mediante medida en laboratorio.

Posteriormente se hizo un análisis descriptivo de cada uno de los Módulos de Elasticidad Dinámicos, después de aceptar los supuestos estadísticos (independencia, normalidad y homocedasticidad) se trabajó con análisis de varianza (ANOVA) con el fin de que nos proporcionaran información acerca de si las diferencias entre las medias de las distintas poblaciones (las dos especies del género *Pinus* sp.)

Por último se realizó un análisis predictivo, más concretamente un análisis de regresión múltiple que nos permitió establecer la relación que se produce entre una variable dependiente MOEG (MPa) y diferentes variables independientes la anchura de los anillos (cm), la densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ), la velocidad tomada con PLG, la velocidad directa e indirecta tomada con Sylvatest Trio<sup>®</sup> y la velocidad directa e indirecta tomada con Fakopp.

#### 4.4.5.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Entendemos como estadística descriptiva las técnicas que nos permiten realizar un análisis elemental de las observaciones experimentales observadas, en este caso en concreto de las medidas que obtuvimos realizando los diferentes ensayos y medidas en el laboratorio.

A continuación se describen brevemente los diferentes términos estadísticos y coeficientes utilizados en la estadística descriptiva llevada a cabo.

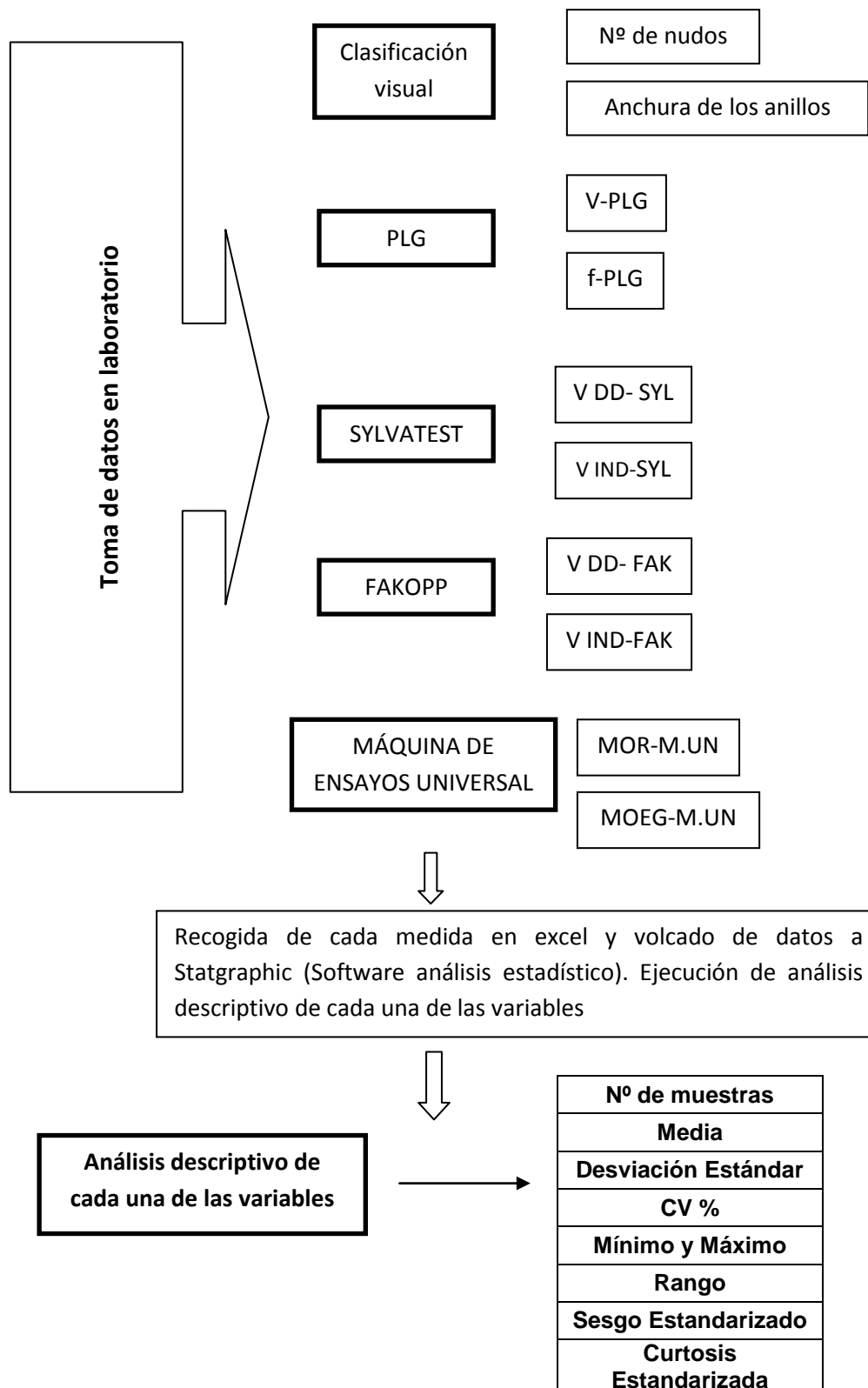
- **Media:** Se define como la suma de los valores de los elementos dividida por la cantidad de éstos. Conocida también esta como promedio o media aritmética. De esta se intuye la centralidad de la muestra a analizar.
- **Varianza:** Se define como la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de las mismas. Medida vinculada a la dispersión.
- **Máximo:** mayor valor de entre los diferentes valores que toma la variable.
- **Mínimo:** menor valor de entre los diferentes valores que toma la variable.
- **Desviación típica:** Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Las interpretaciones que se deducen de la desviación típica son por lo tanto similares a las que podemos deducir de la varianza.
- **Coefficiente de variación:** Se define como el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética. Si muestra valores bajos se intuye una alta concentración de los datos. Esta información se suele representar en %.
- **Sesgo:** Mide las desviaciones de las Medidas de Tendencia Central. Se entiende como un grado de asimetría o falta de asimetría. Mide el grado de asimetría de una distribución con respecto a su media. La asimetría positiva indica una distribución que se extiende hacia valores más positivos. La

asimetría negativa indica una distribución que se extiende hacia valores más negativos.

- **Curtois:** Mide el grado de agudeza o achatamiento de una distribución normal, es decir, mide cuanto de puntiaguda es la distribución. De ésta se intuye el grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución; indica la cantidad de datos que hay cercanos a la media.

Se realizó un análisis descriptivo de cada una de las variables que obtuvimos directamente mediante medida en laboratorio, las cuales fueron:

- Anchura de los anillos
- Número total de nudos
- Humedad
- Densidad
- Velocidad media directa tomada con Sylvatest Trio® (V DD-SYL)
- Velocidad media indirecta tomada con Sylvatest Trio® (V IND-SYL)
- Velocidad media directa tomada con Fakopp (V DD-FAK)
- Velocidad media indirecta tomada con Fakopp (V IND-FAK)
- Velocidad media tomada con PLG (V-PLG)
- MOR
- MOEG



**Figura 40:** Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística descriptiva).

#### 4.4.5.2. ESTADÍSTICA COMPARATIVA

En primer lugar se hizo una breve estadística descriptiva de las variables objeto de estudio a través de Análisis de Varianza.

Un paso necesario y fundamental en la aplicación de cualquier procedimiento estadístico es la verificación de las hipótesis de normalidad de los datos pertenecientes a cada variable, se trata de realizar las constataciones de los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad. Para esto se utilizó la prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov llevada a cabo en una muestra permite medir el grado de concordancia (comparar) existente entre una función empírica y una función teórica, se podría decir de otra manera señalando que se trata de contrastar si las observaciones que hemos realizado podrían proceder de una distribución específica, en nuestro caso una distribución normal. Utilizaremos esta prueba para comprobar si nuestras variables objeto de estudio se distribuyen normalmente.

Por otro lado se debió de constatar el cumplimiento de homocedasticidad, para ello trabajamos con la gráfica predichos frente a residuos, en la que los residuos son las desviaciones de cada valor observado para la variable dependiente y la media de su grupo. Estos gráficos son útiles para comprobar visualmente la hipótesis de homocedasticidad. Para poder afirmar que se cumple la hipótesis de homocedasticidad no deberemos observar ningún patrón ni forma de embudo.

Optamos por llevar a cabo una estadística no paramétricas debido a que las distribuciones que siguen nuestras variables no las podemos definir a priori puesto que son los datos observados lo que lo determinan, debido a que no podemos asumir que los datos recogidos se ajusten a una distribución conocida.

Después de aceptar los supuestos estadísticos se trabajó con análisis de varianza (ANOVA) con el fin de que nos proporcionaran información acerca de si las diferencias entre las medias de las distintas poblaciones (las dos especies del género *Pinus* sp.) son significativas, es decir superior a la variabilidad normal dentro de cada uno de los dos lotes de las diferentes especies.

Una vez realizados los análisis descriptivos se procedió a la realización de un estudio comparativo de las variables. Para ello se utilizó análisis de varianza (ANOVA) para la comprobación del cumplimiento de las condiciones de normalidad, independencia y homocedasticidad.

El análisis de la varianza permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de K poblaciones ( $K > 2$ ) son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de K “tratamientos” o “factores” con respecto a la variable de interés.

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K = \mu \\ H_1: \exists \mu_j \neq \mu \quad j = 1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

El ANOVA requiere el cumplimiento de los siguientes supuestos:

- Las poblaciones son normales
- Las K muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- Las poblaciones tienen todas igual varianza (homoscedasticidad).

El ANOVA se basa en la descomposición de la variación total de los datos con respecto a la media global (SCT), que bajo el supuesto de que  $H_0$  es cierta es una estimación de  $\sigma^2$  obtenida a partir de toda la información muestral en dos partes:

- Variación dentro de la muestra (SCD) o Intra-grupos, cuantifica la dispersión de los valores de cada muestra con respecto a sus correspondientes medias.
- Variación entre muestras (SCE) o Inter-grupos, cuantifica la dispersión de las medias de las muestras con respecto a la media global.

Las expresiones para el cálculo de los elementos que intervienen en la Anova son las siguientes:

Media Global:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n}$$

Variación Total:

$$SCT = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X})^2$$

Variación Intra-grupos:

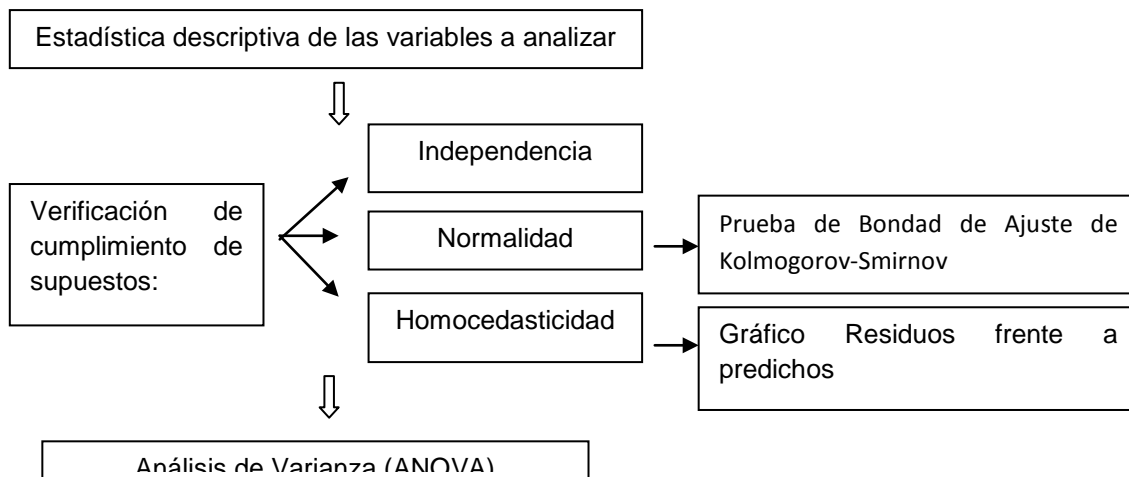
$$SCD = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Variación Inter-grupos:

$$SCE = \sum_{j=1}^K (\bar{X}_j - \bar{X})^2 n_j$$

Siendo  $x_{ij}$  el  $i$ -ésimo valor de la muestra  $j$ -ésima;  $n_j$  el tamaño de dicha muestra y  $\bar{X}_j$  su media.

Cuando la hipótesis nula es cierta  $SCE/K-1$  y  $SCD/n-K$  son dos estimadores insesgados de la varianza poblacional y el cociente entre ambos se distribuye según una F de Snedecor con  $K-1$  grados de libertad en el denominador. Por lo tanto si  $H_0$  es cierta cabe esperar que el cociente entre ambas estimaciones sea aproximadamente igual a 1, de forma que se rechazará  $H_0$  si dicho cociente difiere significativamente de 1.



**Figura 41:** Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística comparativa).

#### 4.4.5.3. ESTADÍSTICA PREDICTIVA

El análisis de regresión múltiple nos permite establecer la relación que se produce entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes ( $X_1, X_2, \dots, X_k$ ); En el caso que nos ocupa tomaremos como variable dependiente MOEG (MPa) y como variables independientes la anchura de los anillos (cm), la densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ), la velocidad tomada con PLG, la velocidad directa e indirecta tomada con Sylvatest Trio® y la velocidad directa e indirecta tomada con Fakopp. Este tipo de análisis a diferencia del simple, se aproxima más a situaciones de análisis real, puesto que hechos, fenómenos y procesos son complejos, y en consecuencia deben ser explicados en la medida de lo posible por la serie de variables que directa o indirectamente participan de su concreción.

La anotación matemática del modelo o ecuación e regresión múltiple es la siguiente:

$$Y = a + b_{1x1} + b_{2x2} + \dots + b_{n \times n} + e$$

En donde:

Y, es la variable a predecir;

a,  $b_{1x1}$ ,  $b_{2x2}$ ,  $b_{n \times n}$ , son parámetros conocidos a estimar;

y e es el error que cometemos en la predicción de los parámetros.

El modelo obtenido se podrá utilizar para hacer predicciones, incluyendo límites de confianza y límites de predicción.

A continuación se exponen los predictores tomados en la obtención de nuestro modelo:

- Como variable dependiente: Modulo de elasticidad Global MOEG (MPa).
- como variable independientes: Anchura anillos (cm), densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ), velocidad tomada con PLG (m/s), velocidad directa tomada con Sylvatest Trio® (m/s), velocidad indirecta tomada con Sylvatest Trio® (m/s), velocidad directa tomada con Fakopp (m/s) y velocidad indirecta tomada con Fakopp (m/s).



Un método habitual para simplificar el modelo es ejecutar la regresión paso a paso. En cada paso de la regresión se van añadiendo o eliminando variables de la regresión una cada vez, con la finalidad de obtener un modelo que contenga sólo predictores significativos. Más concretamente se llevó una predicción paso a paso hacia adelante esto significa que comenzamos con un modelo que contiene sólo la constante e introduce variables de una en una que mejoran significativamente el ajuste. En este método las variables que son eliminadas en uno de los pasos pueden ser introducidas como predictores en los posteriores pasos, al igual que variables que son introducidas en los primeros pasos pueden ser eliminadas en posteriores pasos sino aportan suficiente significatividad al modelo.

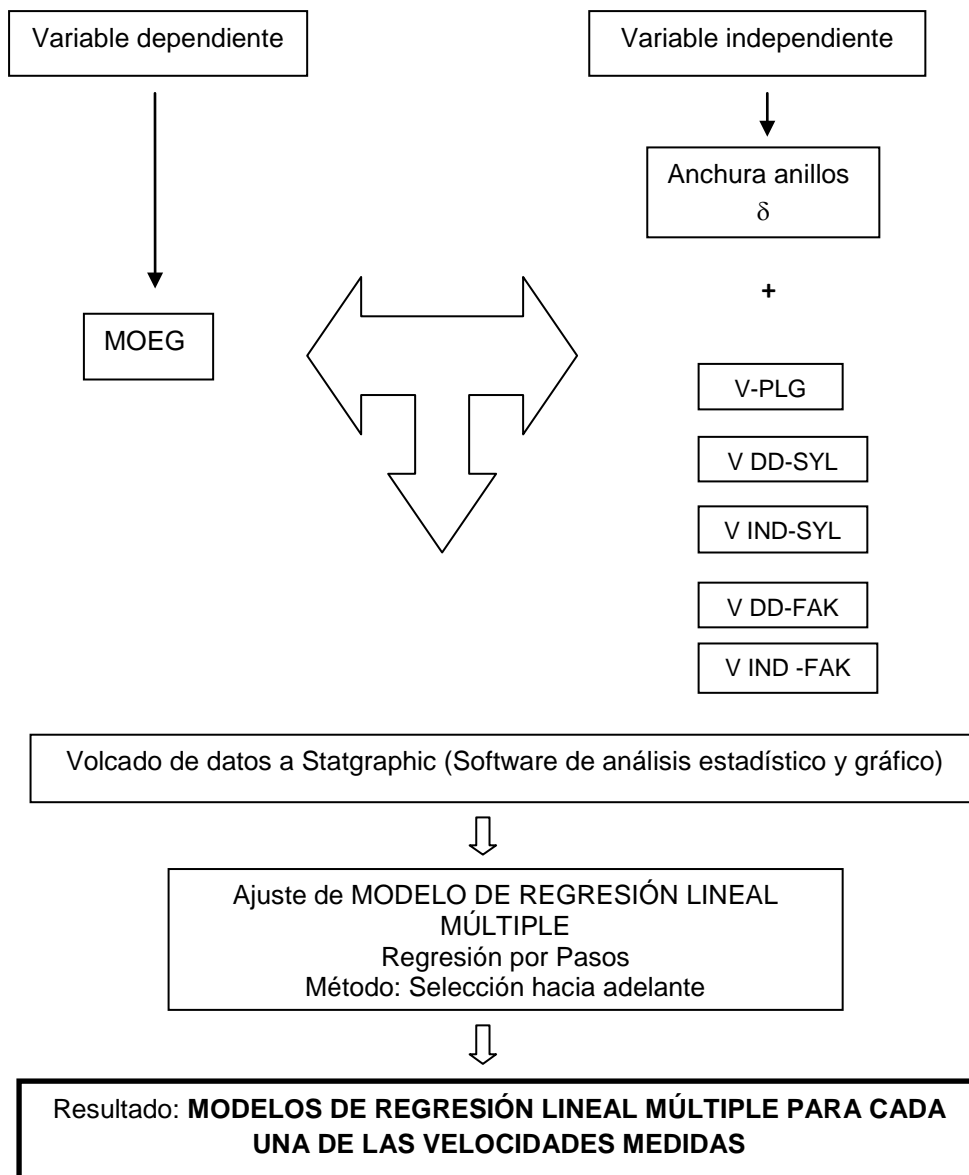


Figura 42: Breve esquema del procedimiento anterior descrito. (Estadística predictiva).

#### 4.5. ASIGNACIÓN DE CLASES RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 338:2016

Después de realizar la clasificación de las probetas por el método visual, realizar tanto los ensayos no destructivos como los destructivos, también vamos a clasificar las probetas pertenecientes a los dos lotes según la norma UNE-EN 338:2016.

La norma que desarrolla la asignación de clases de calidad a clases resistentes es la UNE-EN-338:2016, "Madera estructural. Clases resistentes". Esta norma es la versión oficial, en español de la Norma Europea EN-338:2016. Establece un sistema de clases resistentes, agrupando calidades y especies que tienen niveles de resistencia similares, de forma que puedan ser intercambiables, facilitándose así los cálculos y diseños de las estructuras de madera. En ella se describen cada una de las clases resistentes, de tal forma que, para cada una de ellas, se adjuntan los valores característicos o medios de la resistencia, la elasticidad, la densidad, etc. Se realiza una diferenciación entre clases resistentes de coníferas y de frondosas, presentando estas últimas un número menor de ellas, que se explica por su menor uso estructural. La estructura anatómica de coníferas y frondosas, al ser muy diferente, repercute en unos valores distintos de resistencia y tan solo el chopo presenta un comportamiento estructural similar al de coníferas, aplicándosele las mismas clases de resistencia. Con este sistema se consigue que se puedan realizar los cálculos con las propiedades mecánicas pertenecientes a una clase resistente determinada, sin necesidad de conocer sus costes y calidades, independientemente del tipo de especie que después se utilice. Se amplía la oferta al poder obtener para una misma resistencia diferentes combinaciones especie-calidad, y a la misma vez se ofrece más información y unos productos que cumplan los valores mínimos de resistencia solicitados. Esta norma incluye un total de 20 clases resistentes repartidas en 12 clases de resistencia para coníferas, y 8 para frondosas. Estas se definirán por el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase de resistencia, en N/mm<sup>2</sup>, precedido por la letra C o D, la cual hace referencia al género de la especie ("coniferous" y "deciduous"). El sistema de clases resistentes se define en las siguientes clases:

- **Coníferas y chopo:** se diferencian 12 clases resistentes denominadas con la letra C (C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 y C50).
- **Frondosas:** se diferencian 8 clases resistentes denominadas con la letra D (D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60 y D70); este menor número de clases se debe a que las especies de frondosas no se utilizan frecuentemente con fines estructurales.

En la tabla 4 que ha sido elaborada según la norma UNE-EN 338:2016, se puede observar los valores mínimos de la propiedad resistente (flexión), propiedad de rigidez (módulo de elasticidad paralelo medio) y densidad (densidad media) asociados a las diferentes clases de resistencia para madera aserrada de uso estructural de especie de coníferas.

**Tabla 4:** Valores asociados a clase resistente según norma UNE-EN 338:2016. Madera aserrada de uso estructural. Coníferas y chopo.

PROPIEDAD	CLASE RESISTENTE											
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Flexión $f_{m,0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Módulo de elasticidad paralelo medio $E_{mn,0,medio}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Densidad media $\delta_{media}$	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520



## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se exponen los resultados obtenidos tras en tratamiento estadístico de los datos recogidos durante la fase de ejecución ensayos en laboratorio. Los citados ensayos se han llevado a cabo siguiendo la metodología expuesta en el apartado de material y métodos.

### 5.1. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN VISUAL.

Mediante la norma UNE-EN 56544:2011, se han asignado las clasificaciones visuales, que establece un sistema de clasificación en función de las características y singularidades que posee la madera.

Esta norma conforme a las características y singularidades de la madera establece dos calidades o clases de calidad para nuestro tipo de piezas denominadas ME-1 y ME-2 (madera estructural de primera y madera estructural de segunda respectivamente).

Señalar que el resto de piezas que no han sido incluidas, de acuerdo con sus características visibles en alguna de las dos clases anteriores citadas se las han denominado Rechazos, debido a que no son útiles para fines estructurales pero si para otros usos menos exigentes que el estructural, no siendo una calidad en sí misma.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de la clasificación visual según la Norma UNE 56544:2011 en función del lote. Como se puede observar en el lote formado por 40 probetas de *Pinus sylvestris* L., 17 han sido clasificadas como ME-1, que se corresponden a un 42,50 %, 13 como ME-2 que se corresponden a un 32,50% y por último las 10 restantes han sido agrupadas como Rechazos suponiendo un 25% del total del lote.

**Tabla 5:** Clasificación visual del lote de probetas de *Pinus sylvestris* L. según Norma UNE 56544:2011.

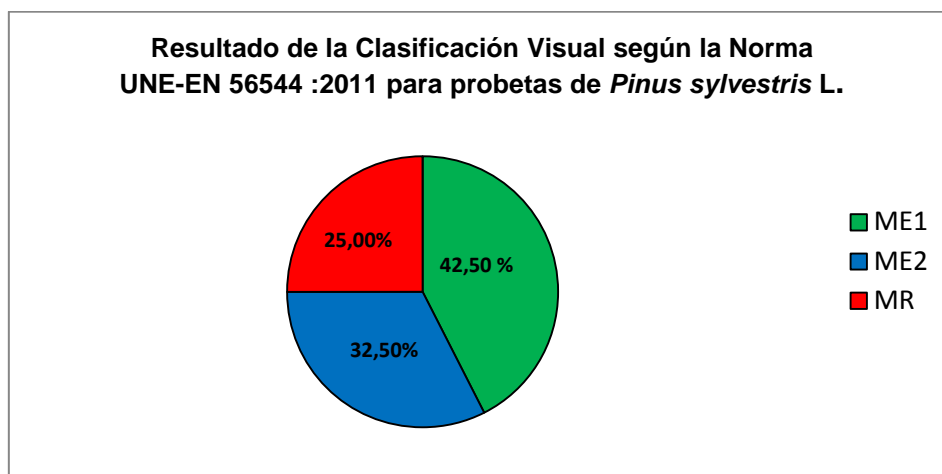
Resultado de la Clasificación Visual según Norma UNE-EN 56544 : 2011 para probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.				
Nº de probetas	Clase ME-1	Clase ME-2	Rechazo (R)	Motivos del rechazo
40 (100%)	17 (42,50%)	13 (32,50%)	10 (25,00%)	Nudos

En relación al *Pinus radiata* D. Don la agrupación ha sido diferente; de las 40 probetas pertenecientes al lote de *Pinus radiata* D., 8 de ellas lo que supone el 20 % han sido clasificadas como ME-1, 22 de ellas que se corresponden al 55% han sido catalogadas como ME-2 y por último 10 de ellas no cumplían los criterios para pertenecer a la ME-1 ni a la ME-2, por lo que se han agrupado como Rechazo suponiendo el 25% del total .

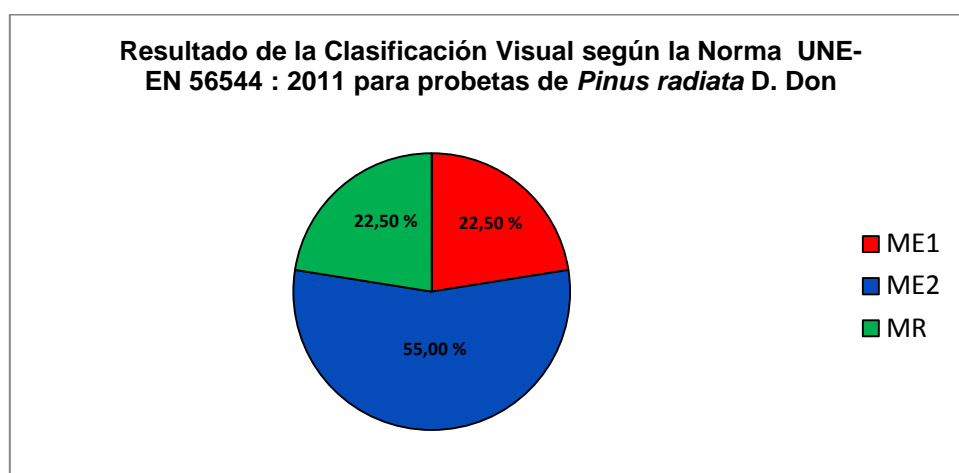
**Tabla 6:** Clasificación visual del lote de probetas de *Pinus radiata* D.Don según Norma UNE-EN 56544:2011.

Resultado de la Clasificación Visual según Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don.				
Nº de probetas	Clase ME-1	Clase ME-2	Rechazo (R)	Motivos del rechazo
40 (100%)	9 (22,50%)	22(55,00%)	9 (22,50%)	Nudos

A continuación se muestran los resultados de la clasificación visual gráficamente, destacar que el porcentaje de Rechazos “R” es similar en ambas especies siendo el 25% para *Pinus sylvestris* L. y el 22,50% para *Pinus radiata* D.Don tal y como se muestra en las figuras 43 y 44.



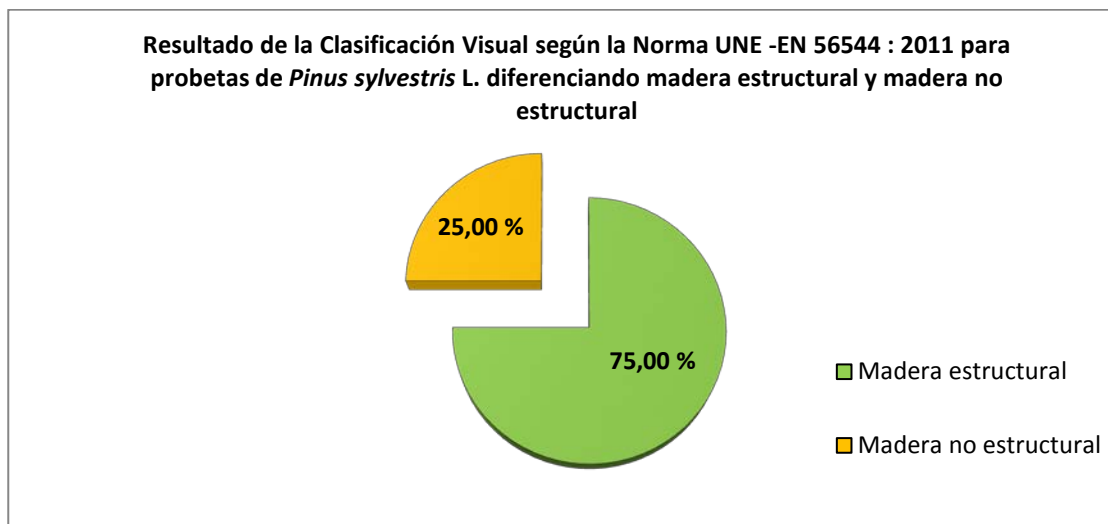
**Figura 43:** Resultado de la clasificación visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de *Pinus sylvestris* L.



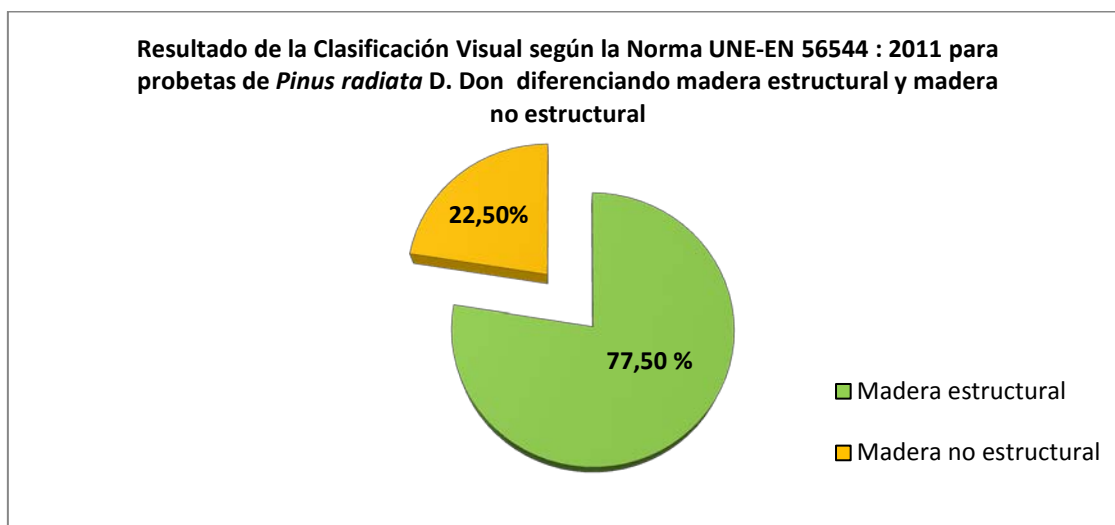
**Figura 44:** Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de *Pinus radiata* D.Don.



En la figura 45 y 46 se muestra el resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de ambas especies, diferenciando madera estructural y madera no estructural, es decir, las probetas clasificadas como ME-1 y ME-2 se han agrupado en una sola categoría denominada Madera Estructural.

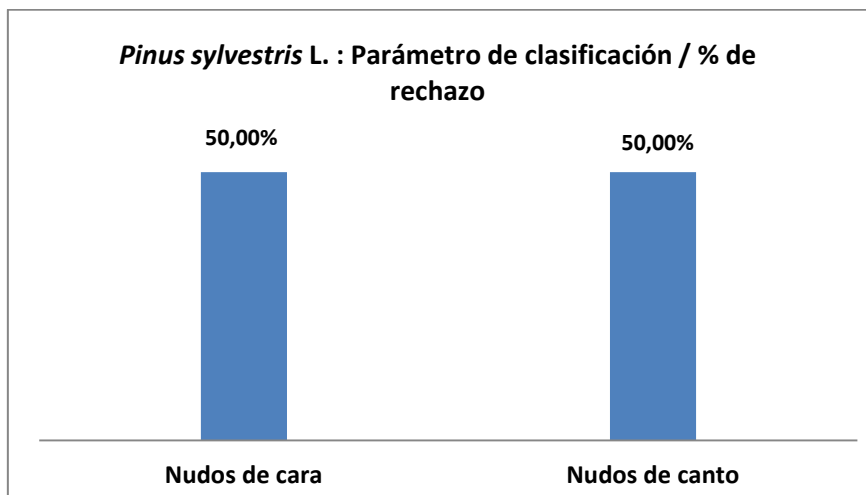


**Figura 45:** Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de *Pinus sylvestris* L. diferenciando madera estructural y madera no estructural.

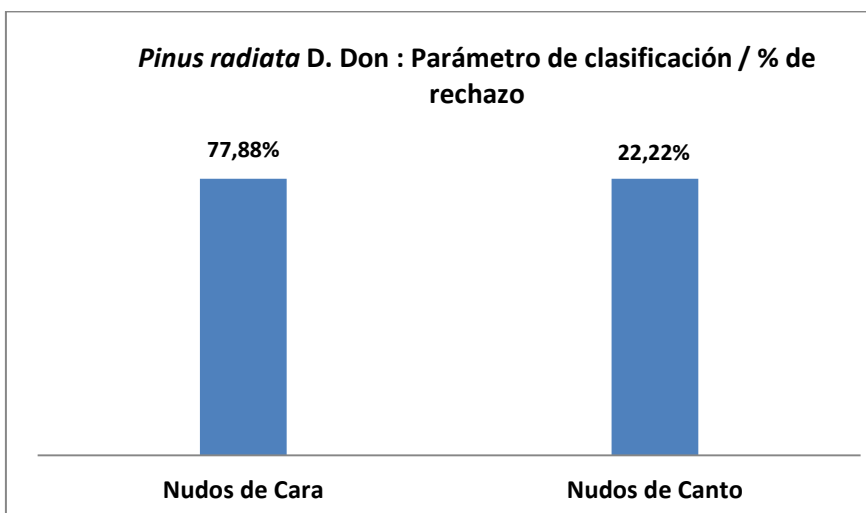


**Figura 46:** Resultado de la Clasificación Visual según la Norma UNE-EN 56544:2011 para probetas de *Pinus radiata* D. Don diferenciando madera estructural y madera no estructural.

Destacar que las piezas que han sido rechazadas (10 probetas en el caso de *Pinus sylvestris* L. y 9 probetas en el caso de *Pinus radiata* D. Don 25 % y 22,50 % respectivamente) ha sido debido a la presencia de nudos, siendo ésta la principal causa de rechazo en las piezas estudiadas.

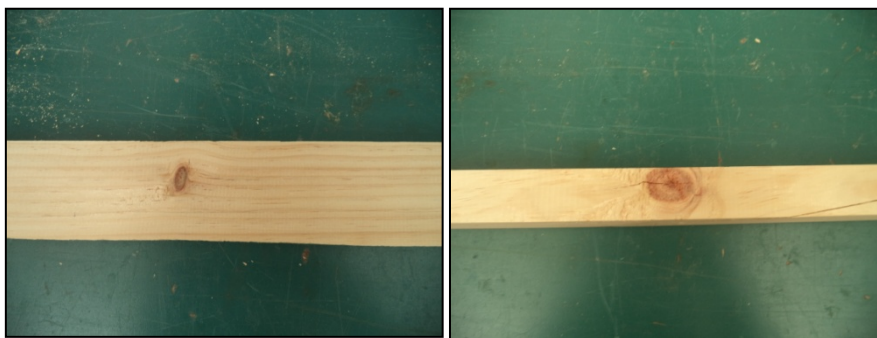


**Figura 47:** Análisis del porcentaje de rechazo por parámetro de clasificación para *Pinus sylvestris* L.



**Figura 48:** Análisis del porcentaje de rechazo por parámetro de clasificación para *Pinus radiata* D.Don.

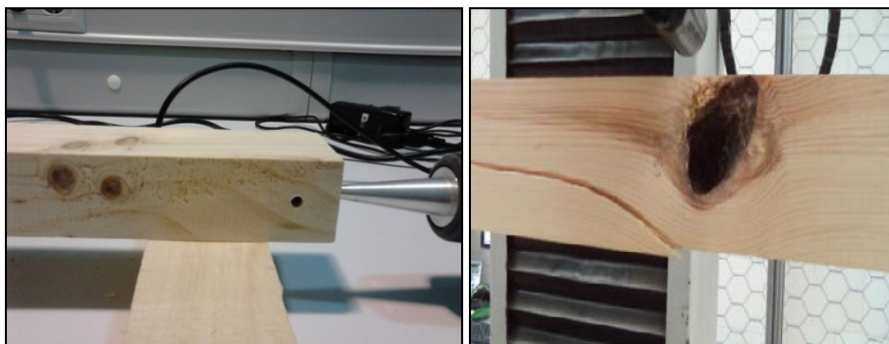
De manera clara se observa que en *Pinus sylvestris* L. los dos parámetros que tienen incidencia en el rechazo de la piezas lo hacen por igual que son los nudos de cara y de canto; de otra forma es la incidencia de estos parámetros en las piezas de *Pinus radiata* D.Don ya que la penalización causada por la presencia de nudos de cara se eleva a un 77,88 %.



**Figura 49:** Nudo de cara y nudo de canto.



**Figura 50:** Nudo de margen y nudo de arista.



**Figura 51:** Nudos agrupados en el canto y orificio generado por un nudo saltadizo.



**Figura 52:** Médula y fendas.



Figura 53: Entrecasco, bolsas de resina y anillos de crecimiento.

## 5.2. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS POR ESPECIE

En este apartado a través de tablas se muestran los resultados de los ensayos de caracterización elastomecánica de la madera según el análisis estadístico descriptivo, se presentan dichos resultados para las dos especies objeto de estudio.

De ambas especies estudiadas (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don) se ha elaborado una tabla recogiendo el análisis descriptivo de variables analizadas durante la clasificación visual y la humedad y la densidad.

También se recoge mediante tablas los resultados obtenidos diferenciando el tipo de ensayo realizado; Ensayo de vibraciones inducidas (PLG), Ensayo ultrasonidos con Sylvatest Trio® y con Fakopp y Ensayo de flexión con la Máquina Universal. De cada una de las variables se muestran el número de muestras con las que se trabajó, el valor medio, mínimo y máximo, la desviación estándar, el coeficiente de variación, en rango, la curtosis y el sesgo estandarizados.

### 5.2.1. PROPIEDADES ELASTOMECÁNICAS DE *PINUS SYLVESTRIS* L.

Tabla 7: Análisis descriptivo de las propiedades físicas de las probetas de *Pinus sylvestris* L.

Análisis Descriptivo: Propiedad físicas en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG.S.	C.S.
<b>Anchura de los anillos</b>	cm	40	0,25	0,09	35,41	0,12	0,46	0,34	1,29	-0,62
<b>Nº de nudos</b>	ud	40	2,07	1,86	89,59	0,00	7,00	7,00	2,63	0,22
$\delta$	Kg/m <sup>3</sup>	40	525,14	26,54	5,05	475,97	601,34	125,37	0,85	0,77
<b>H</b>	%	10	10,19	0,29	2,85	9,82	10,60	0,78	0,34	-0,98

**Tabla 8:** Tabla comparativa densidad y tamaño medio anillo con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998). para *Pinus sylvestris* L.

<b>Tabla comparativa densidad y tamaño medio anillo con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN <i>et al.</i>, (1998). para <i>Pinus sylvestris</i> L.</b>	
$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño medio anillo (mm)
509	2,00
Valores obtenidos	
$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño medio anillo (mm)
525,14	2,50

En la tabla anterior se recoge la densidad media y el tamaño medio del anillo obtenida por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998), junto con los valores obtenidos de estos mismos parámetros en el presente TFM. Se observa que la densidad media resultado de este TFM para el *Pinus radiata* D.Don es ligeramente superior a la obtenida por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998). Respecto al tamaño medio del anillo obtenido por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998) es ligeramente inferior al obtenido en este trabajo siendo 2,00 y 2,50 mm respectivamente.

**Tabla 9:** Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de *Pinus sylvestris* L.

<b>Análisis Descriptivo: Ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.</b>										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
f PLG	Hz	37	2075,15	224,76	10,83	1612,37	2744,33	1131,96	0,18	1,16
V PLG	m/s	37	4941,35	474,67	10,83	3872,82	5453,87	1581,05	-1,89	1,06

Se observa que la velocidad de media de vibración obtenida a través del ensayo de vibraciones inducidas PLG fue de 4941,35 m/s con un coeficiente de variación de 10,83 % para *Pinus sylvestris* L.: valor muy similar al obtenido por ÍÑIGUEZ (2007) para esta especie, que fue 4472 m/s con un menor coeficiente de variación al ser 7,1 %.

**Tabla 10:** Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo ultrasonidos (Sylvestest Trio ®) y (Fakopp) probetas de *Pinus sylvestris* L.

<b>Análisis Descriptivo: Ensayo ultrasonidos (Sylvestest Trio ®) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.</b>										
Parám	Ud.	n	Media	D.S.	CV %	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
V DD SYL	m/s	39	5678,59	309,02	5,44	5004,00	5975,50	971,50	-3,09	0,26
V IND SYL	m/s	40	3997,56	517,11	12,93	2783,50	4991,00	2207,50	-0,46	-0,40
V DD FAK	m/s	38	5543,39	270,10	4,87	4796,34	5873,30	1076,96	-2,81	1,36
V IND FAK	m/s	40	4041,60	473,57	11,72	3026,08	4776,27	1750,19	-0,50	-0,79

La velocidad media directa (DD) obtenida con Sylvatest Trio ® para *Pinus sylvestris* L. es del orden de 5678,59 m/s con un C.V de 5,44 %, ligeramente inferior al obtenido por Íñiguez (2007), donde se obtiene una velocidad media de 5000 m/s, eso sí, con un C.V similar al ser 6,3 %.

**Tabla 11:** Tabla comparativa entre los valores obtenidos en el presente TFM y los valores publicados por MONTERO *et al.*, 2013.

Valor de las variables durante el proceso de secado										
Humedad (%)		$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )		V DD-SYL (m/s)		V DD-FAK (m/s)		V-PLG (m/s)		Dimen. probetas (mm)
Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	100 x150x3000
11,10	7,2	494,10	7,5	4786,10	4,4	4823,10	3,9	4435,60	4,8	
9,00	7,2	488,30	7,7	4938,70	4,1	4952,90	3,9	4524,40	4,8	
Resultados obtenidos en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Humedad (%)		$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )		V DD-SYL (m/s)		V DD-FAK (m/s)		V-PLG (m/s)		Dimen. Probetas (mm)
Valor	C.V.%	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	Valor	C.V. %	60 x40x1200
10,18	2,85	525,14	5,05	5678,59	5,44	5543,39	4,87	4941,35	10,83	

En la anterior tabla (Tabla 11) se recogen los resultados de los parámetros obtenidos en el presente TFM y los resultados publicados por MONTERO *et al.*,(2013) donde podemos comprobar que los valores obtenidos en este TFM son ligeramente superior a los obtenidos en la citada publicación. Cabe señalar que el objetivo del trabajo del que se hace reseña fue evaluar la influencia del contenido de humedad en diferentes propiedades físicas y mecánicas, por lo que se realizaron 14 medidas durante el proceso de secado (desde una humedad del 35,5 % al 9 %), pero en la tabla 11 sólo se ha recogido los resultados obtenidos entre las humedades donde se encontraba la humedad media de las probetas de *Pinus sylvestris* L. (10,19 %) objeto de este trabajo. Apuntar también que las dimensiones de las probetas de ambos estudios eran diferentes, factor influyente en las velocidades de propagación medidas en los ensayos.

### 5.2.2. PROPIEDADES ELASTOMECAÑICAS DE *PINUS RADIATA* D.DON

**Tabla 12:** Análisis descriptivo de las propiedades físicas de las probetas de *Pinus radiata* D. Don

Análisis Descriptivo: Propiedad físicas en probetas de <i>Pinus radiata</i> D.Don										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
Anchura de los anillos	cm	38	0,61	0,14	23,39	0,32	0,94	0,62	1,59	0,55
Nº de nudos	ud.	40	3,17	2,04	64,15	0,00	8,00	8,00	0,49	-0,78
$\delta$	Kg/m <sup>3</sup>	40	484,08	41,03	8,48	391,16	587,30	196,14	1,22	1,04
H	%	10	10,03	0,54	5,43	9,29	10,89	1,60	0,16	-0,84

Tal y como se muestra en la tabla 13 la densidad media obtenida para *Pinus radiata* D. Don fue 484,08 Kg/m<sup>3</sup>, valor levemente superior al obtenido en el Informe del desarrollo del proyecto sobre caracterización mecánica de vigas de gruesa escuadría de pino radiata del país vasco elaborado el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria (INIA) en el año 2011, en el que se obtuvo una densidad media de 450,2 Kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 13:** Tabla comparativa densidad, tamaño medio anillo, MOR Y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998). para *Pinus radiata* D. Don

Tabla comparativa densidad y tamaño medio anillo con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN <i>et al.</i> , (1998). para <i>Pinus radiata</i> D. Don	
$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño medio anillo (mm)
508	7,00
Valores obtenidos	
$\delta$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño medio anillo (mm)
484,08	6,10

En la tabla anterior se recoge la densidad media y el tamaño medio del anillo obtenida por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998), junto con los valores obtenidos de estos mismos parámetros en el presente TFM. Se observa que la densidad media resultado de este TFM para el *Pinus radiata* D. Don es ligeramente inferior a la obtenida por Fernández-Golfín *et al.*; Respecto al tamaño medio del anillo obtenido por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, también es ligeramente superior al obtenido es este trabajo siendo 7,00 y 6,10 mm respectivamente.

**Tabla 14:** Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de *Pinus radiata* D. Don

Análisis Descriptivo: Ensayo de vibraciones inducidas (PLG) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
f PLG	Hz	39	1928,67	227,13	11,78	1267,67	2251,33	983,66	-1,49	0,16
V PLG	m/s	39	4631,40	545,58	11,78	3042,40	5403,20	2360,80	-1,50	0,17

A la vista de que la velocidad media obtenida a través del ensayo de vibraciones inducidas PLG fue de 4631,40 m/s para *Pinus radiata* D. Don con un coeficiente de variación de 11,78 %, y los obtenidos por ÍÑIGUEZ en 2007 para esta misma especie fue de 4267 m/s con un menor coeficiente de variación al ser 5,7 %, podemos concluir que para este parámetro los resultados obtenidos en ambos estudios son similares, al igual que ocurría con la otra especie objeto de este TFM.

**Tabla 15:** Análisis descriptivo de los parámetros medidos en ensayo de ultrasonidos (SylvatestTrio ®) y (Fakopp) probetas de *Pinus radiata* D. Don

<b>Análisis Descriptivo: Ensayo ultrasonidos (Sylvatest Trio ®) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don</b>										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
V DD SYL	m/s	39	5553,58	393,25	7,08	4564,00	6099,00	1535,00	-2,80	0,82
V IND SYL	m/s	40	3882,32	582,95	15,01	2492,00	5179,50	2687,50	-0,27	-0,0001
V DD FAK	m/s	40	5511,38	473,53	8,59	4481,34	6603,38	2122,04	-0,89	0,58
V IND FAK	m/s	38	4218,78	570,61	13,52	3327,22	5327,24	2000,02	0,79	-0,82

En el Informe del desarrollo del proyecto sobre caracterización mecánica de vigas de gruesa escuadría de pino radiata del País Vasco publicado por el INIA en el año 2011 se recogen velocidades medias de propagación de la onda medidas con Sylvatest Trio ® tal y como se muestra en la siguiente tabla, siendo la V DD-SYL obtenida en este TFM inferior a la del informe y la V IND-SYL superior a la obtenida por el INIA.

**Tabla 16:** Tabla comparativa V SYL-DD, V IND-SYL con valores obtenidos por INIA, 2011. para *Pinus radiata* D. Don

<b>Tabla comparativa V DD-SYL, VSYL-IND con valores obtenidos por INIA, 2011. para <i>Pinus radiata</i> D. Don</b>				
Parámetros	V SYL-DD (m/s)		V IND-SYL (m/s)	
	Valor	C.V. (%)	Valor	C.V. (%)
<b>Valores obtenidos</b>	5553,58	7,08	3882,32	15,01
<b>Valores obtenidos INIA, 2011.</b>	5100,45	5,42	4982,31	6,10

En relación a las velocidades medias obtenidas a través del ensayo de ultrasonidos Sylvatest Trio ® en este TFM y comparándolas con las obtenidas en la tesis de ÍÑIGUEZ en 2007 al realizar este mismo ensayo, podemos afirmar que las velocidades directas obtenidas en este TFM son ligeramente superiores a las obtenidas en la tesis anteriormente citada, debido a que en nuestro caso se obtiene una velocidad directa (DD) para *Pinus radiata* D. Don de 5553,58 m/s con un C.V de 7,08 %, mientras que Íñiguez obtiene un valor de 4900 m/s con un C.V de 5,5%. En relación a la velocidad indirecta (IND) para esta misma especie ocurre lo contrario si las comparamos; la obtenida en este TFM es de 3882,32 m/s con un CV de 15,01% mientras que la obtenida por Íñiguez es de 4744m/s acompañado con un C.V. de variación de 6,6 %.

Tal y como se puede observar en las tablas anteriores la anchura media de los anillos de crecimiento en *Pinus sylvestris* L. es 0,25 cm, siendo ésta bastante menor que la de *Pinus radiata* D. Don. 0,61 cm.

Respecto al número de nudos encontramos que *Pinus sylvestris* L. tiene una media de 2,07 nudos mientras que *Pinus radiata* D. Don tiene 3,17 nudos de media.



A la vista de los resultados anteriores la densidad de *Pinus sylvestris* L. es 525,14 Kg/m<sup>3</sup> y la de *Pinus radiata* D. Don es 484,08 Kg/m<sup>3</sup>, estando de acuerdo con los resultados de la tesis realizada por ÍÑIGUEZ en 2007 en la que se obtuvieron unas densidades de 504 Kg/m<sup>3</sup> y 484 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Como cabía esperar la humedad media obtenidas en ambas especies es muy próxima debido a que ambos lotes antes y durante la toma de datos han estado expuestos a las mismas condiciones externas; en el caso del *Pinus sylvestris* L. se obtuvo una humedad media de 10,19 % y en el caso de *Pinus radiata* D. Don 10,03 %.

En relación a las velocidades de propagación de la onda medidas mediante ensayos no destructivos, ya sean por vibraciones inducidas (PLG) o por ultrasonidos (Sylvatest Trio ® y Fakopp), se obtiene valores muy similares dentro un mismo lote con equipos diferentes. En el caso del lote de *Pinus sylvestris* L. con PLG se obtiene una velocidad media de propagación de 4941,35 m/s y con Sylvatest Trio ® y Fakopp se obtiene 5678,59 m/s y 5543,39 m/s como medidas directas (DD) y 3997,56 m/s y 4041,60 m/s como medidas indirectas (IND). En el caso del lote formado por probetas de la especie *Pinus radiata* D. Don las velocidades obtenidas también son similares, con PLG se obtiene una velocidad media de propagación de 4.631,40 m/s, y con Sylvatest Trio ® y Fakopp se obtiene 5553,58 m/s y 5511,38 m/s como medidas directas (DD) y 3882,32 m/s y 4218,78 m/s como medidas indirectas (IND).

A continuación aparece una tabla comparativa con características de las dos maderas objeto de este TFM siendo valores medios en madera libre de defectos. PEÑA y VIGNOTE en 2006 y las obtenidas en este TFM.

**Tabla 17:** Comparativa de características de las dos maderas objeto de este TFM siendo los valores medios en madera libre de defectos los recogidos por PEÑA y VIGNOTE (2006) y las obtenidas en el presente TFM con madera con singularidades.

<b>PEÑA y VIGNOTE (2006) - MADERA LIBRE DE DEFECTOS -</b>			
<b>Especie</b>	<b>δ (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>MOR (MPa)</b>
<i>Pinus sylvestris</i> L.	502	9400	105,7
<i>Pinus radiata</i> D. Don	500	7400	79,50
<b>Resultados obtenidos en presente TFM - MADERA CON SINGULARIDADES -</b>			
<b>Especie</b>	<b>δ (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>MOR (MPa)</b>
<i>Pinus sylvestris</i> L.	525,14	13932,50	52,46
<i>Pinus radiata</i> D. Don	484,08	9914,32	40,32

Tal y como muestra la tabla anterior y como cabía esperar los parámetros varían en función de si en el lote objeto de estudio se incluye madera libre de defectos o anomalías o no. Respecto a la densidad, la presencia de nudos en la madera afecta a propiedades mecánicas debido a la variación de la dirección de las fibras, la diferencia de la densidad entre la madera y nudo y por último la presencia de grietas cuando la madera está seca. Los nudos disminuyen la resistencia de la madera por inducir a una distribución irregular de las tensiones (DÍAZ-VAZ y CUEVAS, 1982).

El MOR corresponde a la tensión unitaria máxima en flexión que soporta un material antes de que se produzca la rotura, por lo que es de esperar que el MOR será más elevado en ambas especies cuando la madera está libre de defectos como es el caso de (PEÑA y VIGNOTE, 2006); en el caso de los valores obtenidos de MOR en el presente TFM son menores debido a que nuestros lotes de probetas había madera con singularidades como nudos, medula...

### 5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS POR ESPECIE

En este apartado se presentan los resultados de los análisis comparativos de los MOEd por especie.

#### 5.3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MOE ESTIMADO UTILIZANDO EQUIPOS DE ULTRASONIDOS Y LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN SEGÚN NORMA EN 408 PARA *PINUS SYLVESTRIS* L.

Se presentan a continuación mediante tablas los resultados del MOEd obtenidos por los distintos ensayos no destructivos mediante: vibraciones inducidas (PLG), ultrasonidos con Sylvatest Trio ® y Fakopp y finalmente el MOE según norma EN 408.

##### 5.3.1.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (PLG) EN PROBETAS DE *PINUS SYLVESTRIS* L.

**Tabla 18:** Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas con el PLG en probetas de *Pinus sylvestris* L.

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámico (PLG) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máy.	R.	SG.S.	C.S.
MOEd PLG	MPa	36	12869,40	2461,89	19,13	7939,88	16566,50	8626,62	-0,96	-1,23

El módulo de elasticidad dinámico medio obtenido a través del ensayo de vibraciones inducidas con PLG para *Pinus sylvestris* L. toma un valor de 12869,40 MPa acompañado de un C.V. de 19,13 %, siendo un valor ligeramente superior al obtenido por ÍÑIGUEZ (2007) el cual obtuvo un valor medio de este parámetro de 10859 m/s con un C.V. de 17,3 %. Especificar que las piezas del estudio realizado por ÍÑIGUEZ en 2007 se utilizaron probetas don dimensiones trasversales entre 150 x 200 mm y 200 x 250 mm, medidas diferentes a las que fueron objeto de este TFM.

### 5.3.1.2 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO (SYLVATEST TRIO®) Y (FAKOPP) EN PROBETAS DE *PINUS SYLVESTRIS* L.

**Tabla 19:** Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de ultrasonidos (Sylvatest Trio ®) y (Fakopp) en probetas de *Pinus sylvestris* L.

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámicoensayo (Sylvatest Trio) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG.S.	C.S.
MOEd DD-SYL	MPa	39	16874,60	2217,63	13,14	12446,60	19807,10	7360,50	-1,45	-1,14
MOEd IND-SYL	MPa	40	8543,30	2025,31	26,32	4101,48	13084,70	8983,20	0,66	-0,41
MOEd DD-FAK	MPa	39	15943,00	2050,72	12,66	11844,00	19045,20	7201,12	-1,45	-0,57
MOEd IND-FAK	MPa	39	8744,55	2092,70	23,93	4847,53	12947,50	8099,97	0,23	-0,91

### 5.3.1.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO FLEXIÓN (M-UN) EN PROBETAS DE *PINUS SYLVESTRIS* L.

**Tabla 20:** Análisis descriptivo del parámetro MOE calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de flexión según norma EN 408 en probetas de *Pinus sylvestris* L.

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámico Ensayo flexión EN 408 en probetas de <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG.S.	C.S.
MOR	MPa	40	52,46	14,63	27,89	12,02	69,29	57,27	-2,22	0,05
MOEG	MPa	38	13092,80	2064,25	15,77	9401,90	16798,00	7396,10	0,14	0,03
MOE	MPa	38	13932,50	2401,54	17,24	9532,47	18073,60	8541,10	0,14	-1,47

Haciendo referencia al resultado obtenido como valor medio de MOEG para *Pinus sylvestris* L. que fue 13092,80 MPa y comparándolo con el obtenido por (ÍÑIGUEZ, 2007) para este parámetro que fue 10440 MPa, podemos advertir cierta discordancia entre los dos valores resultantes.

Respecto al MOR medio obtenido en este TFM que es 52,46 MPa para *Pinus sylvestris* L. y comparándolo con el obtenido por Íñiguez (2007) 39,39 MPa, podemos afirmar que las divergencias son considerables, al igual que ocurre con la otra especie objeto de estudio en este TFM, en la cual el valor medio obtenido de MOR para *Pinus radiata* D.Don es de 40,32 MPa y el valor medio obtenido por ÍÑIGUEZ en 2007 fue 26,50 MPa. Los valores medios resultantes del paramento MOR resultan considerablemente superiores que los obtenidos por ÍÑIGUEZ en 2007.

Tal y como muestra la tabla 21 para *Pinus sylvestris* L. los valores medios obtenidos para el MOE y para el MOR fueron 13932,50 MPa y 52,46 MPa respectivamente; siendo éstos superiores a los obtenidos por MONTERO *et al.*, en 2013. Señalar que las probetas sobre las que se llevaron el ensayo por MONTERO *et al.*, 2013 son de

dimensiones superiores (150 x 200 x 4000 mm y 100 x 150 x 300 mm, considerándose gran escuadría) a las empleadas en el presente TFM (60 x 40 x 1200 mm).

**Tabla 21:** Tabla comparativa MOE y MOR con valores obtenidos por MONTERO *et al.*, 2013. para *Pinus sylvestris* L.

Tabla comparativa MOE Y MOR con valores obtenidos por MONTERO, M.J., <i>et al.</i> , 2013. para <i>Pinus sylvestris</i> L.		
Parámetros	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Valores obtenidos	13932,50	52,46
Valores obtenidos por MONTERO <i>et al.</i> , 2013.	9007,00	37,98

**Tabla 22:** Tabla comparativa V DD-SYL, V IND-SYL, V DD-FAK, V IND-FAK, V-PLG con valores obtenidos por MONTERO, M.J., 2013. para *Pinus sylvestris* L.

Tabla comparativa DD-SYL, V IND-SYL, V DD-FAK, V IND-FAK, V-PLG con valores obtenidos por MONTERO <i>et al.</i> , 2013. para <i>Pinus sylvestris</i> L.										
Parámetros	V DD-SYL (m/s)		V IND-SYL (m/s)		V DD- FAK (m/s)		V IND- FAK (m/s)		V-PLG (m/s)	
	Valor	C.V. (%)	Valor	C.V. (%)	Valor	C.V. (%)	Valor	C.V. (%)	Valor	C.V. (%)
Valores obtenidos	5678,59	5,44	3997,56	12,93	5543,39	4,87	4041,6	11,72	4941	10,83
Valores obtenidos por MONTERO <i>et al.</i> , 2013.	4879	5,90	4783 (18.h)	6,4	4974	5,60	5021 (18.h)	5,7	4416	6,50
			5205 (6.h)	4,3			5205 (6.h)	5,4		

Los valores obtenidos de velocidad de transmisión por MONTERO *et al.*,(2013), para *Pinus sylvestris* L. en los casos de medida directa con Sylvatest®, medida directa con Fakopp y la velocidad con PLG son ligeramente inferiores que las obtenidas en este TFM, distinto es lo que ocurre en el caso de la toma de medidas indirectas, que son inferiores a las obtenidas en este TFM. Señalar que las dimensiones de las probetas objetos de estos dos estudios son de dimensiones distintas; Por una parte MONTERO *et al.*, 2013 como se ha comentado anteriormente utiliza probetas de dos dimensiones; 150 x 200 x 4000 mm y 100 x 150 x 3000 mm y en nuestro caso las probetas son todas de las mismas dimensiones 60 x 40 x 1200 mm.

**Tabla 23:** Tabla comparativa  $\delta$ , MOE, MOR, MOEd SYL y V DD-SYL con valores obtenidos por HERMOSO, E., 2001. para *Pinus sylvestris* L.

Tabla comparativa MOR MOE SYL Y V DD-SYL con valores obtenidos por (HERMOSO, 2001). para <i>Pinus sylvestris</i> L.					
Parám.	Media	D.S.	Mín.	Máx.	C.V (%)
$\delta(\text{Kg/m}^3)$	477,2	36,6	414,1	581,5	7,60
MOE (MPa)	10532	2594,5	6344	17971	24,60
MOR (MPa)	38,5	14,3	14,8	72,9	37,20
MOEd SYL (MPa)	12504	2485,2	8344	21654	19,90
V DD-SYL (m/s)	5071	317,8	4324	5724	6,30
Valores obtenidos para <i>Pinus sylvestris</i> L.					
Parámetros	Media	D.S.	Mín.	Máx.	C.V (%)
$\delta(\text{Kg/m}^3)$	525,14	26,54	475,97	601,34	5,05
MOE	13932,50	2401,54	9532,47	18073,60	11,24
MOR	52,46	14,63	12,02	69,29	27,89
MOEd SYL	16874,60	2217,6	12446,60	19807,10	13,14
V DD- SYL	5678,59	309,02	5004,00	5975,50	5,44

Tal y como se observa en la tabla anterior donde se muestra los valores obtenidos por (HERMOSO, 2001), éstos son de mayor magnitud que los obtenidos en el presente TFM; señalar que las dimensiones de las piezas que formaban parte del estudio realizado por (HERMOSO, 2001). fueron de variadas dimensiones (40 x 100 x 2000mm, 50x 100 x 2000 mm, 40 x 150 x 3000 mm, 50 x 150 x 3000 mm), 70 x 150 x 3000 mm, 70 x 200 x 4000 mm).

**Tabla 24:** Tabla comparativa MOR Y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998). para *Pinus sylvestris* L.

Tabla comparativa MOR Y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998). para <i>Pinus sylvestris</i> L.	
MOR (MPa)	MOE (MPa)
43	11337
Valores obtenidos	
MOR (MPa)	MOE (MPa)
52,46	13932,50

En la tabla anterior se recoge el MOR y MOE obtenido por FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., (1998), junto con los valores obtenidos de estos mismos parámetros del presente TFM. Se observa que el resultado de ambos parámetros en este TFM para el *Pinus sylvestris* L. es superior a los obtenidos por Fernández-Golfín et al.. destacar que las

dimensiones de las piezas (160 x 60 x 3000 mm) objeto del estudio de FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998) fueron de dimensiones diferentes a las del presente TFM.

### 5.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MOE ESTIMADO UTILIZANDO EQUIPOS DE ULTRASONIDOS Y LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN SEGÚN NORMA EN 408 PARA *PINUS RADIATA* D.DON

Se presentan a continuación mediante tablas los resultados del MOEd obtenidos por los distintos ensayos no destructivos mediante: vibraciones inducidas (PLG), ultrasonidos con Sylvatest Trio® y Fakopp y finalmente el MOE según norma EN 408.

#### 5.3.2.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (PLG) EN PROBETAS DE *PINUS RADIATA* D.DON

**Tabla 25:** Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas mediante vibraciones inducidas (PLG) en probetas de *Pinus radiata* D.Don

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámico (PLG) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG.S.	C.S.
MOEd PLG	MPa	39	10484,90	2565,66	24,47	5436,13	14649,60	9213,47	-0,42	-1,48

El módulo de elasticidad dinámico medio obtenido a través del ensayo de vibraciones inducidas con PLG para *Pinus radiata* D.Don toma un valor de 10484,90 MPa acompañado de un C.V. de 24,47 %, siendo un valor muy aproximado al obtenido por ÍÑIGUEZ en 2007, el cual obtenía un valor medio de este parámetro de 10179 m/s con un C.V. de 17 %.

#### 5.3.2.2 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO (SYLVATEST TRIO®) Y (FAKOPP) EN PROBETAS DE *PINUS RADIATA* D.DON

**Tabla 26:** Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en los ensayo de ultrasonidos (Sylvatest Trio®) y (Fakopp) en probetas de *Pinus radiata* D.Don

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámico Ensayo (Sylvatest Trio®) y (Fakopp) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V.%	Mín.	Máx.	R.	SG.S.	C.S.
MOEd DD-SYL	MPa	40	14805,80	2843,68	19,21	7905,93	19475,90	11570,00	-1,84	0,15
MOEd IND-SYL	MPa	40	7473,42	2332,5	31,21	2786,44	13762,30	10975,80	1,04	0,23
MOEd DD-FAK	MPa	38	14464,30	2680,08	18,53	8674,02	19817,90	11143,90	-1,09	-0,002
MOEd IND-FAK	MPa	40	9521,83	4205,47	44,17	4835,61	28194,90	23359,30	6,57	12,15

El MOEd medio a través de la realización de medida directa (DD) obtenido con Sylvatest Trio ® para la especie *Pinus radiata* D. Don toma un valor de 14805,80 MPa con un C.V. de 19,21 %, siendo considerablemente mayor que el obtenido por ÍÑIGUEZ en 2007, que fue 12045 con un C.V. de 15%; esta misma circunstancia ocurre con la otra especie objeto de estudio en este TFM, debido a que para *Pinus sylvestris* L. se obtiene un MOEd medio de 16874,60 MPa con un C.V. de 13,14 % y el obtenido por Íñiguez(2007) es de 13047 MPa con un C.V. de 16,6 %.

### 5.3.2.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO ENSAYO FLEXIÓN (M-UN) EN PROBETAS DE *PINUS RADIATA* D.DON

**Tabla 27:** Análisis descriptivo del parámetro MOEd calculado a través de las mediciones obtenidas en ensayo de flexión según norma UNE-EN 408:2011 en probetas de *Pinus radiata* D. Don

Análisis Descriptivo: Módulo de Elasticidad Dinámico Ensayo flexión EN 408) en probetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don										
Parám.	Ud.	n	Media	D.S.	C.V. %	Mín.	Máx.	R.	SG. S.	C.S.
MOR	MPa	40	40,32	17,3	42,92	12,02	65,70	53,68	0,27	-1,75
MOEG	MPa	36	9695,63	2286,84	23,59	4270,08	13718,00	9447,92	-0,95	0,03
MOE	MPa	36	9914,32	2972,89	29,98	2861,10	15143,40	12282,30	-0,95	0,03

Al a vista de los resultados obtenidos el MOEG para *Pinus radiata* D. Don tiene un valor medio de 9695,63 MPa. En estudios anteriores el valor medio de éste fue 9009 MPa (ÍÑIGUEZ, 2007); por lo que podemos concluir que se obtuvieron valores similares. En el informe del desarrollo del proyecto sobre caracterización mecánica de vigas de gruesa escuadría de pino radiata del País Vasco elaborado por el INIA en el año 2011 se recogen valores medios de MOR de 40,8 MPa (lote A - piezas de 205 x 150 x 4300 mm) y 39,2 MPa (lote B – piezas de 250 x 200 x 500 mm), siendo estos valores semejante al MOR medio obtenido en este TFM. Relativo al MOE los valores obtenidos discrepan, ya que en el Informe elaborado por el INIA se recogen valores medios de MOE de 11156 MPa (lote A - piezas de 205 x 150 x 4300 mm) y 11158 MPa (lote B – piezas de 250 x 200 x 500 mm), mientras que el MOE medio obtenido en el presente TFM fue 9914,32 MPa.

Después del cálculo del MOEd en función de las velocidades obtenidas con los diferentes equipos de trabajo, ya sean de vibraciones inducidas (PLG) o de ultrasonidos (Sylvatest Trio ® y Fakopp), y teniendo en cuenta que en cada una de las 80 probetas con el mismo equipo se realizaron cuatro medidas (dos directas y dos indirectas), si ordenamos en función de la magnitud que resulta de este cálculo, se puede observar que el orden es el mismo para ambas especies, tal y como se muestra en las tablas 29 y 30.

**Tabla 28:** Tabla comparativa MOR y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998). para *Pinus radiata* D. Don

<b>Tabla comparativa MOR y MOE con valores obtenidos por FERNÁNDEZ-GOLFÍN <i>et al.</i>, (1998). para <i>Pinus radiata</i> D. Don</b>	
<b>MOR (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
37	11293
<b>Valores obtenidos</b>	
<b>MOR (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
40,32	9914,32

En la tabla anterior se recoge el MOR y MOE obtenido por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998), junto con los valores obtenidos de estos mismos parámetros del presente TFM. Se observa que el resultado del MOR en este TFM para el *Pinus radiata* D. Don es ligeramente superior al obtenido por FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998) En relación al MOE el obtenido por Fernández-Golfín *et al.*, es superior al obtenido en el presente TFM. Destacar que las dimensiones de las piezas (160 x 60 x 3000 mm) objeto del estudio de FERNÁNDEZ-GOLFÍN *et al.*, (1998) fueron de dimensiones diferentes a las del presente TFM.

**Tabla 29:** MOEd obtenidos ordenados de mayor a menor para la especie *Pinus sylvestris* L.

<b>MOEd ordenados de mayor a menor en función del valor obtenido para la especie <i>Pinus sylvestris</i> L.</b>	
<b>MOEd DD-SYL (MPa)</b>	16874,60
<b>MOEd DD-FAK (MPa)</b>	15943,00
<b>MOEd-PLG (MPa)</b>	12869,40
<b>MOEd IND-FAK (MPa)</b>	8744,55
<b>MOEd IND-SYL (MPa)</b>	8543,30

**Tabla 30:** MOEd obtenido ordenados de mayor a menor para la especie *Pinus radiata* D. Don

<b>MOEd ordenados de mayor a menor en función del valor obtenido para la especie <i>Pinus radiata</i> D. Don</b>	
<b>MOEd DD-SYL (MPa)</b>	14805,80
<b>MOEd DD-FAK (MPa)</b>	14464,30
<b>MOEd-PLG (MPa)</b>	10484,90
<b>MOEd IND-FAK (MPa)</b>	9521,83
<b>MOEd IND-SYL (MPa)</b>	7473,42



### 5.3.3 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA.

La estadística comparativa se ha realizado mediante el análisis de varianza (ANOVA), mediante este procedimiento se trata de comprobar si hay diferencias significativas para las variables analizadas. Existen diferentes rangos de significación según el p-valor de la razón-F.:

- ◆ Valor  $P > 0,1$ : no hay diferencias estadísticamente significativas.
- ◆ Si Valor  $P$  está entre 0,05 y 0,1: moderadamente significativo.
- ◆ Si Valor  $P$  está entre 0,01 y 0,05: significativo.
- ◆ Si Valor  $P$  está entre 0 y 0,01: altamente significativo.

#### 5.3.3.1 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON PLG

**Tabla 31:** Análisis de varianza para el parámetro MOEd PLG del análisis comparativo *P. radiata* - *P. sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOEd -PLG del análisis comparativo <i>P. radiata</i> - <i>P. sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	1,06E+08	1	1,06E+08	16,81	0,0001
<b>RESIDUOS</b>	4,62E+08	73	6,33E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	5,69E+08	74			

Al ser el Valor-P= 0,0001; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 32:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P. radiata* - *P. sylvestris* para el parámetro MOEd PLG (Intervalos de confianza del 95%)

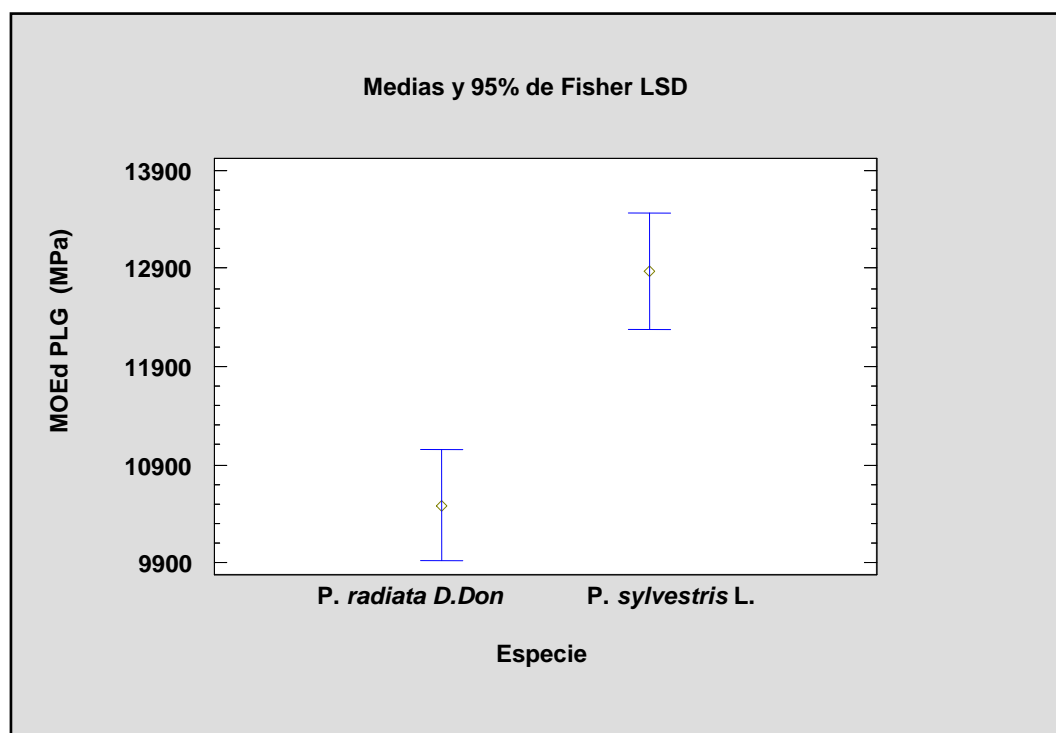
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P. radiata</i> - <i>P. sylvestris</i> para el parámetro MOEd -PLG (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<b><i>P. radiata</i></b>	39	10484,9	402,954	9681,78	11287,9
<b><i>P. sylvestris</i></b>	36	12869,4	419,407	12033,5	13705,3

**Tabla 33:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd –PLG.

Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd -PLG			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>	*	-2384,56	1159,16

\* indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEd PLG.



**Figura 54:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través del PLG de las poblaciones de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.2 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON SYLVATEST TRIO ®(MEDIDA DIRECTA).

**Tabla 34:** Análisis de varianza para el parámetro MOEd DD-SYL del análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOEd DD-SYL del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	8,45E+07	1	8,45E+07	12,96	0,0006
<b>RESIDUOS</b>	5,02E+08	77	6,52E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	5,87E+08	78			

Al ser el Valor-P = 0,0006; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 35:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOEd DD-SYL (Intervalos de confianza del 95%)

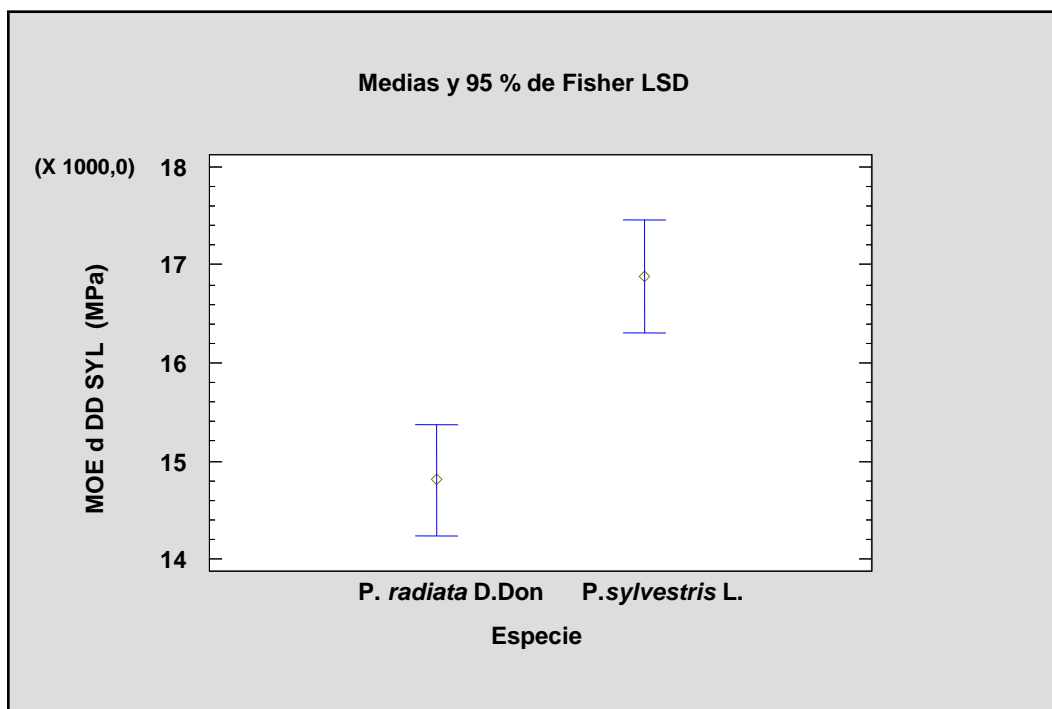
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd DD-SYL (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<b><i>P.radiata</i></b>	40	14805,8	403,819	14001,7	15609,9
<b><i>P.sylvestris</i></b>	39	16874,6	408,963	16060,3	17689

**Tabla 36:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD-SYL.

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD-SYL			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<b><i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i></b>	*	-2068,83	1144,45

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEd DD-SYL.



**Figura 55:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida directa con Sylvatest Trio® de las poblaciones de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.3 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON SYLVATEST TRIO® (MEDIDA INDIRECTA).

**Tabla 37:** Análisis de varianza para el parámetro MOEd IND-SYL del análisis comparativo

Análisis de Varianza para el parámetro MOEd IND-SYL del análisis comparativo <i>P. radiata</i> - <i>P. sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	2,26E+07	1	2,26E+07	4,31	0,0413
<b>RESIDUOS</b>	4,05E+08	77	5,25E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	4,27E+08	78			

Al ser el Valor-P = 0,0413; Podemos afirmar que la diferencia es significativa.

**Tabla 38:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOEd IND-SYL (Intervalos de confianza del 95%)

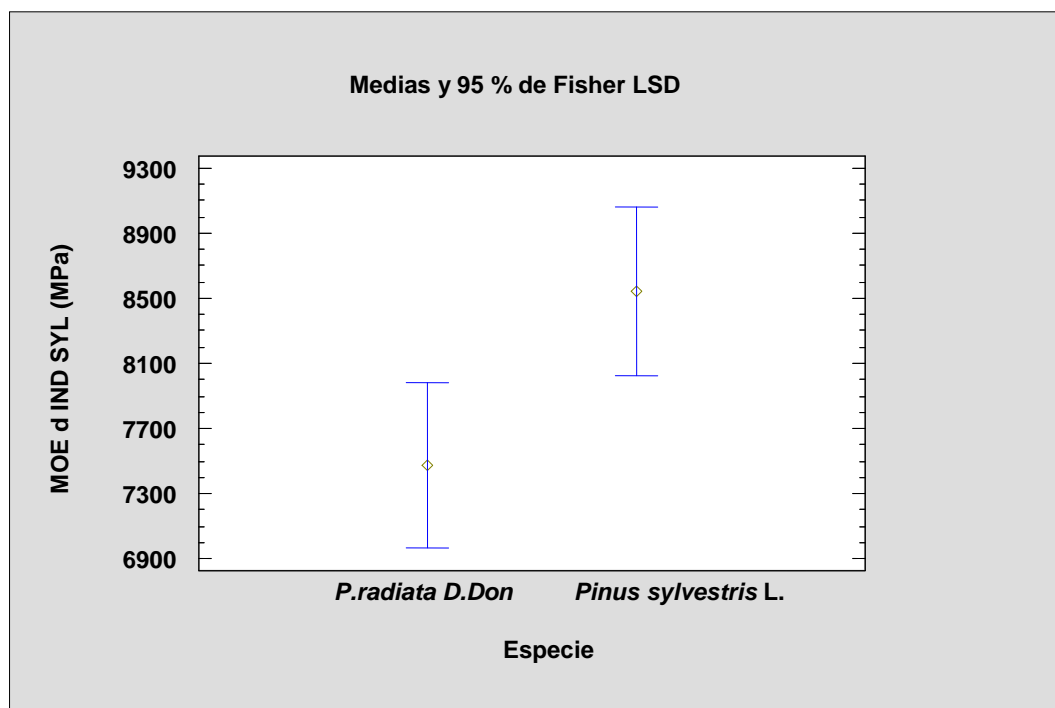
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd IND-SYL (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<i>P.radiata</i>	40	7473,42	362,433	6751,73	8195,12
<i>P.sylvestris</i>	39	8543,96	367,05	7813,07	9274,85

**Tabla 39:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-SYL

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-SYL			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>	*	-1070,54	1027,16

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEd IND-SYL.



**Figura 56:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Sylvatest Trio® de las poblaciones de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.4 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON FAKOPP (MEDIDA DIRECTA).

**Tabla 40:** Análisis de varianza para el parámetro MOEd DD-FAK del análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOEd DD-FAK del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	4,32E+07	1	4,32E+07	7,71	0,0069
<b>RESIDUOS</b>	4,26E+08	76	5,60E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	4,69E+08	77			

Al ser el Valor-P = 0,0069; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 41:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOEd DD-FAK (Intervalos de confianza del 95%)

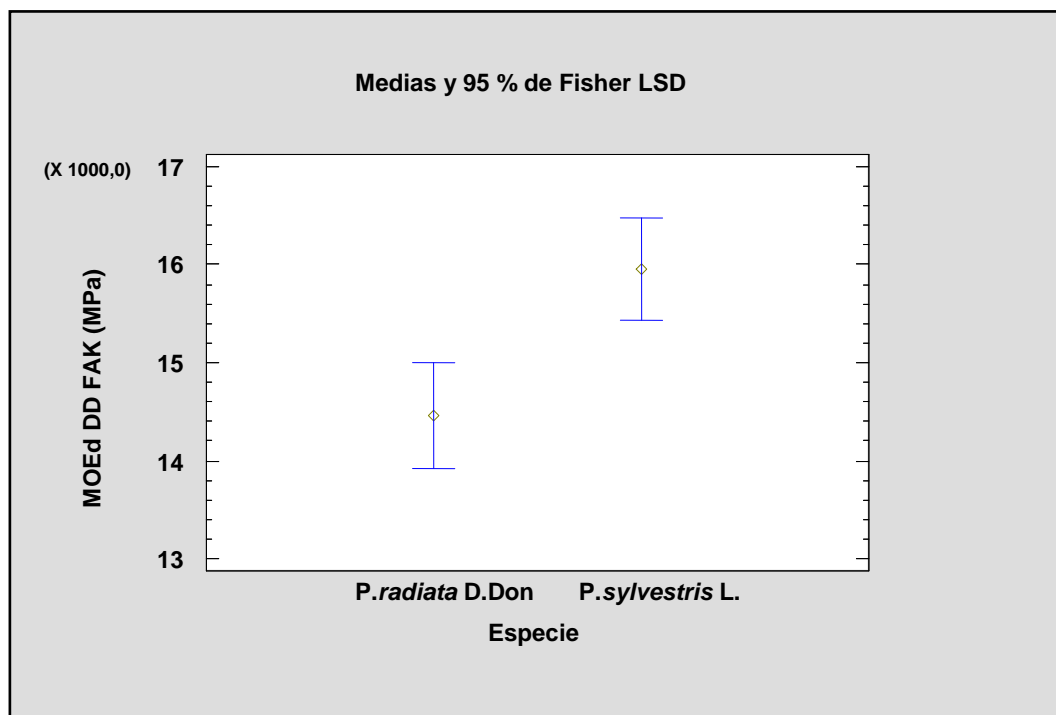
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd DD-FAK (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<b><i>P.radiata</i></b>	38	14464,3	383,948	13699,6	15229
<b><i>P.sylvestris</i></b>	40	15953,3	374,226	15208	16698,6

**Tabla 42:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD-FAK

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd DD-FAK			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<b><i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i></b>	*	-1489	1067,85

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEd DD-FAK.



**Figura 57:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida directa con Fakopp de las poblaciones de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.5 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA CON FAKOPP (MEDIDA INDIRECTA)

**Tabla 43:** Análisis de varianza para el parámetro MOEd IND-FAK del análisis comparativo *P. radiata* - *P. sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOEd IND-FAK del análisis comparativo <i>P. radiata</i> - <i>P. sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A:Especie</b>	3,02E+05	1	3,02E+05	6,56	0,0076
<b>RESIDUOS</b>	3,92E+08	74	5,29E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	3,92E+08	75			

Al ser el Valor-P = 0,0076; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 44:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOEd IND-FAK (Intervalos de confianza del 95%)

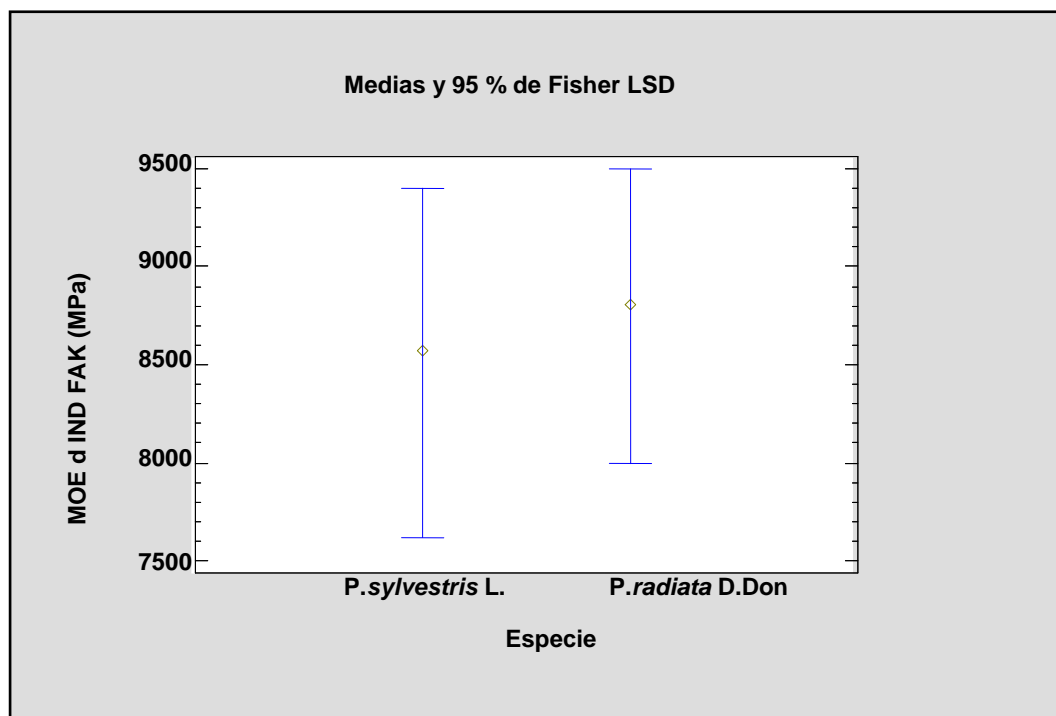
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEd IND-FAK (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<i>P.radiata</i>	38	8787,74	373,269	8043,98	9531,49
<i>P.sylvestris</i>	38	8661,75	373,269	7918	9405,51

**Tabla 45:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-FAK

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEd IND-FAK			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>	*	125,986	1051,83

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEd IND-FAK.



**Figura 58:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Fakopp de las poblaciones de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.



### 5.3.3.6 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL MOR OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN.

**Tabla 46:** Análisis de varianza para el parámetro MOR del análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOR del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	2949,05	1	2949,05	11,48	0,0011
<b>RESIDUOS</b>	20030,8	78	256,805		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	22979,8	79			

Al ser el Valor-P = 0,0011; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 47:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOR (Intervalos de confianza del 95%)

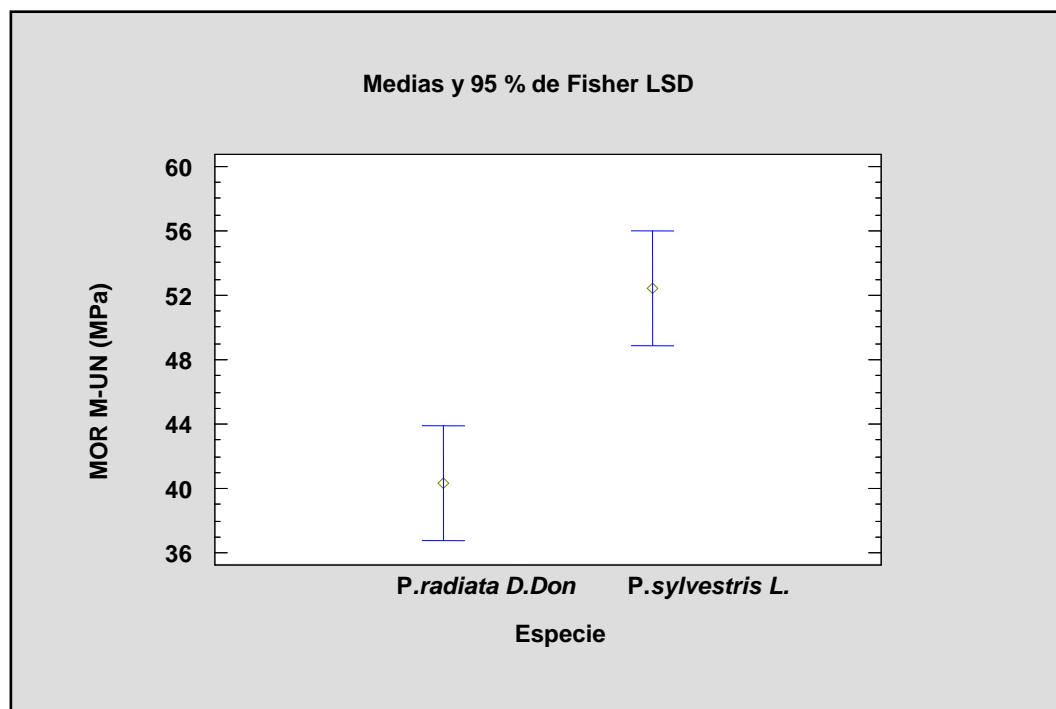
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOR (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<b><i>P.radiata</i></b>	40	40,3195	2,5338	35,2751	45,3639
<b><i>P.sylvestris</i></b>	40	52,4625	2,5338	47,4181	57,5069

**Tabla 48:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOR

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOR			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<b><i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i></b>	*	-12,143	7,13387

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOR.



**Figura 59:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOR obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.7 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL MOEG OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA MEDIANTE ENSAYO DE FLEXIÓN

**Tabla 49:** Análisis de varianza para el parámetro MOEG del análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro MOEG del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	2,13E+08	1	2,13E+08	45,09	0,0000
<b>RESIDUOS</b>	3,41E+08	72	4,73E+06		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	5,54E+08	73			

Al ser el Valor- P = 0,0000; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 50:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro MOEG (Intervalos de confianza del 95%)

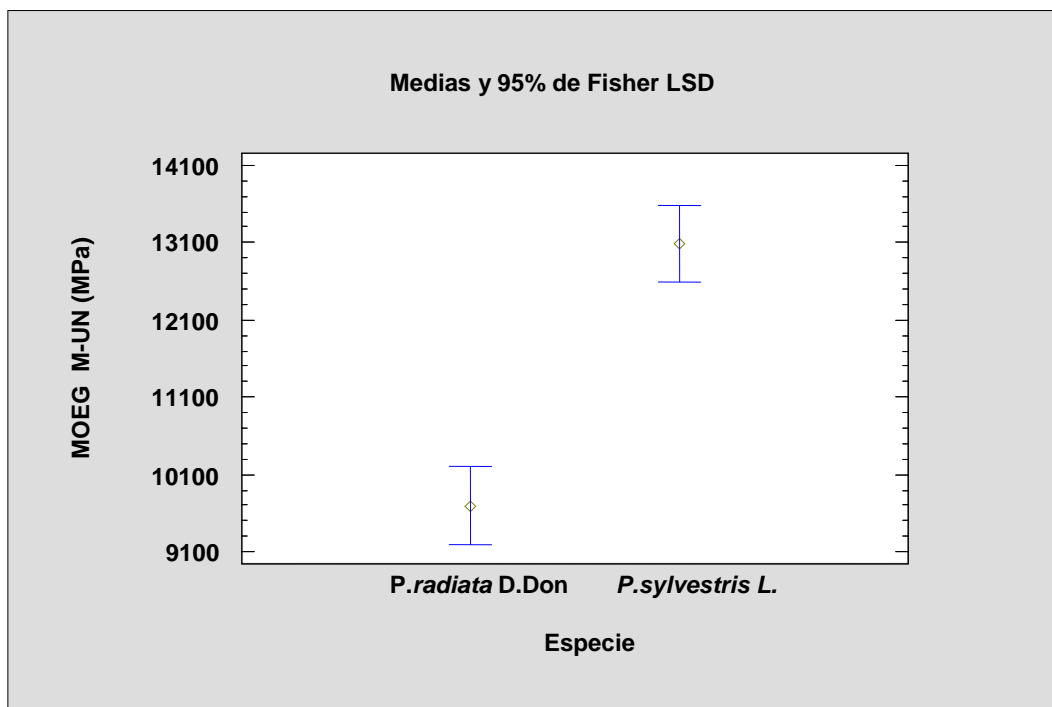
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro MOEG (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<i>P.radiata</i>	36	9695,63	362,55	8972,9	10418,4
<i>P.sylvestris</i>	38	13092,8	352,88	12389,4	13796,3

**Tabla 51:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEG

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro MOEG			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>	*	-3397,18	1008,56

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro MOEG.



**Figura 60:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOEG obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de *Pinus radiata* D.Don y *Pinus sylvestris* L.

### 5.3.3.8 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS COMPARATIVOS DE LA DENSIDAD OBTENIDOS DE LOS DOS LOTES DE MADERA.

**Tabla 52:** Análisis de varianza para el parámetro  $\delta$  del análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris*

Análisis de Varianza para el parámetro $\delta$ del análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i>					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A: Especie</b>	33707,8	1	33707,8	28,23	0,0000
<b>RESIDUOS</b>	93122,4	78	1193,88		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	126830	79			

Al ser el Valor-P = 0,0000; Podemos afirmar que la diferencia es altamente significativa.

**Tabla 53:** Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo *P.radiata* - *P.sylvestris* para el parámetro  $\delta$  (Intervalos de confianza del 95%)

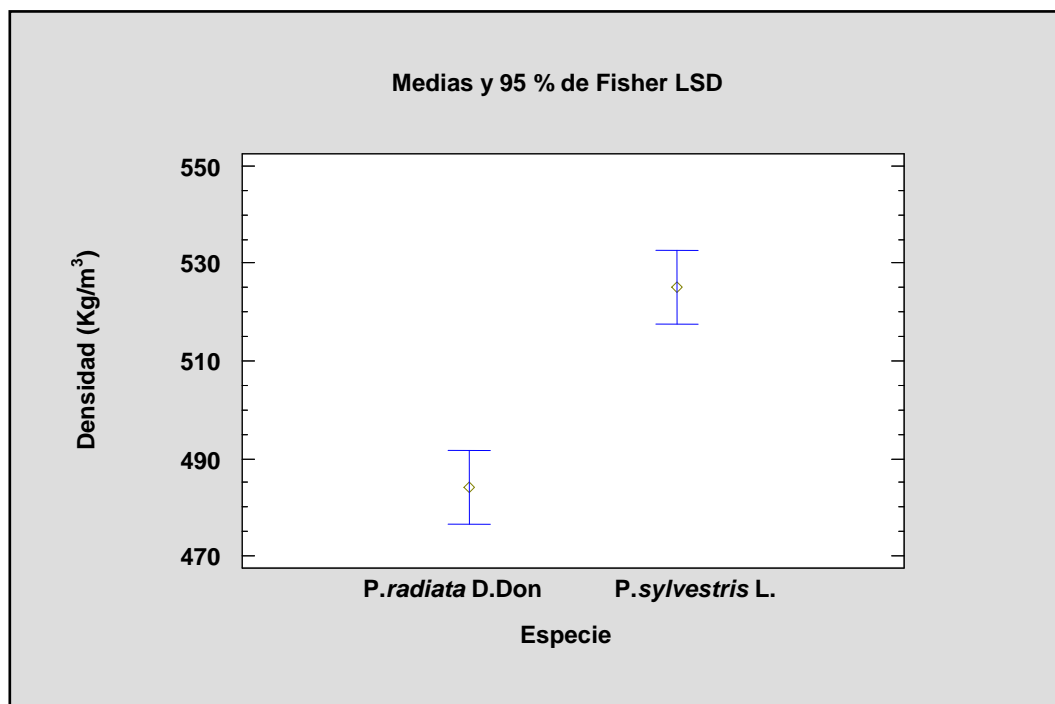
Tabla de medias por mínimos cuadrados. Análisis comparativo <i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i> para el parámetro $\delta$ (Intervalos de confianza del 95%)					
Especie	Casos	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
<b><i>P.radiata</i></b>	40	484,086	5,46323	473,209	494,962
<b><i>P.sylvestris</i></b>	40	525,139	5,46323	514,263	536,015

**Tabla 54:** Diferencias estimadas entre cada par de medias; procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro  $\delta$

Diferencias estimadas entre cada par de medias; Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para el parámetro $\delta$			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<b><i>P.radiata</i> - <i>P.sylvestris</i></b>	*	-41,0535	15,3817

\*indica una diferencia significativa.

Se observan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre la especie *Pinus radiata* D.Don y la especie *Pinus sylvestris* L. para el parámetro densidad ( $\delta$ ).



**Figura 61:** Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar densidad obtenido a través de la Máquina Universal de las poblaciones de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L.

#### 5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A PARTIR DE VARIABLES MEDIDAS EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Se presenta a continuación los resultados de los análisis predictivos para estimar el MOEG a partir de variables medidas en la clasificación visual y en los ensayos no destructivos. Se han realizado análisis de regresión múltiple con las variables que se ha visto que tienen una influencia significativa.

Como resultado de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la posible relación existente entre el MOEG (variable dependiente) y la anchura de los anillos, la densidad y las diferentes velocidades obtenidas a través de ensayos no destructivos (como variables independientes) se obtienen las siguientes ecuaciones de los modelos ajustados:

Una medida de ajuste que ha recibido gran aceptación el coeficiente de determinación R-cuadrado. Se trata de una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independiente y 1 cuando entre ellas existe una relación perfecta). Este coeficiente posee una interpretación muy intuitiva: presenta el grado de ganancia que podemos obtener al predecir una variable basándonos en el conocimiento que tenemos de otras u otras variables.

◆ **Regresión múltiple (anchura anillos, densidad y velocidad PLG).**

**Tabla 55:** Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V-PLG.

Parámetros de la regresión múltiple MOEG (MPa)				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>CONSTANTE</b>	-11651,2	3713,26	-3,13774	0,0026
<b>Anchura anillos (m)</b>	-358616,00	104062,00	-3,44617	0,0010
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	18,4527	5,98704	3,0821	0,0030
<b>V-PLG (m/s)</b>	3,17921	0,375472	8,46724	0,0000

Un P-valor pequeño (menor a 0,05 ya que se está trabajando a un nivel de significancia de 5%) indica una relación significativa de la forma especificada existe entre en la variable dependiente (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos, la densidad y la velocidad de propagación de la onda medida con PLG).

**Tabla 56:** Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V-PLG).

Análisis de la varianza obtenida de la regresión múltiple					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo</b>	3,70129E8	3	1,23376E8	49,61	0,0000
<b>Residuo</b>	1,61652E8	65	2,48695E6		
<b>Total (Corr.)</b>	5,31781E8	68			

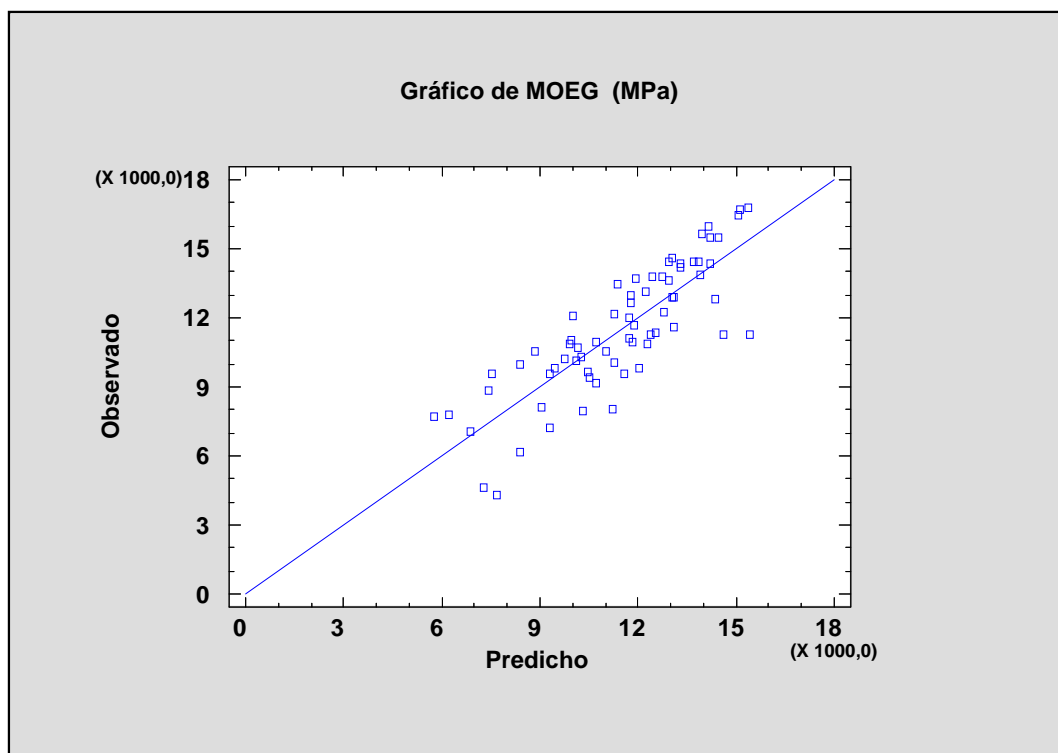
$$\text{MOEG (MPa)} = - 11651,2 - 358616,00 * \text{Anchura anillos (m)} + 18,4527 * \text{Densidad (Kg/m}^3\text{)} + 3,17921 * \text{V-PLG (m/s)}$$

Siendo:

- **Anchura anillos:** la anchura de los anillos medida en m
- $\delta$ : Densidad de la especie en Kg/m<sup>3</sup>
- **V PLG (m/s):** La velocidad obtenida a través de la medición de la frecuencia con el PLG

**Tabla 57:** Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (densidad, anchura anillos, y V-PLG).

Estadísticos obtenidos: regresión múltiple	
Estadístico	Valor obtenido
<b>R<sup>2</sup></b>	69,60 %
<b>R<sup>2</sup> (ajustado para g.l.)</b>	68,20%
<b>Error estándar del est.</b>	1577,01
<b>Error absoluto medio</b>	1267,64
<b>Estadístico Durbin-Watson</b>	2,27515 (P=0,8605)
<b>Autocorrelación de residuos</b>	-0,146854



**Figura 62:** Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V-PLG.

◆ **Regresión múltiple (anchura anillos, densidad y velocidad SYL-DD).**

**Tabla 58:** Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V DD SYL.

Parámetros de la regresión múltiple MOEG (MPa)				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-2409,97	4013,59	-0,600452	0,5502
Anchura anillos (m)	-612817,00	110310,00	-5,55541	0,0000
V DD-SYL (m/s)	2,92419	0,689234	4,24266	0,0001

Un P-valor pequeño (menor a 0,05 ya que se está trabajando a un nivel de significancia de 5%) indica una relación significativa de la forma especificada existe entre en la variable dependiente (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos y velocidad directa medida con Sylvatest Trio ®).

**Tabla 59:** Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V DD-SYL).

Análisis de la varianza obtenida de la regresión múltiple					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,38808E8	2	1,19404E8	30,90	0,0000
Residuo	2,66658E8	69	3,8646E6		
Total (Corr.)	5,05466E8	71			

$$\text{MOEG (MPa)} = - 2409,97 - 612817,00 * \text{Anchura anillos (m)} + 2,92419 * \text{V DD-SYL (m/s)}$$

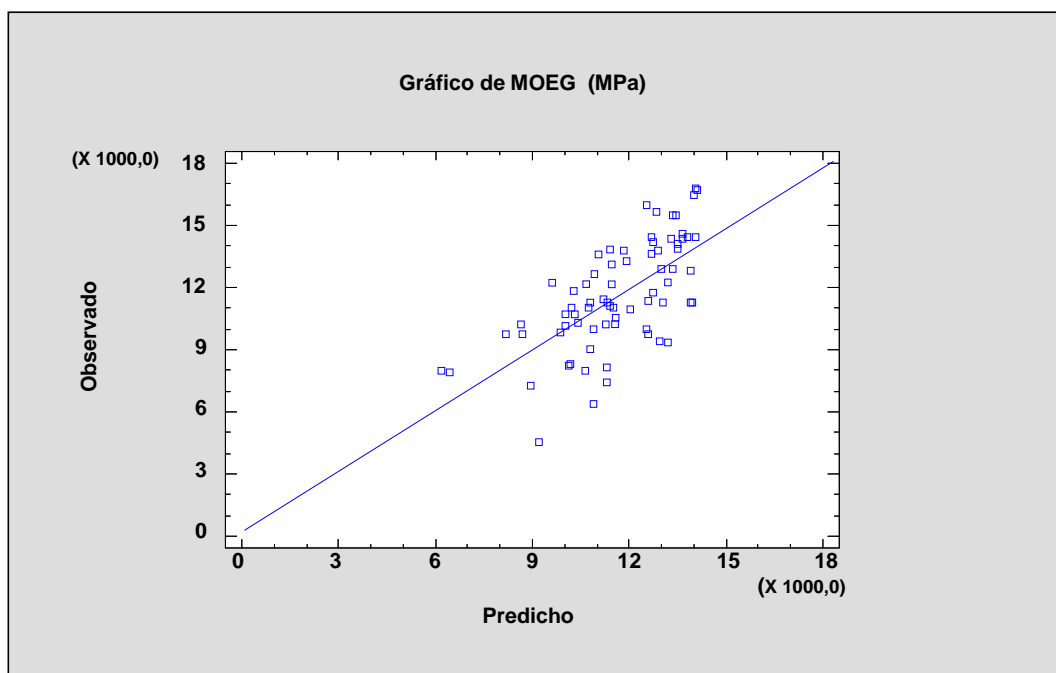
Siendo:

- **Anchura anillos:** la anchura de los anillos medida en m
- $\delta$ : Densidad de la especie en Kg/m<sup>3</sup>
- **V DD-SYL (m/s):** La velocidad directa obtenida con Sylvatest Trio ®

**Tabla 60:** Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (densidad, anchura anillos y V DD-SYL).

Estadísticos obtenidos: regresión múltiple	
Estadístico	Valor obtenido
R <sup>2</sup>	47,25 %
R <sup>2</sup> (ajustado para g.l.)	45,72 %
Error estándar del est.	1965,86
Error absoluto medio	1578,72
Estadístico Durbin-Watson	2,25736 (P=0,8545)
Autocorrelación de residuos	-0,142483





**Figura 63:** Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V DD-SYL.

♦ **Regresión múltiple (anchura anillos, densidad y velocidad SYL-IND).**

**Tabla 61:** Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V IND-SYL.

Parámetros de la regresión múltiple MOEG (MPa)				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-2341,45	4138,83	-0,565728	0,5734
Anchura anillos (m)	-551135,00	122558,00	-4,49692	0,0000
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	13,9347	6,76846	2,05877	0,0432
V IND SYL (m/s)	2,24888	0,442565	5,08148	0,0000

Un P-valor pequeño (menor a 0,05 ya que se está trabajando a un nivel de significancia de 5%) indica una relación significativa de la forma especificada existe entre en la variable dependiente (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos, la densidad y la velocidad indirecta medida con Sylvatest Trio®).

**Tabla 62:** Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V IND-SYL).

Análisis de la varianza obtenida de la regresión múltiple					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,8532E8	3	9,51065E7	24,77	0,0000
Residuo	2,68729E8	70	3,83899E6		
Total (Corr.)	5,54049E8	73			

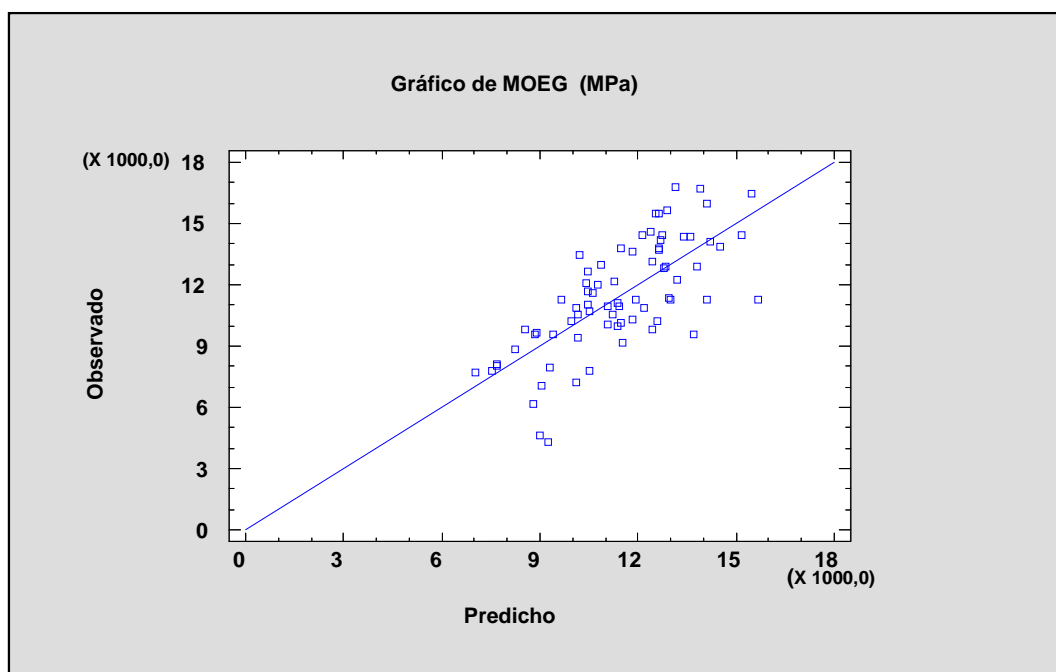
$$\text{MOEG (MPa)} = - 2341,45 - 551135,00 * \text{Anchura anillos (m)} + 13,9347 * \text{Densidad (Kg/m}^3) + 2,24888 * \text{V IND-SYL (m/s)}$$

Siendo:

- **Anchura anillos:** la anchura de los anillos medida en m
- $\delta$ : Densidad de la especie en Kg/m<sup>3</sup>
- **V IND-SYL (m/s):** La velocidad indirecta obtenida con Sylvatest Trio ®

**Tabla 63:** Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V IND-SYL).

Estadísticos obtenidos: regresión múltiple	
Estadístico	Valor obtenido
R <sup>2</sup>	51,49%
R <sup>2</sup> (ajustado para g.l.)	49,42%
Error estándar del est.	1959,33
Error absoluto medio	1526,93
Estadístico Durbin-Watson	1,91369 (P=0,3218)
Autocorrelación de residuos	0,0276618



**Figura 64:** Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V IND-SYL.

♦ **Regresión múltiple (anchura anillos, densidad y velocidad FAK-DD).**

**Tabla 64:** Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V DD-FAK.

Parámetros de la regresión múltiple MOEG (MPa)				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>CONSTANTE</b>	6077,5	4209,53	1,44375	0,1533
<b>Anchura anillos (m)</b>	-674089,	127226,	-5,29838	0,0000
<b>V DD-FAK (m/s)</b>	1,47735	0,73371	2,01354	0,0480

Un P-valor pequeño (menor a 0,05 ya que se está trabajando a un nivel de significancia de 5%) indica una relación significativa de la forma especificada existe entre en la variable dependiente (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos y velocidad directa medida con Fakopp

**Tabla 65:** Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (densidad, anchura de los anillos y V DD-FAK).

Análisis de la varianza obtenida de la regresión múltiple					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo</b>	1,95456E8	2	9,77279E7	18,97	0,0000
<b>Residuo</b>	3,55537E8	69	5,15271E6		
<b>Total (Corr.)</b>	5,50993E8	71			

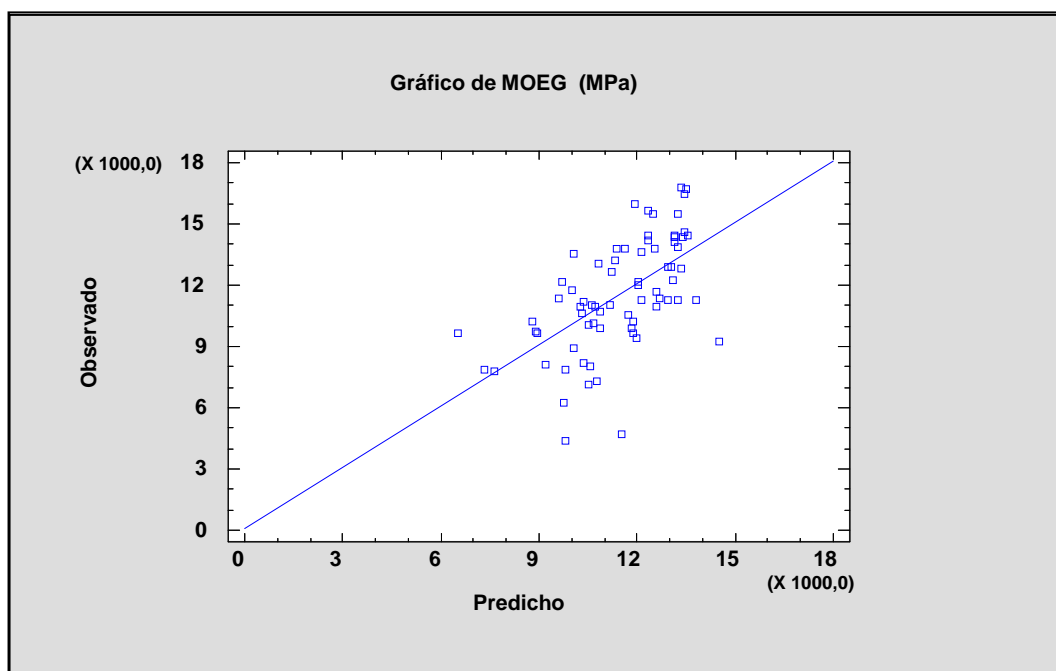
$$\text{MOEG (MPa)} = 6077,5 + 1,47735 * \text{V DD-FAK (m/s)} - 674089, * \text{Anchura anillos (m)}$$

Siendo:

- **Anchura anillos:** la anchura de los anillos medida en m
- $\delta$ : Densidad de la especie en Kg/m<sup>3</sup>
- **V DD-FAK (m/s):** Velocidad directa obtenida con Fakopp.

**Tabla 66:** Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V DD-FAK).

Estadísticos obtenidos: regresión múltiple	
Estadístico	Valor obtenido
<b>R<sup>2</sup></b>	35,47 %
<b>R<sup>2</sup> (ajustado para g.l.)</b>	33,60 %
<b>Error estándar del est.</b>	2269,96
<b>Error absoluto medio</b>	1757,34
<b>Estadístico Durbin-Watson</b>	2,06217 (P=0,5828)
<b>Autocorrelación de residuos</b>	-0,0453459



**Figura 65:** Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V DD-FAK.

◆ **Regresión múltiple (anchura anillos, densidad y velocidad FAK-IND).**

**Tabla 67:** Resultado de los parámetros de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenidos a través de las variables, densidad, anchura de los anillos y V IND-FAK.

Parámetros de la regresión múltiple MOEG (MPa)				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>CONSTANTE</b>	-1548,75	4154,73	-0,372767	0,7105
<b>Anchura anillos (m)</b>	-539744,	122720,	-4,39819	0,0000
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	19,5541	6,95479	2,8116	0,0065
<b>V IND-FAK (m/s)</b>	1,32415	0,455594	2,90642	0,0050

Un P-valor pequeño (menor a 0,05 ya que se está trabajando a un nivel de significancia de 5%) indica una relación significativa de la forma especificada existe entre en la variable dependiente (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos, la densidad y la velocidad indirecta medida con Fakopp).

**Tabla 68:** Tabla resumen del análisis de varianza obtenido al realizar la regresión múltiple (anchura de los anillos, densidad y V IND-FAK).

Análisis de la varianza obtenida de la regresión múltiple					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo</b>	2,02833E8	3	6,76111E7	18,72	0,0000
<b>Residuo</b>	2,3831E8	66	3,61076E6		
<b>Total (Corr.)</b>	4,41144E8	69			

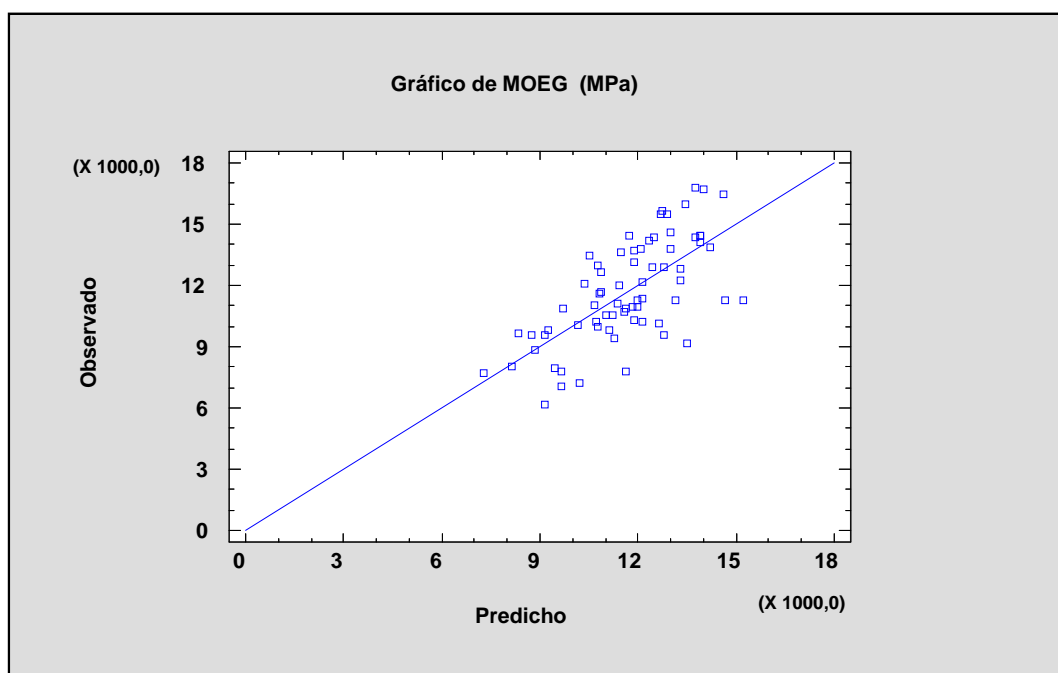
$$\text{MOEG (MPa)} = -1548,75 - 539744,00 \cdot \text{Anchura anillos (m)} + 19,5541 \cdot \text{Densidad (Kg/m}^3\text{)} + 1,32415 \cdot \text{V IND-FAK (m/s)}$$

Siendo:

- **Anchura anillos:** la anchura de los anillos medida en m
- $\delta$ : Densidad de la especie en Kg/m<sup>3</sup>
- **V IND-FAK (m/s):** La velocidad directa obtenida con Fakopp.

**Tabla 69:** Tabla resumen del análisis de los estadísticos obtenidos de la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y V IND-FAK).

Estadísticos obtenidos: regresión múltiple	
Estadístico	Valor obtenido
R <sup>2</sup>	45,98%
R <sup>2</sup> (ajustado para g.l.)	43,52 %
Error estándar del est.	1900,2
Error absoluto medio	1490,0
Estadístico Durbin-Watson	1,91607 (P=0,3458)
Autocorrelación de residuos	0,028481



**Figura 66:** Gráfico de observados frente a predichos de la regresión múltiple para MOEG (MPa) obtenida a partir de la anchura de los anillos, densidad y la V IND-FAK.

### 5.5. RESULTADO DE LA ASIGNACIÓN DE CLASE RESISTENTE SEGÚN NORMA UNE-EN 338:2016.

Para la asignación de clase de resistente a cada lote atendimos a las propiedades densidad, resistencia a la flexión (MOR) y propiedades de rigidez (MOE) obtenidos.

**Tabla 70:** Asignación de clase resistente atendiendo a las propiedades densidad, (MOR) y (MOE).

Parámetros	Clase resistente (Norma EN 338)	
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	<i>Pinus radiata</i> D.Don
Densidad	C50	C50
MOR	C50	C40
MOE	C35	C20

Atendiendo a la norma UNE-EN 56544:2011, en base a las dos clases visuales (ME-1 y ME-2), la asignación a clases resistentes según es la especie es la siguiente:

**Tabla 71:** Asignación de clase resistente atendiendo a la clase visual.

Especie	Clase de calidad	
	ME-1	ME-2
<i>Pinus sylvestris</i> L.	C27	C18
<i>Pinus radiata</i> D.Don	C24	C18

Observando el comportamiento clasificatorio de la Norma UNE-EN 338:2016 y la norma UNE-EN 56544:2011, entendemos que la clasificación visual subestima las propiedades del lote de *Pinus sylvestris* L. ya que según los ensayos de flexión sería de una calidad C35 y en el caso del *Pinus radiata* D.Don serían una clase C20 intermedia entre las dos calidades visuales, si bien dichos resultados deben ser considerados con prudencia dado el ajustado número de muestras que forman cada lote.

## **6. CONCLUSIONES**





## 6. CONCLUSIONES

En este apartado se reúnen las conclusiones obtenidas como resultado de este estudio, cabe señalar que dada la variabilidad de la madera y el limitado número de probetas dichos resultados deben ser tomados con precaución.

### 1. Clasificación visual

La clasificación visual del lote de 40 probetas de la especie *Pinus sylvestris* L. de acuerdo con los criterios recogidos en la norma UNE-EN 56544:2011, obtenemos como resultado que un 75 % es clasificada como madera estructural, de los cuales un 42,50 % es ME-1 y un 32,50 % es ME-2. El restante 25 % del lote se clasifica como "Rechazo". La principal causa de la penalización de las probetas de madera hasta calificarlas como rechazo es la presencia de nudos tanto en cara como en canto.

En cuanto a la clasificación visual del lote de 40 probetas de la especie *Pinus radiata* D. donde acuerdo con los criterios recogidos en la norma UNE-EN 56544:2011, obtenemos como resultado que un 75 % es clasificada como madera estructural, de los cuales un 20 % es ME-1 y un 55 % es ME-2. El restante 25 % del lote se clasifica como "Rechazo". Al igual que en el lote de *Pinus sylvestris* L. la principal causa de la penalización de las probetas de madera hasta calificarlas como rechazo es la presencia de nudos tanto en cara como en canto.

### 2. Características elastomecánicas de la madera de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L.

Basándonos en los valores obtenidos en el cálculo de la desviación estándar y el coeficiente de variación podemos afirmar que estamos ante muestras bastante homogéneas, con poca dispersión refiriéndonos a ambos lotes de las dos especies diferentes. Destacar que el parámetro con mayor coeficiente de variación en ambos lotes resulta el mismo; el número de nudos presentes en las probetas, siendo en *Pinus sylvestris* L. 89,59 % y en *Pinus radiata* D. Don 64,15 % con valores medios de 2 nudos y tres nudos respectivamente. En relación al parámetro físico estudiado que presenta menor CV en ambos lotes es el mismo siendo la humedad, esto era previsible debido a que ambos lotes de madera han estado en las mismas condiciones de humedad y temperatura antes y durante la realización de este estudio.

En cuanto a la determinación de las propiedades elastomecánicas se han obtenido valores medios de densidad de 525,14 Kg/m<sup>3</sup> y 484,08 Kg/m<sup>3</sup> para *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D. Don respectivamente. En relación a la humedad se obtuvo una humedad media de 10,19% en el lote de *Pinus sylvestris* L. y 10,03% en el lote de *Pinus radiata* D. Don. Respecto a los MOEd obtenidos a través de la medida de velocidad de propagación de la onda con diferentes tipos de equipos (vibraciones inducidas, ultrasonidos...) destacar que en el lote de *Pinus sylvestris* L. el MOEd con menor CV es el obtenido a través de equipo de ultrasonidos Fakopp (FAK) a través de la medida directa (DD) siendo 12,66 %, mientras que el mayor CV (26,32 %) se presenta en el MOEd obtenido a través de la medida indirecta (IND) realizada con el equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®. El MOEd de la medida directa (DD) SYL es mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D. Don ocurriendo lo mismo en la medida indirecta (IND) SYL.

El MOEd del ensayo de vibraciones inducidas (PLG) es mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D.Don.

Respecto al lote de *Pinus radiata* D.Don destacar que el MOEd con menor CV (18,53 %) es el obtenido a través de la medida directa (DD) realizada con el equipo Fakopp al igual que ocurría en el lote de *Pinus sylvestris* L., mientras que el mayor CV (44,17 %) se obtuvo a través de la medida indirecta (IND) realizada con el equipo de ultrasonidos Fakopp (FAK). El MOEd de la medida directa (DD) FAK del ensayo de ultrasonidos con Fakopp es mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D.Don, por el contrario el MOEd de la medida indirecta (IND) FAK del ensayo de ultrasonidos con Fakopp es mayor para *Pinus radiata* D.Don que para *Pinus sylvestris* L.

Cabe destacar que el Módulo de Rotura (MOR) es más variable en el lote formado por probetas de *Pinus radiata* D.Don que en el formado por probetas de *Pinus sylvestris* L., siendo el valor del coeficiente de variación 42,92 % y 27,89 % respectivamente, siendo los valores medios obtenidos de éstos 40,32 MPa y 52,46 MPa. El MOR obtenido del ensayo de flexión es mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D.Don.

En relación al Módulo de Elasticidad Global a la Flexión (MOEG) señalar que es más variante en el lote de *Pinus radiata* D.Don siendo el CV obtenido 23,59 %, que en el lote de *Pinus sylvestris* L. que es 15,77 %; Los valores medios obtenidos para este módulo son 13092,80 MPa para *Pinus sylvestris* L. y 9695,63 MPa para *Pinus radiata* D.Don. El MOEG obtenido del ensayo de flexión mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D.Don

Similar es lo que ocurre respecto al Módulo de Elasticidad Estático (MOE), el coeficiente de variación de *Pinus radiata* D.Don es más elevado que en *Pinus sylvestris* L. siendo estos respectivamente 29,98 % y 18,72 %. El valor medio para MOE en *Pinus radiata* D.Don es 9914,32 MPa mientras que para *Pinus sylvestris* L. es más elevado siendo 13932,50 MPa.

La densidad ( $\delta$ ) es mayor para *Pinus sylvestris* L. que para *Pinus radiata* D.Don

Se puede concluir que el análisis comparativo del lote de probetas de *Pinus sylvestris* L. con el lote de probetas de *Pinus radiata* D.Don, muestra la existencia de diferencias significativas entre los dos lotes para todas las variables analizadas. Se observa en las variables una tendencia clara según la especie de los dos lotes estudiados, por lo que el factor especie se puede considerar el principal factor cualitativo a tener en el momento de caracterizar elasto-mecánicamente la madera de una determinada especie.

### 3. Análisis de predicción del MOEG a partir de variables medidas con equipos de ultrasonidos.

Se comprueba la relación existente entre la variable dependiente Módulo de Elasticidad Global a la Flexión (MOEG) y las variables independientes (anchura de los anillos, la densidad, la velocidad de propagación de la onda medida a través de diferentes ensayos no destructivos). Destacar que de las cinco regresiones obtenidas la que obtiene un mayor  $R^2$  ajustada es la regresión múltiple (anchura anillos, densidad y Velocidad PLG) con una  $R^2$  ajustada de 68,20 %.

#### 4. Clasificación según norma UNE-EN 308:2016

Finalmente cabe señalar que después de asignar a cada lote una clase resistente en función de tres parámetros (flexión, módulo de elasticidad paralelo medio y densidad media) obtenemos como resultados que respecto al lote de madera de *Pinus sylvestris* L. tomando como propiedad clasificatoria la densidad la clase resistente sería la C50, tomando como propiedad clasificatoria el MOR es la C50 y tomando como variable clasificatoria el MOE sería C35. En relación al lote de madera de *Pinus radiata* tomando como propiedad clasificatoria la densidad la clase resistente sería la C50, tomando como propiedad clasificatoria el MOR es la C40 y tomando como variable clasificatoria el MOE sería C20.

Cabe señalar que la clasificación de los lotes en función de las clases visuales (ME-1 Y ME-2) subestima las propiedades para *Pinus sylvestris* L. ya que las clases resistentes para ME-1 y ME-2 serían C27 y C18, respectivamente y para *Pinus radiata* D.Don la clase resistente sería C20 una clase intermedia entre las dos que asigna la clasificación visual que son C24 y C18.

Señalar que el porcentaje de madera clasificada como rechazo fue notablemente mayor cuando se tomaron criterios de clasificación visual, ya que se obtuvo en *Pinus sylvestris* L. un 25 % de las piezas clasificadas como rechazo y en *Pinus radiata* D. Don un 22,50 % del lote fue clasificada como madera no estructural.



## **7. BIBLIOGRAFÍA**



## 7. BIBLIOGRAFÍA

**BELTRÁN, M., VERICAT, P. y PIQUÉ, M. (COORD.) 2013.** Evaluación de los Recursos Forestales por CC.AA. Proyecto REDFOR. Proyecto piloto en el marco de la Red Rural Nacional, 2011. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Solsona (Lleida). 211 p.

**COMISIÓN EUROPEA, 2010.** Guía de prácticas adecuadas para la movilización sostenible de madera en Europa. 76 pág.

**CONFEDERACIÓN DE ORGANIZACIONES DE SELVICULTORES DE ESPAÑA (COSE), 2011.** Control de cortas de madera y evaluación del riesgo en cada Comunidad Autónoma para aplicación del sistema de diligencia debida.

**DÍAZ-VAZ, J. y CUEVAS, H. 1982.** Ensayos mecánicos de la madera. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 44p.

**FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO J.I., DÍEZ M.R., HERMOSO E. y MIER R. (2003).** Manual de clasificación de la madera. AiTim. (ISBN: 84:87381-26-X).

**FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.L., DÍEZ, M.R. y GUTIÉRREZ, A., 1998.** Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544. Materiales de construcción. Vol.48. nº 252: 45-59.

**FERNÁNDEZ GOLFÍN, J.I. y HERMOSO, E. 2015.** Las necesidades de I+D+I y de formación de la industria primaria de la madera en España.

**HERMOSO, E., 2001.** Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid.

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGRARIA (INIA), (2011).** Informe del desarrollo del proyecto sobre caracterización mecánica de vigas de gruesa escuadría de pino radiata.

**ÍÑIGUEZ, G., 2007.** Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid.

**MAGRAMA, 2014.** Diagnóstico del sector forestal español. Análisis y prospectiva. Serie Agrinfo/Medioambiente Nº8. 10 pág.

**MONTERO, M.J., 2013.** Clasificación de la madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* L. mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid.

**MONTERO, M.J, DE LA MATA, J. ESTEBAN, M. y HERMOSO, E. 2015.** Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain. Maderas, Cienc. tecnol. [online]. vol.17, n.2, pp.407-420. Epub 19-Mar-2015. ISSN 0718-221X

**PICOS, J. 2015.** Industria forestal y mercado de la madera: navegando en la tormenta. Universidade de Vigo. Dpto. Enxeñaría dos Recursos Naturais e Medio Ambiente. Escola de Enxeñaría Forestal. Campus A Xunqueira

**TOLOSANA, E., 2016.** Para una gestión forestal sostenible, más madera. (Iniciativas, oportunidades y barreras a la movilización de madera de coníferas en el centro y norte de España).

UNE-EN 844:1997. **Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.**

UNE-EN 1310:1997. **Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.**

UNE-EN 56529:1977. **Caracterización físico mecánica de la madera, determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro.**



UNE-EN 408:2011. **Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.**

UNE-56544:2011. **Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas**

UNE-EN 336:2014. **Madera estructural. Medidas y tolerancias.**

UNE-EN 338:2016. **Madera aserrada estructural. Clases resistentes.**

**UNECE/FAO, 2011.** The European forest sector outlook study II, 2010-2030; EFSOS II UNECE and FAO. Geneve.

**UNECE/FAO, 2013.** Forest and Economic Development: a Driver for the Green Economy in the ECE Region. ECE/TIM/SP/31 United Nations Publications

**VIGNOTE PEÑA, S. y MARTÍNEZ ROJAS, I. 2006.** Tecnología de la madera. Mundi prensa libros. ISBN: 84-8476-263-7.



## **8. ANEXOS**



## 8. ANEXOS

### 8.1. RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE. PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS MOEd

Para la verificación de la hipótesis de normalidad de los datos pertenecientes a cada variable con la que estamos trabajando, siendo éste un paso fundamental para la aplicación de los siguientes procedimientos estadísticos que son los habituales en este tipo de estudios, se realizaron la constatación de los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad.

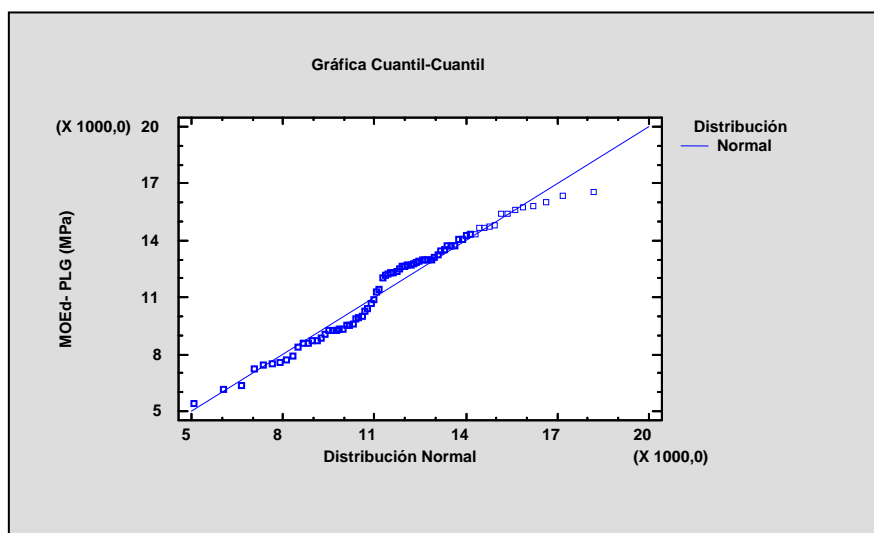
A continuación se muestra las pruebas de Bondad de Ajuste (Prueba de Kolmogorov-Smirnov) para cada uno de los parámetros calculados, también se presenta como apoyo grafico la gráfica cuantil-cuantil para cada una de las variables analizadas.

#### Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEd con PLG

La prueba de normalidad de MOEd obtenido a través del PLG se muestra en la tabla 72

**Tabla 72:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEd-PLG (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEd-PLG (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0888051
DMENOS	0,126239
DN	0,126239
Valor-P	0,183252



**Figura 67:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través del PLG – Distribución teórica normal.

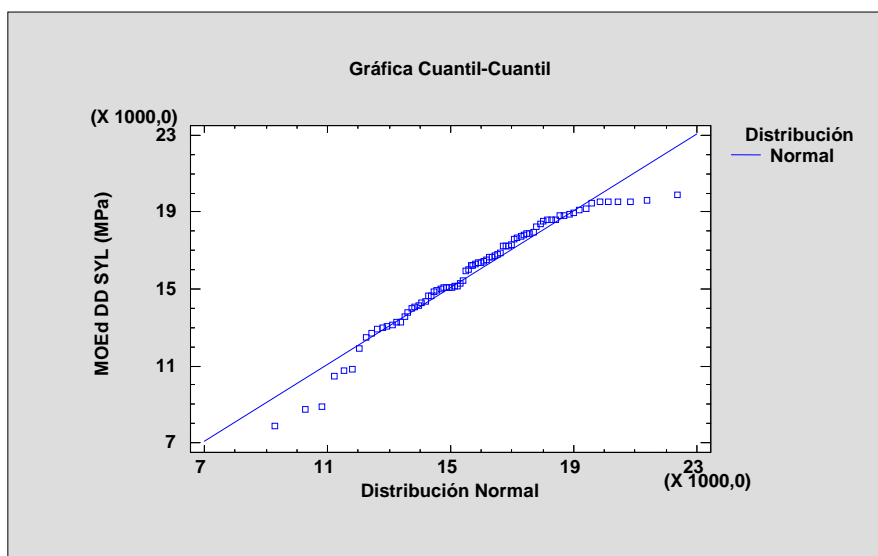
Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEd a través del PLG que es 0,183252, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 72. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEd con SYL-DD

La prueba de normalidad de MOEd obtenido a través de la medida tomada de forma directa con Sylvatest Trio ® se muestra en la tabla 73

**Tabla 73:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-SYL (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-SYL(MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0758003
DMENOS	0,0853553
DN	0,0853553
Valor-P	0,612618



**Figura 68:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida directa (DD) con Sylvatest Trio ® (SYL) – Distribución teórica normal.

Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEd a través de la medida directa (DD) con Sylvatest Trio ® (SYL), que es 0,612618, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 73. Además se muestra

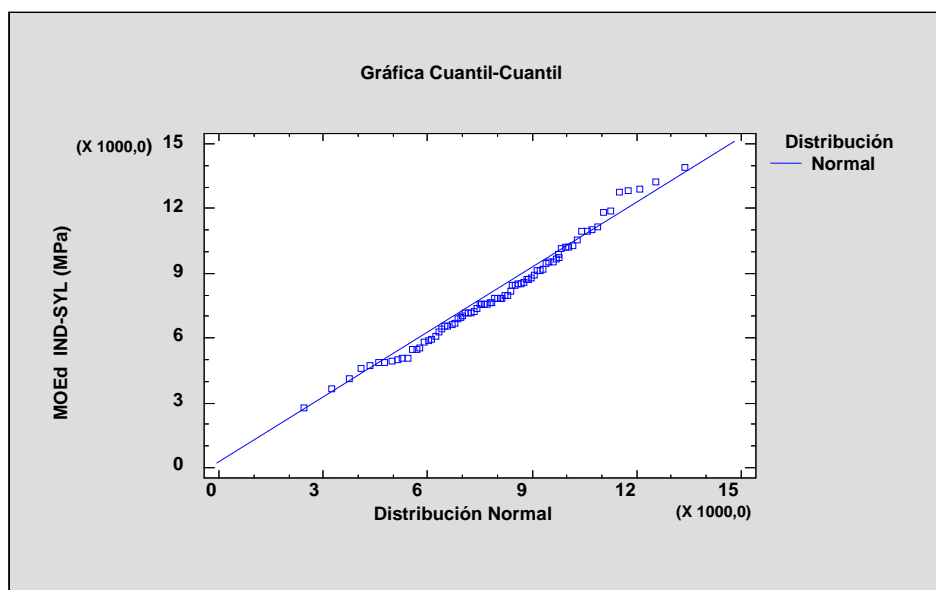
como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEd con SYL-IND

La prueba de normalidad de MOEd obtenido a través de la medida tomada de forma indirecta con Sylvatest Trio ® se muestra en la tabla 74

**Tabla 74:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-SYL (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-SYL (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0586282
DMENOS	0,0391223
DN	0,0586282
Valor-P	0,948826



**Figura 69:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida indirecta (IND) con Sylvatest Trio ® (SYL) – Distribución teórica normal.

Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEd a través de la medida indirecta (IND) con Sylvatest Trio ® (SYL), que es 0,948826, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 74. Además

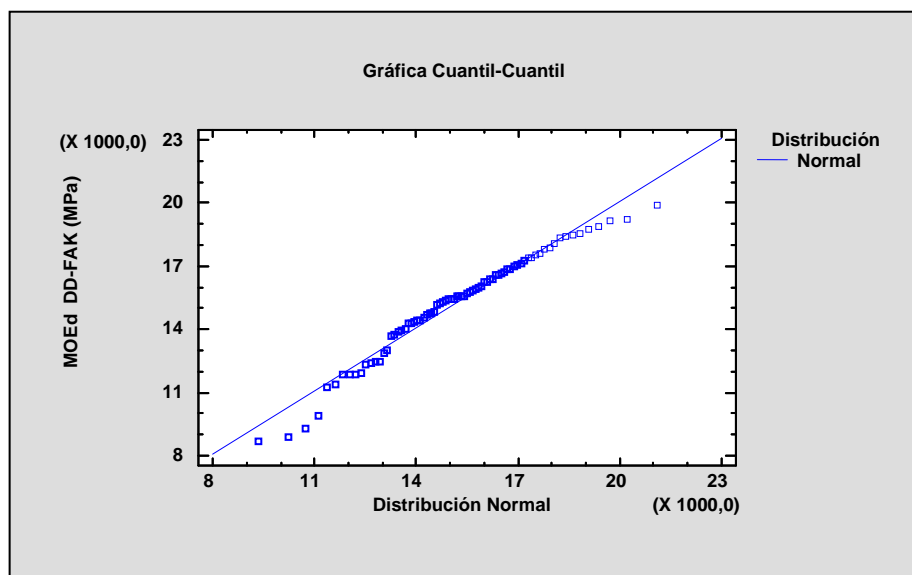
se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEd con FAK-DD

La prueba de normalidad de MOEd obtenido a través de la medida tomada de forma directa con Fakopp se muestra en la tabla 75

**Tabla 75:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-FAK (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEd DD-FAK (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
	0,0460063
<b>DMENOS</b>	0,0961442
<b>DN</b>	0,0961442
<b>Valor-P</b>	0,476023



**Figura 70:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida directa (DD) con Fakopp (FAK) – Distribución teórica normal.

Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEd a través de la medida directa (DD) con Fakopp (FAK), que es 0,476023, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 75. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

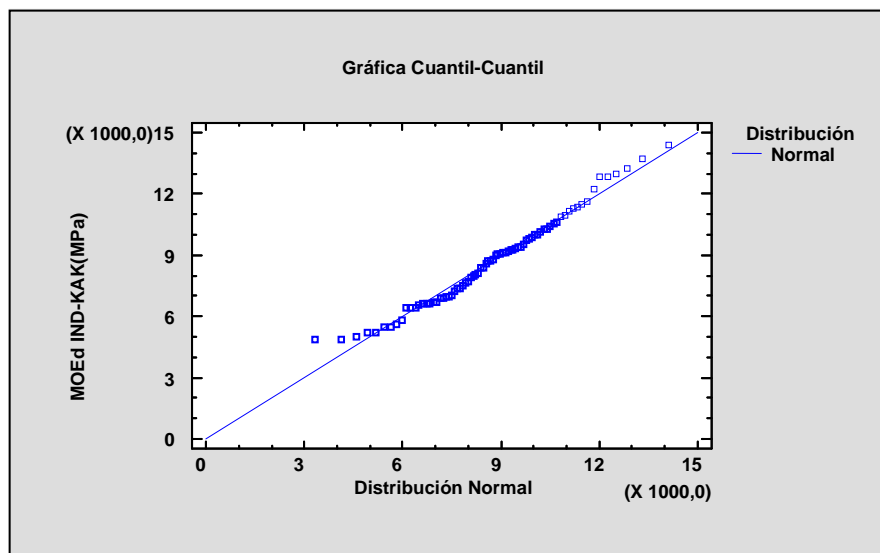


Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEd con FAK IND

La prueba de normalidad de MOEd obtenido a través de la medida tomada de forma indirecta con Fakopp se muestra en la tabla 76

**Tabla 76:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-FAK (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEd IND-FAK (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0728471
DMENOS	0,0444775
DN	0,0728471
Valor-P	0,814737



**Figura 71:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEd obtenido a través de la medida indirecta (IND) con Fakopp (FAK) – Distribución teórica normal.

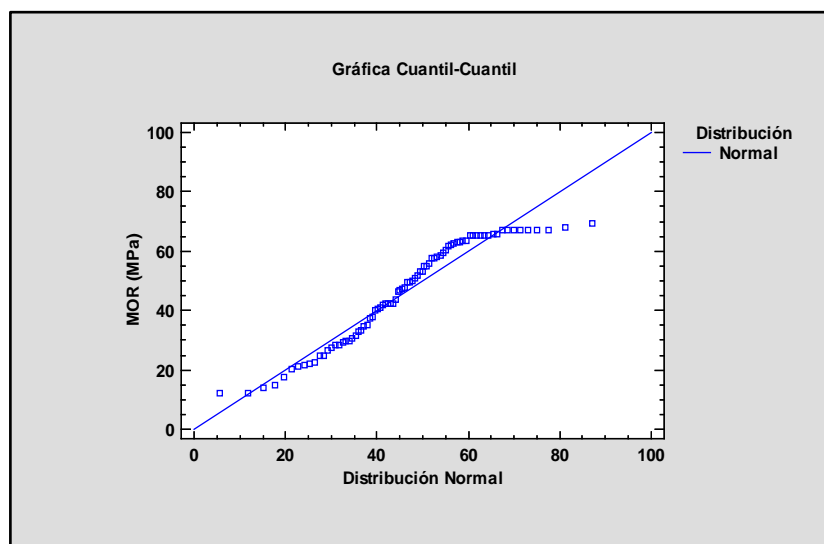
Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEd a través de la medida directa (IND) con Fakopp (FAK), que es 0,814737, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 76. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOR con M-UN

La prueba de normalidad de MOR obtenido a través de la medida tomada con la Máquina Universal se muestra en la tabla 77.

**Tabla 77:** Pruebas de bondad de ajuste para MOR M-UN (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOR M-UN (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0913418
DMENOS	0,117213
DN	0,117213
Valor-P	0,222154



**Figura 72:** Gráfico cuantil-cuantil. MOR obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal.

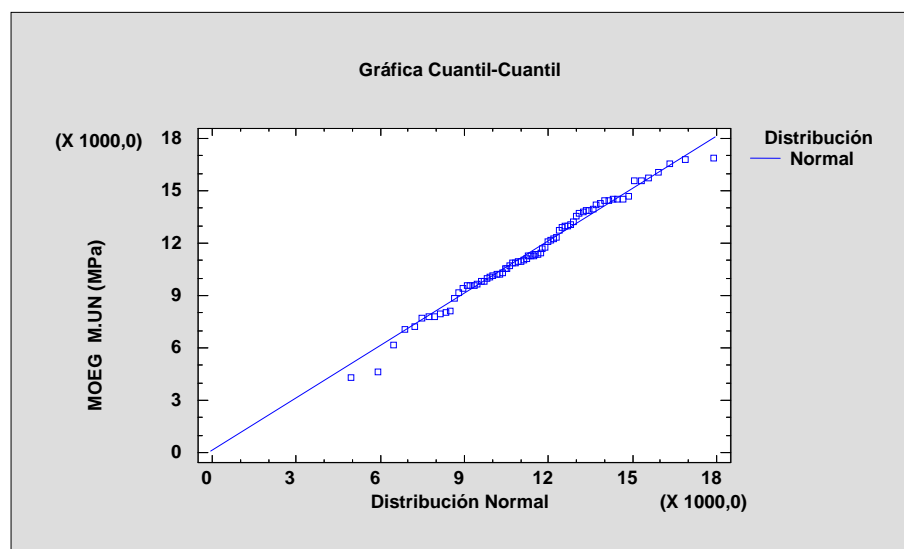
Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOR a través de la medida con la Máquina Universal (M-UN), que es 0,222154, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 77. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOEG con M-UN

La prueba de normalidad de MOEG obtenido a través de la medida tomada con la Máquina Universal se muestra en la tabla 78.

**Tabla 78:** Pruebas de bondad de ajuste para MOEG M-UN (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de bondad de ajuste para MOEG M-UN (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0708686
DMENOS	0,0593522
DN	0,0708686
Valor-P	0,851274



**Figura 73:** Gráfico cuantil-cuantil. MOEG obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal.

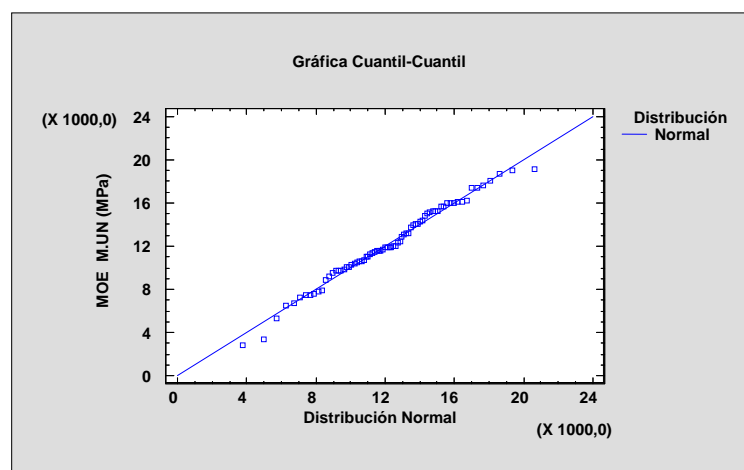
Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOEG a través de la medida con la Máquina Universal (M-UN), que es 0,851274, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 78. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para el MOE con M-UN

La prueba de normalidad de MOE obtenido a través de la medida tomada con la Máquina Universal se muestra en la tabla 79.

**Tabla 79:** Pruebas de bondad de ajuste para MOE M-UN (MPa). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para MOE M-UN (MPa)	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,0708686
DMENOS	0,0593522
DN	0,0708686
Valor-P	0,851274



**Figura 74:** Gráfico cuantil-cuantil. MOE obtenido a través de la medida con Máquina Universal (M-UN) – Distribución teórica normal.

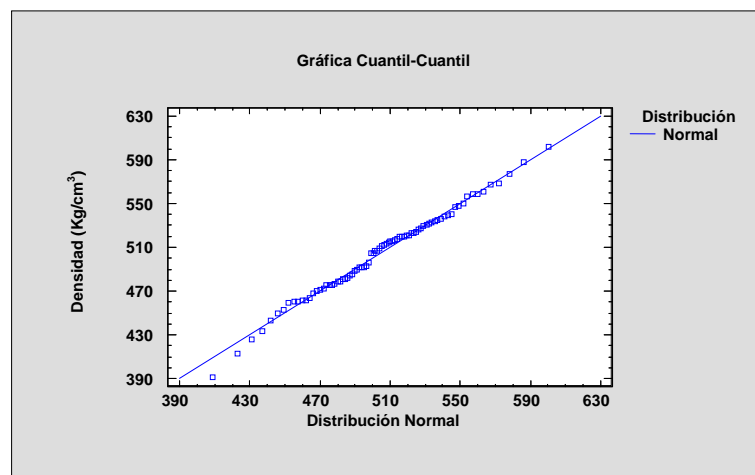
Consecuentemente con el p-valor obtenido para el MOE a través de la medida con la Máquina Universal (M-UN), que es 0,851274, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 79. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

Resultado de las pruebas de Bondad de Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov la densidad

La prueba de normalidad de la densidad obtenida a través del secado en estufa de muestras obtenidas de las probetas se muestra en la tabla 80.

**Tabla 80:** Pruebas de bondad de ajuste para la densidad (Kg/cm<sup>3</sup>). Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para $\delta$ (Kg/cm <sup>3</sup> )	
Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
Estadístico	Normal
DMAS	0,046258
DMENOS	0,0650052
DN	0,0650052
Valor-P	0,887882

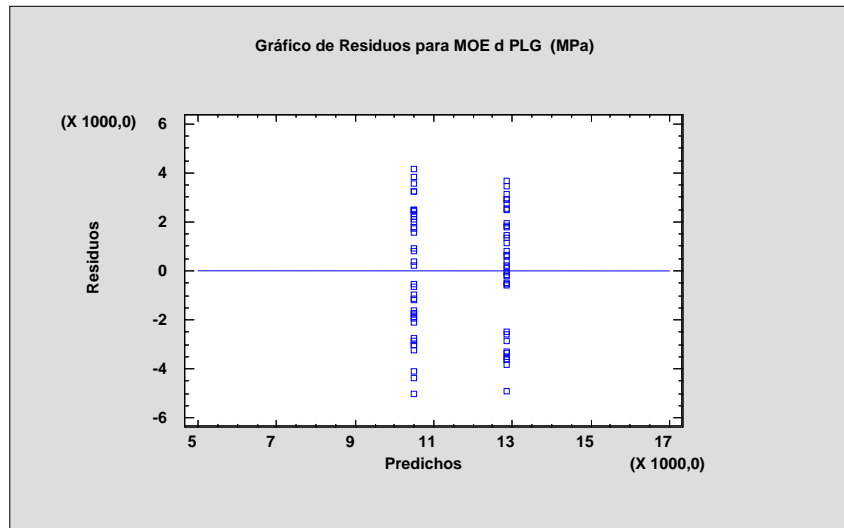


**Figura 75:** Gráfico cuantil-cuantil. Densidad obtenida a través de secado de muestras provenientes de las probetas – Distribución teórica normal.

Consecuentemente con el p-valor obtenido para la densidad a través del secado de muestras provenientes de las probetas, que es 0,887882, siendo éste mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis de que las observaciones provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Esto se muestra en la tabla 80. Además se muestra como apoyo gráfico de lo anteriormente expuesto la gráfica cuantil-cuantil para la variable analizada.

## 8.2. GRÁFICOS DE RESIDUOS PARA MOEd. HIPÓTESIS DE HOMOCEASTICIDAD

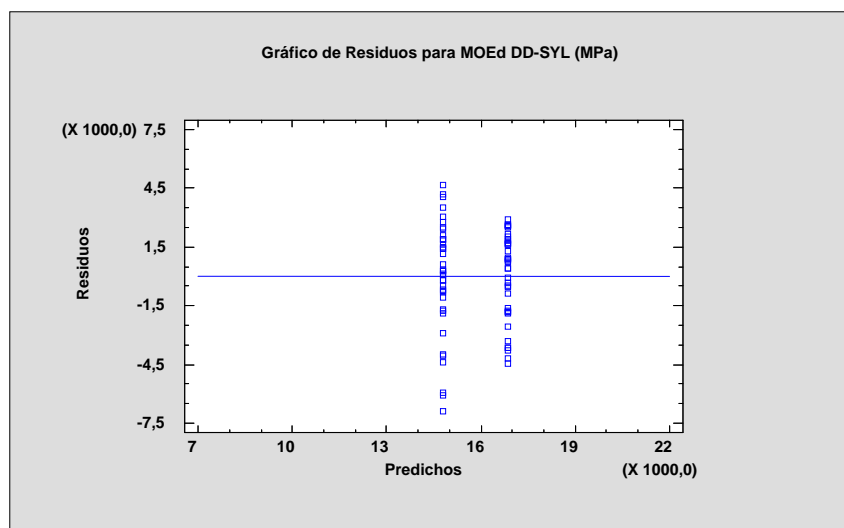
- ♦ Gráfico de Residuos para MOEd-PLG. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 76:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de PLG.

En la figura 76 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEd obtenido con PLG. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

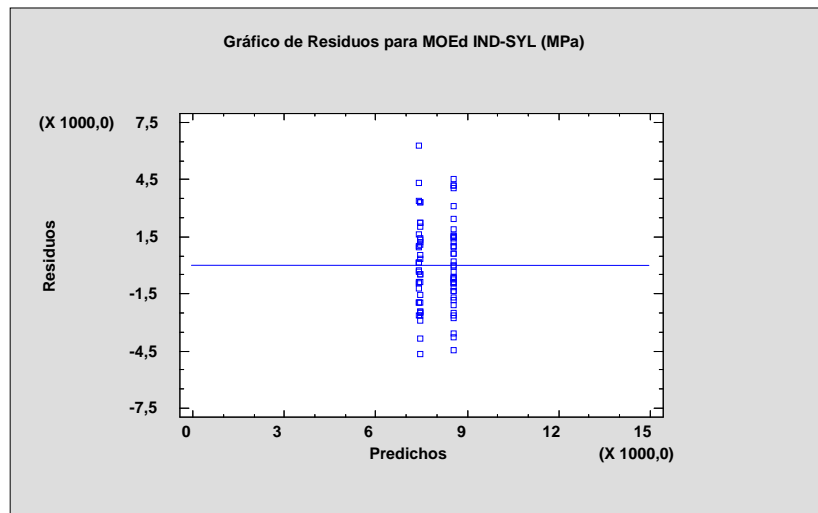
- ♦ Gráfico de Residuos para MOEd DD-SYL. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 77:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida directa con Sylvatest Trio ®.

En la figura 77 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEd obtenido a través de medida directa (DD) con Sylvatest Trio ®. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

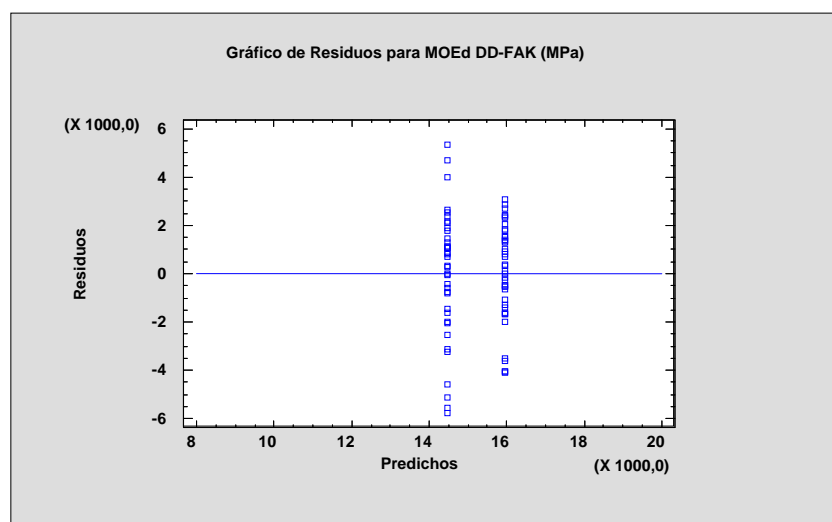
◆ Gráfico de Residuos para MOEd IND-SYL. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 78:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Sylvatest Trio ®

En la figura 78 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEd obtenido a través de medida directa (IND) con Sylvatest Trio. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

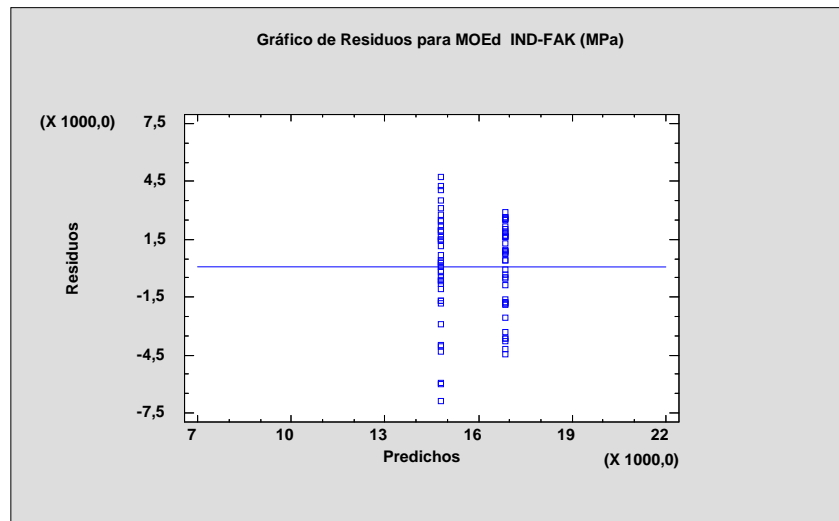
◆ Gráfico de Residuos para MOEd DD FAK. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 79:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida directa con Fakopp

En la figura 79 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEd obtenido a través de medida directa (DD) con Fakopp. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

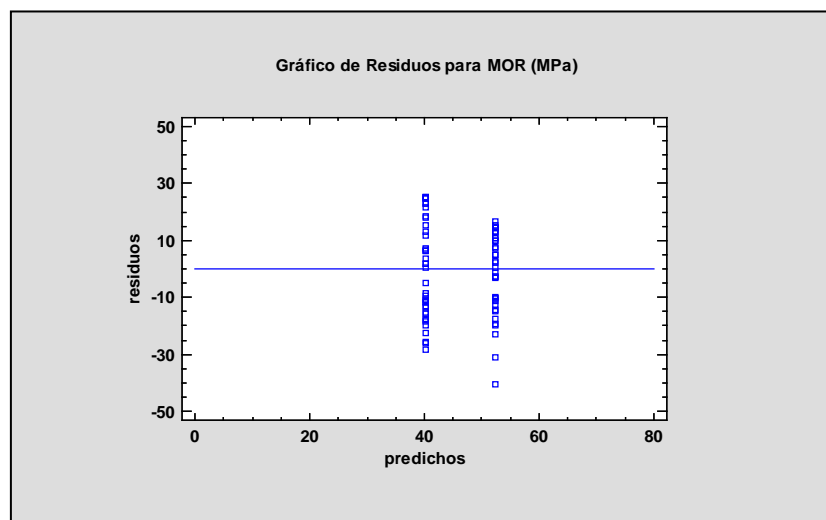
- ◆ Gráfico de Residuos para MOEd INDFAK. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 80:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEd obtenido a través de la medida indirecta con Fakopp

En la figura 80 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEd obtenido a través de medida indirecta (IND) con Fakopp. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

- ◆ Gráfico de Residuos para MOR. Hipótesis de homocedasticidad.

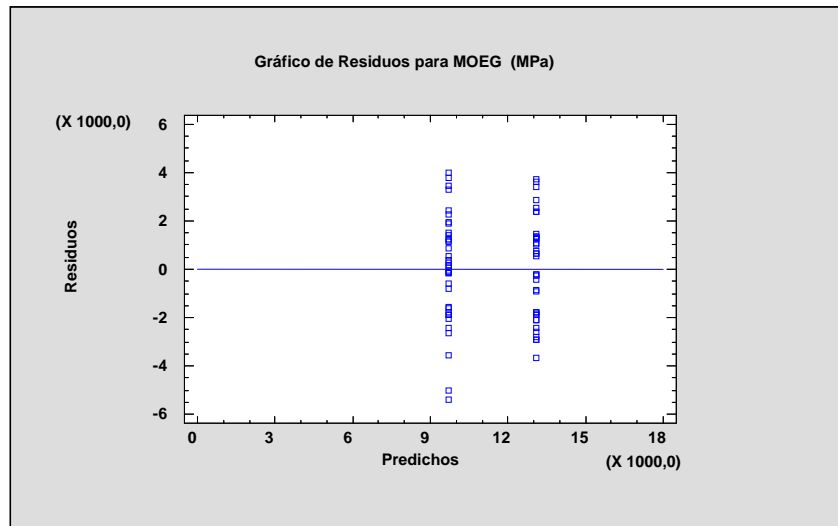


**Figura 81:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOR obtenido a través de la Máquina Universal



En la figura 81 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOR obtenido con Máquina Universal. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

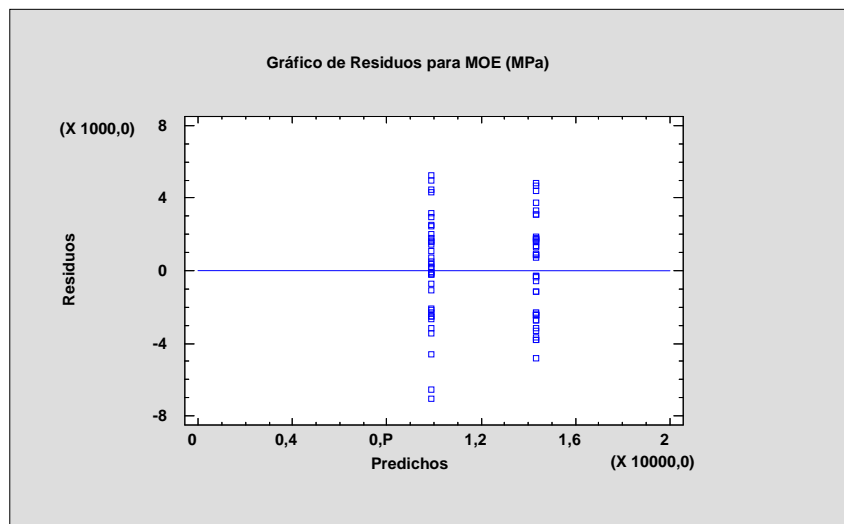
◆ Gráfico de Residuos para MOEG. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 82:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOEG obtenido a través de la Máquina Universal

En la figura 82 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para en MOEG obtenido con Máquina Universal. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

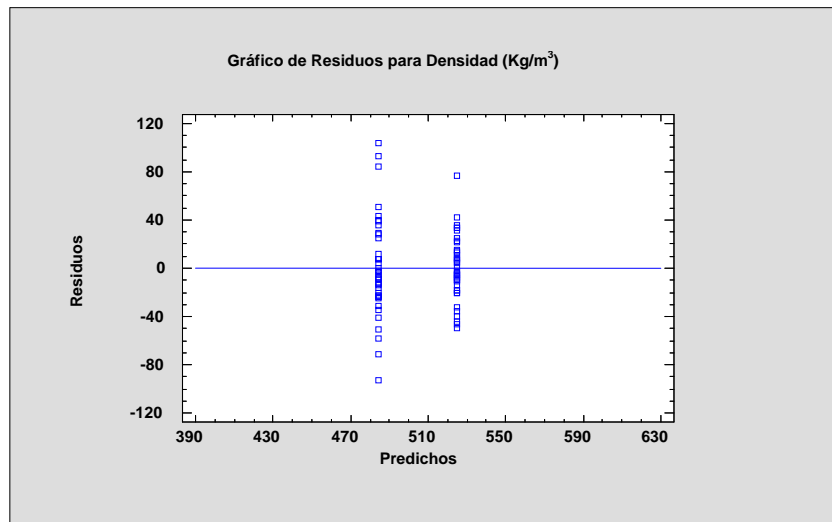
◆ Gráfico de Residuos para MOE. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 83:** Gráfico residuos frente a predichos para el MOE obtenido a través de la Máquina Universal.

En la figura 83 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para MOE obtenido con Máquina Universal. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.

◆ Gráfico de Residuos para DENSIDAD. Hipótesis de homocedasticidad.



**Figura 84:** Gráfico residuos frente a predichos para la densidad obtenida a través del secado en estufa de las muestras procedentes de probetas.

En la figura 84 se ha graficado los residuos frente los valores ajustados (o predicciones) para la densidad obtenido con a través del secado de muestras obtenidas de las probetas. En esta grafica no se revelan patrones ni formas de embudos obvios que pusieran indicar una violación de la hipótesis de homocedasticidad (o igualdad de varianzas), por lo que podemos considerar que los datos satisfacen la hipótesis de homocedasticidad.