

**Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría**



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**

**EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL  
GEORRADAR PARA LA INSPECCIÓN, DIAGNÓSTICO Y  
ANÁLISIS RESISTENTE DE LA MADERA**

**TESIS DOCTORAL**

**PRESENTADA POR:**

**DÑA. ISABEL RODRÍGUEZ ABAD**

**DIRIGIDA POR:**

**DR. D. FRANCISCO GARCÍA GARCÍA**

**DR. D. RAFAEL CAPUZ LLADRÓ**

**VALENCIA, 2009**



## **RESUMEN**

*Actualmente, la técnica del georradar, que utiliza radiación electromagnética en el espectro de las microondas, tiene muchas aplicaciones en diversos campos y es un método de prospección no destructivo que permite el estudio rápido de estructuras de edificación. De hecho es una técnica que se emplea cada vez más en la inspección y diagnóstico de estructuras de edificación y materiales de construcción como por ejemplo el hormigón o la piedra.*

*El principio general de la prospección con georradar se basa en la propagación de impulsos electromagnéticos. Una antena situada sobre la superficie de un material transmite una onda que se propaga hacia el interior de éste, siendo parcialmente reflejada en las interfases donde existe un contraste dieléctrico. La respuesta del material, constituida por todas las ondas reflejadas, es registrada, procesada y analizada con el objeto de caracterizar y/o estudiar el medio por el que se propaga.*

*En esta tesis se analiza la aplicación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural. El carácter no destructivo de esta técnica hace que sea especialmente adecuada para el análisis de la madera cuando ésta forma parte de una estructura.*

*La tesis está dividida en cuatro partes. En la **primera parte** se introducen todos aquellos aspectos necesarios para la comprensión del fundamento básico de la técnica de georradar. De igual forma se repasan las principales propiedades físicas de la madera estructural así como la normativa vigente sobre su uso estructural. Posteriormente se detallan los ensayos realizados para calibrar el funcionamiento y comportamiento de la antena empleada (frecuencia central de 1.6 GHz) tanto en el aire como en la madera.*

*En la **segunda** se estudian por medio de georradar las principales propiedades físicas de la madera, en concreto aquellas que afectan de forma determinante a la resistencia mecánica de la misma. En primer lugar, se estudia la anisotropía dieléctrica de la madera y con ello se calibra la capacidad de inspección del georradar frente a las distintas direcciones de la fibra. En segundo lugar, se analiza en detalle como afecta la variación del contenido de humedad de la madera a la radiación electromagnética, ya que el contenido de humedad es uno de los principales factores que influyen en la degradación o deterioro de una pieza. Por último, se evalúa la capacidad de la técnica para diferenciar o caracterizar maderas de diferentes especies a partir del análisis de la densidad. En el estudio de cada uno de estos parámetros, habida cuenta de lo novedoso de esta aplicación, se abordan tanto aspectos metodológicos como de calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.*

*En la **tercera parte** de la tesis, se comparan los resultados obtenidos con el georradar al evaluar la anisotropía dieléctrica, el contenido de humedad y la densidad con dos técnicas no destructivas emergentes en el campo de estudio de la madera estructural (el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos). Los resultados apuntan que el georradar es una técnica más fiable para el análisis propuesto. No obstante, una combinación de todas ellas proporciona datos muy interesantes para evaluar el estado de la madera y poder hacer un diagnóstico de la misma.*

*En la **cuarta** y última parte se establecen los criterios básicos para emplear la técnica del georradar en la clasificación resistente de la madera aserrada nueva. Actualmente las líneas de investigación en este ámbito se orientan hacia la búsqueda de métodos de clasificación de la madera aserrada que no sean destructivos y que aporten datos de variables que puedan asociarse con los parámetros resistentes. En este sentido, se realiza un estudio pormenorizado comparativo de las distintas técnicas existentes en la actualidad y la*

*clasificación realizada por medio de georradar a partir de unos criterios  
iniciales definidos por primera vez en esta tesis.*



## **RESUM**

*Actualment, la tècnica del georadar, que utilitza radiació electromagnètica a l'espectre de les microones, té moltes aplicacions a diversos àmbits i és un mètode de prospecció no destructiu que permet l'estudi ràpid d'estructures d'edificació. De fet, és una tècnica que s'empra cada vegada més a la inspecció i diagnòstic d'estructures d'edificació i materials de construcció com, per exemple, el formigó o la pedra.*

*El principi general de la prospecció amb georadar es basa en la propagació d'impulsos electromagnètics. Una antena disposada sobre la superfície d'un material transmet una ona que es propaga cap al seu interior i és parcialment reflectida a les interfases en les quals existeix un contrast dielèctric. La resposta del material, constituïda per totes les ones reflectides, és registrada, processada i analitzada amb l'objectiu de caracteritzar i estudiar el medi pel qual es propaga.*

*A aquesta tesi s'analitza l'aplicació de la tècnica no destructiva del georadar per a la inspecció, diagnòstic i anàlisi resistent de la fusta estructural. La característica no destructiva d'aquesta tècnica fa que siga especialment adequada per a l'anàlisi de la fusta quan aquesta forma part d'una estructura.*

*La tesi es divideix en quatre parts. A la **primera** s'han introduït tots aquells aspectes necessaris per a la comprensió del fonament bàsic de la tècnica del georadar. De la mateixa manera es repassen les principals propietats físiques de la fusta estructural així com la normativa vigent al voltant del seu ús estructural. Tot seguit es detallen els assaigs realitzats per a calibrar el funcionament i comportament de l'antena utilitzada (freqüència central de 1.6 GHz) tant a l'aire com a la fusta.*

*A la **segona part** s'estudien mitjançant el georadar les principals propietats físiques de la fusta, en concret aquelles que afecten de manera determinant a la seua resistència mecànica. En primer lloc, s'estudia la anisotropia dielèctrica de la fusta i així es calibra la capacitat d'inspecció del georadar front les diferents direccions de la fibra. En segon lloc, s'analitza amb detall com afecta la variació del contingut d'humitat de la fusta a la radiació electromagnètica, ja que el contingut d'humitat és un dels factors principals que influeixen a la degradació o deteriorament d'una peça. En darrer lloc, s'avalua la capacitat de la tècnica per a diferenciar o caracteritzar fustes de diferents tipus a partir de l'anàlisi de la densitat. A l'estudi de cadascun d'aquests paràmetres, com es tracta de una aplicació nova, s'aborden tant aspectes metodològics com de qualitat i fiabilitat dels resultats obtinguts.*

*A la **tercera part** de la tesi, es fa una comparació dels resultats obtinguts amb el georadar a l'hora d'avaluar l'anisotropia dielèctrica, el contingut d'humitat i la densitat amb dues tècniques no destructives emergents en el camp d'estudi de la fusta estructural (el resistògraf i la tècnica d'ultrasons). Els resultats suggereixen que el georadar és una tècnica més fiable per a l'anàlisi proposat. No obstant això, una combinació de totes aquestes tècniques proporciona dades molt interessants per a avaluar l'estat de la fusta i poder fer-ne un diagnòstic*

*A la **quarta** i darrera part s'estableixen els criteris bàsics per a utilitzar la tècnica del georadar a la classificació resistent de la fusta nova. Actualment les línies d'investigació en aquest àmbit cerquen mètodes de classificació de la fusta no destructius i que aporten dades de variables associables amb els paràmetres resistents. En aquesta línia es realitza un estudi exhaustiu comparatiu de les diferents tècniques existents actualment i la classificació realitzada mitjançant el georadar a partir d'uns criteris inicials definits per primera vegada a aquesta tesi.*



## **ABSTRACT**

*Currently, Ground-penetrating radar technology, that uses electromagnetic radiation in the microwave spectrum, has many applications in several fields and it is a non-destructive testing method that allows the rapid prospecting of building structures. In fact, in the last years Ground-penetrating radar technique has gained remarkable popularity for the assessment of physical conditions and diagnose of building structures and materials, such as concrete or stone.*

*The general principle of prospecting with Ground-penetrating radar is based on the propagation of electromagnetic pulses. An antenna located on the material surface radiates energy downward into the material. This energy is partially reflected at interfaces where there is a dielectric contrast. The response of the material, consisting of all the reflected waves, is then recorded, processed and analyzed in order to characterize and/or study the material or medium by which they travel.*

*This thesis deals with the ability of the Ground-penetrating radar, as a non-destructive testing technique, to prospect, diagnose and analyze the strength of structural timber. The non-destructive nature of this technique makes it particularly suitable for prospecting timber on site when it is part of a structure.*

*The thesis is divided into four parts. The **first part** introduces all the necessary aspects for understanding the basis of Ground-penetrating radar technique. Likewise, the main physical properties of timber as well as the current standards for structural use are reviewed. After that, the tests undertaken to calibrate the performance and behaviour of the employed antenna (of 1.6 GHz central frequency) both in the air and on timber are described.*

*In the **second part**, the main physical properties of wood are prospected by means of Ground-penetrating radar. In particular, in this part of the thesis, these properties which decisively affect the mechanical strength of timber are analysed. Firstly, the dielectric anisotropy of wood is studied and thereby the aptitude of Ground-penetrating radar to reveal the dielectric anisotropy due to the different grain directions. Secondly, tests are conducted to assess how the electromagnetic radiation is affected by the moisture content variation of timber, since the moisture content is one of key factors influencing the degradation or deterioration of a piece. Finally, the ability of Ground-penetrating radar to distinguish different species of wood from the density analysis is tested. In the study of each of these properties, given the novelty of this application, both methodological aspects and quality and reliability of the results are thoroughly discussed.*

*In the **third part** of the thesis, the results, obtained from the Ground-penetrating radar study to evaluate the dielectric anisotropy, the moisture content and the density, are compared with those obtained with two emerging non-destructive techniques in the structural timber field of study (the resistograph and ultrasound technique). The results show that the Ground-penetrating radar is a more reliable technique for the thesis target. However, a combination of all of them might provide interesting data for evaluating the wood condition and for assessing a diagnosis.*

*In the **fourth** and last part, the basic criteria for using Ground-penetrating radar technique as a strength grading tool are established. Currently the research agenda is focussed on developing non destructive grading methods of timber and on providing records on variables that might be associated with strength parameters. Regarding this, a thoroughly study comparing the different techniques available currently and the grading defined by means of Ground-penetrating radar is performed. The defined criteria to carry out the Ground-penetrating grading are established for the very first time in this thesis.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Me gustaría hacer constar mi más profundo reconocimiento a todas aquellas personas que han colaborado directa o indirectamente en la elaboración de esta Tesis. Ante todo, quiero agradecer a mis directores Dr. D. Francisco García García y Dr. D. Rafael Capuz Lladró, por confiar en mi trabajo y su colaboración durante todo el proceso de elaboración de esta tesis doctoral.*

*Me gustaría también dar las gracias a la Dra. Dña. Rosa Martínez Sala, por su ayuda e interés durante el desarrollo de este trabajo. Su claridad de juicio y su perseverancia son un ejemplo, un referente para mí, y no sólo en su labor como investigadora y profesora, sino también en su calidad humana.*

*A Dr. D. Rafael Díez Barra del Laboratorio CIFOR (INIA) le estoy realmente agradecida por su interés en este trabajo, apoyo constante y palabras de ánimo en todo momento.*

*Esta tesis se inscribe dentro del proyecto “Integración de técnicas avanzadas no destructivas de evaluación de madera estructural” (BIA2008-00342) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y por tanto mi agradecimiento al investigador principal Dr. D. Javier Benlloch Marco por su interés en el desarrollo de este trabajo; así como a los compañeros del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación.*

*Otro modo de gratitud a mis compañeros de Forum UNESCO Universidad y Patrimonio y en especial a su director Dr. José Luis Montalvá Conesa por el apoyo prestado desde el inicio.*

*Por último y no por ello menos importante, me gustaría agradecer a mi madre, mis hermanas, mis tíos, mis primas y amigos por todo el apoyo y cariño mostrado a lo largo de todo este duro trabajo. Sin todos ellos hubiera sido muy*

*difícil hacer este camino... a todos vosotros muchas gracias por estar siempre a mi lado.*

## ÍNDICE

<b>Índice</b> .....	1
<b>Listado de figuras</b> .....	7
<b>Listado de tablas</b> .....	17

### Parte 1. Introducción

---

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	23
1.1.Objetivos.....	25
1.2.Situación actual del empleo de madera estructural en edificación.....	29
1.3.Técnicas semi-destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural.....	33
1.4.Técnicas no destructivas de inspección y diagnóstico de la madera estructural.....	37
1.5.Resumen del contenido de la tesis.....	43
<b>Capítulo 2. El georradar</b> .....	47
2.1.Fundamentos de la propagación electromagnética.....	51
2.1.1.Parámetros electromagnéticos de un medio.....	52
2.1.2.Velocidad de propagación, longitud de onda y atenuación.....	56
2.1.3.Parámetros efectivos.....	60
2.1.4.Reflexión y refracción.....	61
2.2.Características de la propagación de las ondas electromagnéticas en medios materiales.....	63
2.3.Instrumentación y métodos de adquisición de registros.....	67
2.3.1.Componentes del equipo de georradar.....	67
2.3.2.Métodos de adquisición de registros.....	74
2.4.Tratamiento de datos e interpretación de registros.....	75
2.4.1.Parámetros de un registro. Información en la cabecera de una traza.....	75
2.4.2.Registros de amplitudes.....	81
2.4.3.Obtención de los parámetros necesarios para la interpretación de radargramas.....	86

<b>Capítulo 3. Principales propiedades de la madera estructural.</b>	89
3.1. Estructura interna de la madera.....	91
3.2. Principales propiedades físicas de la madera.....	95
3.3. Determinación de la densidad.....	97
3.4. Determinación del contenido de humedad.....	99
3.5. Proceso de secado de la madera .....	101
3.6. Propiedades dieléctricas.....	105
3.6.1. Conductividad.....	105
3.6.2. Constante dieléctrica.....	106
3.6.3. Factor de pérdida.....	109
3.7. Propiedades mecánicas y normas de clasificación resistente de la madera.....	111

<b>Capítulo 4. Calibración del equipo y métodos de adquisición de registros</b> .....	115
4.1. Descripción del equipo de georradar empleado.....	119
4.2. Calibración de la antena empleada.....	123
4.2.1. Análisis del cero de la antena.....	123
4.2.2. Cálculo de la distancia mínima de no interferencia	127
4.2.3. Estudio de la atenuación de la propagación de las ondas.....	129
4.2.4. Zona de incidencia de radiación.....	131
4.2.5. Estudio de las pérdidas por efecto de contorno.....	134
4.2.6. Capacidad de resolución de la antena de 1.6 GHz..	137
4.3. Análisis del cambio de polaridad de las ondas al reflejarse en diferentes interfases.....	143
4.4. Descripción de la tipología de adquisición de registros.....	149

## **Parte 2. Análisis de las principales propiedades físicas de la madera mediante georradar**

---

<b>Capítulo 5. Anisotropía dieléctrica</b> .....	157
5.1. Comportamiento dieléctrico anisótropo de la madera.....	163
5.2. Descripción de las probetas.....	165
5.3. Anisotropía dieléctrica paralela versus perpendicular .....	169
5.3.1. Estudio del caso del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	171
5.3.2. Estudio del comportamiento sobre distintas	

especies.....	177
5.3.3.Síntesis de resultados.....	185
5.4.Anisotropía dieléctrica perpendicular en diferentes direcciones	189
5.4.1.Controversia con la resolución vertical.....	190
5.4.2.Estudio del caso del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	193
5.4.3.Estudio del comportamiento sobre distintas especies.....	198
5.4.4.Síntesis de resultados.....	204
<b>Capítulo 6. Estudio de la variación del contenido de humedad</b>	<b>207</b>
6.1.Efecto de la variación del contenido de humedad en las propiedades electromagnéticas del <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	211
6.1.1.Descripción de los ensayos.....	211
6.1.2.Análisis cualitativo de los registros.....	217
6.1.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	220
6.1.3.1.Tiempos de llegadas .....	220
6.1.3.2.Velocidades de propagación.....	223
6.1.3.3.Análisis de amplitudes.....	229
6.1.3.4.Análisis espectral.....	236
6.2.Efecto de la variación del contenido de humedad en las propiedades electromagnéticas de maderas de distinta densidad.....	239
6.2.1.Descripción de los ensayos.....	239
6.2.2.Análisis cualitativo de los registros.....	242
6.2.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	243
6.2.3.1.Velocidades de propagación.....	244
6.2.3.2.Análisis de amplitudes.....	245
6.2.3.3.Análisis espectral.....	246
6.3.Síntesis de resultados.....	249
<b>Capítulo 7. Caracterización electromagnética de la madera de diferente densidad</b>	<b>255</b>
7.1.Descripción de los ensayos.....	259
7.2.Análisis cualitativos de los registros.....	261
7.3.Análisis cuantitativo de los registros.....	263
7.3.1.Velocidades de propagación.....	263
7.3.2.Análisis de amplitudes.....	265
7.3.3.Análisis espectral.....	275
7.4. Síntesis de resultados.....	277

### **Parte 3. Evaluación de las principales propiedades físicas de la madera con el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos**

---

#### **Capítulo 8. Evaluación de las principales propiedades físicas de la madera con el resistógrafo y la técnica de ultrasonidos.**

<b>Comparación de resultados con el georradar.....</b>	<b>285</b>
8.1.El resistógrafo.....	287
8.2.La técnica de ultrasonidos.....	291
8.3.Análisis de la variación del contenido de humedad en viguetas de diferente densidad.....	297
8.4.Análisis de la variación del contenido de humedad en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	303
8.5.Análisis de la variación de la densidad.....	311
8.6.Comparación de los resultados obtenidos con el resistógrafo, la técnica de ultrasonidos y el georradar.....	315

### **Parte 4. El georradar y la calidad resistente de la madera**

---

#### **Capítulo 9. Primeros resultados de la aplicación del georradar a la clasificación resistente de viguetas de madera de *Pinus Radiata* D. Don.....**

9.1.Contexto normativo de la clasificación resistente de la madera estructural.....	323
9.1.1.Norma de clasificación visual de la madera aserrada de uso estructural.....	327
9.1.2.Clasificación no destructiva por métodos automáticos: clasificación mecánica por máquina.....	333
9.1.3.Clasificación resistente por la técnica de ultrasonidos.....	334
9.2.Descripción de los ensayos.....	335
9.3.Clasificación resistente de la madera por distintos métodos: ensayos a rotura, visual y por ultrasonidos.....	339
9.4.Clasificación resistente por la técnica del georradar.....	343
9.5.Comparación de la clasificación resistente por distintos métodos.....	349



9.6.Síntesis de resultados.....	353
<b>Capítulo 10. Conclusiones y líneas de investigación futuras....</b>	<b>357</b>
10.1.Conclusiones.....	361
10.1.1.Conclusiones sobre el estudio de las principales propiedades físicas de la madera mediante georradar.....	361
10.1.2.Conclusiones de la comparación con otras técnicas no destructivas en la evaluación de las principales propiedades físicas.....	366
10.1.3.Conclusiones del análisis de la calidad resistente de la madera por medio de georradar.....	367
10.2.Futuros trabajos y líneas de investigación.....	369
<b>Reseñas bibliográficas.....</b>	<b>375</b>
<b>Normas de referencia.....</b>	<b>393</b>
<b>Anexo A. Nomenclatura de las maderas empleadas según la norma UNE-EN 13556:2004.....</b>	<b>397</b>
<b>Anexo B. Tablas de codificación, densidad, contenido de humedad y clasificación resistente por diferentes métodos para el lote de viguetas de <i>Pinus Radiata</i> D. Don. ....</b>	<b>401</b>

TESIS DOCTORAL

Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera estructural

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.-</b> (a) Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de georradar; (b) Antena de 1.6 GHz emitiendo sobre madera; (c) Radargrama obtenido en una adquisición puntual de registros.....	69
<b>Figura 2.2.-</b> Cabecera de un registro obtenido con el georradar SIR10-H (GSSI), en el que se detallan los principales parámetros del registro: modelo de la antena (5100), frecuencia central de emisión según GSSI (1500 MHz), rango del registro (Range $R=5$ ns), posición de inicio de la señal (Position $P=-0.5$ ns), puntos por traza (samp/scan 512), función de ganancia (Range gain (dB), función de 4 puntos (0, 12, 20, 20).....	76
<b>Figura 2.3.-</b> (a) Ventana de dialogo del programa RADANT-NT para la selección de la escala de color para la visualización del radargrama; (b) Radargrama con escala de color 6 y <i>Xform</i> 1 de una vigueta sobre un trípode metálico; (c) Radargrama anterior al que se le superponen las trazas.....	84
<b>Figura 2.4.-</b> Radargrama registrado con la antena de 1.6 GHz de frecuencia central al desplazar la antena por una vigueta apoyada sobre un trípode metálico representado con la tabla de color 11 y la función <i>Xform</i> 11 (a) y con la tabla de color 4 y la función <i>Xform</i> 11(b).....	85
<b>Figura 2.5.-</b> (a) Radargrama de adquisición estática sobre vigueta de madera visualizado con dos tablas de color diferentes; (b) Tablas de color de los radargramas; (c) Traza característica del radargrama en el que se indican los tiempos dobles de propagación; (d) Cálculo de la velocidad de propagación y de la permitividad dieléctrica efectiva.....	87
<b>Figura 3.1.-</b> Sección de un árbol en la que se aprecia su estructura macroscópica: la corteza, el cambium, el líber, la albura, el duramen y la médula.....	92
<b>Figura 3.2.-</b> Principales direcciones de estudio respecto a la fibra en la madera estructural: eje longitudinal ( <i>L</i> ) que es paralelo a la fibra; el eje radial ( <i>R</i> ) perpendicular a la dirección de la fibra en la dirección normal al crecimiento de los anillos; el eje tangencial ( <i>T</i> ) perpendicular a la dirección a la fibra y tangente a los anillos de crecimiento.....	95

<b>Figura 4.1.-</b> Componentes del equipo de georradar modelo SIR-10H de GSSI: (a) unidad de control; (b) dispositivo de visualización; (c) antena de 1.6GHz de frecuencia central; (d) detalle de la unidad central.....	119
<b>Figura 4.2.-</b> Espectro de frecuencia de la emisión al aire de la antena modelo 5100 (GSSI) de frecuencia central 1.6 GHz.....	120
<b>Figura 4.3.-</b> (a) Localización del emisor y receptor en la antena de 1.6 GHz de frecuencia central de GSSI y (b) sus dimensiones.....	122
<b>Figura 4.4.-</b> Esquema de una traza donde se indican los tiempos medidos como cero de la antena: (a) primera ruptura de tendencia; (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo.....	124
<b>Figura 4.5.-</b> Criterio establecido de la lectura de tiempos de llegada de la onda directa ( $D$ ) y de la onda reflejada ( $R$ ). En ambos casos se toma la lectura en el primer máximo positivo de la fase.....	126
<b>Figura 4.6.-</b> Pulso de la antena de 1.6 GHz (GSSI) con una duración de $T_0=2.23$ ns al realizar una emisión al aire.....	127
<b>Figura 4.7.-</b> Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de separación entre la antena y la placa metálica: (a) distancias de separación desde 10 cm hasta 1 m; (b) distancias de separación desde 10 cm hasta 40 cm.....	128
<b>Figura 4.8.-</b> (a) Trazas de los radargramas colocando la antena a diferentes distancias de la placa metálica $x=[0.10-1$ m]; (b) Función de ajuste de la atenuación de las ondas al propagarse por el aire.....	130
<b>Figura 4.9.-</b> Esquema del área iluminada por la antena, cuyo radio es $ra$ , a una distancia $x$ del medio reflector de constante dieléctrica $\epsilon_2$ .....	132
<b>Figura 4.10.-</b> Amplitudes registradas en las tres placas metálicas de diferente tamaño a diferentes distancias de separación ( $x=[0.20-1$ m].....	137
<b>Figura 4.11.-</b> Posiciones de la antena en la adquisición de registros: (a) adquisición en la que las ondas recorren la cara y (b) el canto.....	146

<b>Figura 4.12.-</b> Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de <i>Pinus nigra Arn, var. Salzmannii</i> al apoyar la antena sobre el canto con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b)...	147
<b>Figura 4.13.-</b> Cambio de fase de la onda reflejada en la base de una muestra de <i>Pinus nigra Arn, var. Salzmannii</i> al apoyar la antena sobre la cara con un reflector metálico bajo la muestra (a) y sin el reflector (b).....	148
<b>Figura 4.14.-</b> Diagrama de tipos de adquisiciones de registros estáticas o dinámicas con una antena direccional monoestática con o sin reflector metálico bajo la muestra.....	149
<b>Figura 4.15.-</b> Esquema de la secciones de una vigueta: Longitud ( <i>L</i> ), cara ( <i>Cr</i> ) y canto ( <i>Ct</i> ).....	151
<b>Figura 4.16.-</b> Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de registro: (a) antena sobre canto; (b) sobre testa; (c) sobre la cara orientada paralela a la dirección de las fibras y (d) orientada perpendicular a la dirección de las fibras.....	152
<b>Figura 5.1.-</b> Polarización del campo eléctrico paralela (a) y perpendicular (b). Polarización perpendicular del campo eléctrico que oscila perpendicular a las fibras (c) y paralela a las mismas (d).....	161
<b>Figura 5.2.-</b> Secciones en testa de 22 probetas de 20 x 7.5 x 20 cm <i>Pinus pinaster Ait</i> .....	166
<b>Figura 5.3.-</b> Secciones en testa de las distintas especies de diferente densidad.....	167
<b>Figura 5.4.-</b> Posiciones de la antena apoyada sobre la cara en direcciones ortogonales del campo eléctrico respecto a las fibras.....	170
<b>Figura 5.5.-</b> (a) Trayectoria de onda directa ( <i>D</i> ) y onda reflejada ( <i>R</i> ); (b) Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro <i>Cara_PerpendicularF</i> (línea azul) y <i>Cara_ParalelaF</i> (línea gris).....	172
<b>Figura 5.6.-</b> Velocidades de propagación de las ondas (a) y constantes dieléctricas (b) de las 22 muestras de <i>Pinus pinaster Ait</i> . En ambos casos	

se representa con un punto gris cuando el campo eléctrico es paralelo a las fibras (dispositivo *Cara\_PerpendicularF*) y verde cuando es perpendicular (*dispositivo Cara\_ParalelaF*)..... 173

**Figura 5.7.-** Amplitudes normalizadas de las ondas directas ( $A_D$ ) y reflejadas ( $A_R$ ) en direcciones paralela ( $L$ ) y perpendicular ( $T$ ) de las muestras de *Pinus pinaster* Ait..... 174

**Figura 5.8.-** Espectro de frecuencia cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de las muestras 3, 6 ,11 de *Pinus pinaster* Ait..... 176

**Figura 5.9.-** Comparación de las trazas típicas con el dispositivo de registro *Cara\_PerpendicularF* (línea gris) y *Cara\_ParalelaF* (línea negra) de la muestra 14 (a) y de la muestra 2(b)..... 178

**Figura 5.10.-** (a) Velocidades de propagación de las ondas y (b) constante dieléctrica con el dispositivo *Cara\_PerpendicularF* (punto gris) y *Cara\_ParalelaF* (punto verde)..... 179

**Figura 5.11.-** Amplitudes normalizadas de las ondas directas ( $A_D$ ) y reflejadas ( $A_R$ ) cuando el campo es paralelo ( $L$ ) y perpendicular ( $T$ ) frente a las fibras de 20 especies diferentes..... 181

**Figura 5.12.-** Espectro de frecuencia de las señales cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular a las fibras de la muestra 1(a), de la 6 (b) y de la 15 (c) del lote de maderas de diferentes densidades..... 184

**Figura 5.13.-** Dispositivos de registro *Canto* (a) y *Testa* (b)..... 190

**Figura 5.14.-** Comparación de trazas con el dispositivo *Testa* en muestras de diferente longitud del *Pinus pinaster* Ait.: (a) 7.5 cm; (b) 11 cm; (c) 20 cm..... 192

**Figura 5.15.-** Trazas características del *Pinus pinaster* Ait. registradas con el dispositivo *Canto* en la muestra 16 (a) y con el dispositivo *Testa* en la muestra 19 (b)..... 193

**Figura 5.16.-** Amplitudes normalizadas del las ondas directas ( $A_D$ ) y

reflejadas ( $A_R$ ) con el dispositivo de registro <i>Canto</i> ( <i>C</i> ) y <i>Testa</i> ( <i>T</i> ) de las muestras de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	195
<b>Figura 5.17.-</b> Espectros de frecuencia de las señales con dispositivo <i>Canto</i> y con el dispositivo <i>Testa</i> de la muestra 16 (a) y de la muestra 19 (b) del lote de maderas de diferentes densidades.....	197
<b>Figura 5.18.-</b> Trazas características con el dispositivo de registro <i>Canto</i> (a) y <i>Testa</i> (b) en la muestra 3 del lote de maderas de diferentes especies.....	199
<b>Figura 5.19.-</b> (a) Amplitudes normalizadas de las ondas directas ( $A_D$ ) y (b) reflejadas medidas en el primer máximo positivo ( $A_{R1}$ ) y en el segundo máximo positivo ( $A_{R2}$ ) con los dispositivos de registro <i>Canto</i> ( <i>C</i> ) y <i>Testa</i> ( <i>T</i> ) de 20 especies diferentes.....	201
<b>Figura 5.20.-</b> Espectros de frecuencia con el dispositivo <i>Canto</i> y <i>Testa</i> de la muestra 11(a) y de la 19 (b).....	203
<b>Figura 6.1.-</b> Densidad promedio de las 22 viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. a lo largo del proceso de secado.....	212
<b>Figura 6.2.-</b> Contenido de humedad de cada vigueta de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en cada una de las 13 sesiones de registro con georradar.....	213
<b>Figura 6.3.-</b> Dispositivos de registro: (a) <i>Canto</i> , (b) <i>Testa</i> y (c) <i>Cara_ParalelaF</i> .....	215
<b>Figura 6.4.-</b> (a) Señal típica registrada con el dispositivo <i>Canto</i> y (b) con el <i>Cara_ParalelaF</i> en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	216
<b>Figura 6.5.-</b> Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> como consecuencia de la variación del <i>CH</i> : (a) Radargrama obtenido tras la sesión S1 ( <i>CH</i> =115%); (b) la sesión S7 ( <i>CH</i> =31%) y (c) la sesión S12 ( <i>CH</i> =14%).....	218
<b>Figura 6.6.-</b> Trazas correspondientes a dos momentos de medición con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> con 20 días de diferencia (línea gris <i>CH</i> =70% y línea azul <i>CH</i> =25%).....	219

<b>Figura 6.7.-</b> Tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el dispositivo de registro <i>Testa</i> en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait..	221
<b>Figura 6.8.-</b> Ajuste de tiempos de llegada promedio de la sesión de la onda directa con el $CH_{promedio}$ de la sesión con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	222
<b>Figura 6.9.-</b> Efecto del proceso de secado en las velocidades de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> .....	227
<b>Figura 6.10.-</b> Efecto de la variación del $CH$ en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	229
<b>Figura 6.11.-</b> (a) Ajuste de amplitudes normalizadas <i>peak to peak</i> de la onda reflejada con el dispositivo <i>Canto</i> con el $CH$ ; (b) Ajuste de amplitudes normalizadas del primer máximo positivo de la onda reflejada con el dispositivo <i>Canto</i> con el $CH$ .....	231
<b>Figura 6.12.-</b> Amplitud normalizada de la onda directa versus $CH$ con el dispositivo <i>Canto</i> (a), <i>Cara_ParalelaF</i> (b) y <i>Testa</i> (c) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	233
<b>Figura 6.13.-</b> Amplitudes normalizadas de la onda reflejada versus $CH$ con el dispositivo <i>Canto</i> (a) y <i>Cara_ParalelaF</i> (b) en las viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	234
<b>Figura 6.14.-</b> (a) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 2 de <i>Pinus pinaster</i> Ait. con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> en diferentes sesiones de registro; (b) Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 1 de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. con el dispositivo <i>Canto</i> en diferentes sesiones de registro.....	238
<b>Figura 6.15.-</b> (a) Variación de la densidad para diferentes $CH$ y especies de madera; (b) variación del $CH$ para madera de diferente densidad.....	241
<b>Figura 6.16.-</b> Variación de los tiempos de propagación de la onda reflejada con el dispositivo de registro <i>Canto</i> de la vigueta 2 como consecuencia de la variación del $CH$ : (a) Radargrama obtenido tras el secado ( $CH_{SECA}=1\%$ ) y (b) tras la primera humidificación ( $CH_{SEMI}=37\%$ )	243



<b>Figura 6.17.-</b> Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de viguetas de diferentes densidades con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> .....	245
<b>Figura 6.18.-</b> Amplitudes normalizadas de la onda reflejada en viguetas de diferente densidad en los distintos estados de <i>CH</i> de maderas de diferentes especies con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> .....	246
<b>Figura 6.19.-</b> Espectro de frecuencia de la traza característica de la vigueta 13 (a) y de la 11 (b) al apoyar con el dispositivo de registro <i>Cara_ParalelaF</i> para diferentes <i>CH</i> del lote de maderas de distintas especies con diferentes contenidos de humedad.....	247
<b>Figura 7.1.-</b> Variación de los tiempos de propagación con el dispositivo de registro <i>Cara_PerpendicularF</i> en viguetas de diferente densidad: (a) Radargrama en la vigueta 4 ( $\rho= 0.75 \text{ g/cm}^3$ ) y (b) en la vigueta 18 ( $\rho= 0.52 \text{ g/cm}^3$ ).....	262
<b>Figura 7.2.-</b> Efecto de la diferencia de densidad en la velocidad de propagación (a) y en la constante dieléctrica (b) con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i> .....	265
<b>Figura 7.3.-</b> Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda directa con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i> .....	267
<b>Figura 7.4.-</b> Traza característica al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i> .....	267
<b>Figura 7.5.-</b> Traza característica del radargrama de la vigueta 2 representada por la línea gris y la vigueta 18 representada por la línea azul al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i> .....	269
<b>Figura 7.6.-</b> Traza característica del radargrama de la vigueta 1 ( $\rho= 0.90 \text{ g/cm}^3$ ) representada por la línea azul y la vigueta 19 ( $\rho= 0.50 \text{ g/cm}^3$ ) representada por la línea gris al adquirir los registros situando la antena a 35 cm de distancia de las viguetas.....	270
<b>Figura 7.7.-</b> Ajuste de amplitudes normalizadas de la onda reflejada al colocar al antena a 35 cm de separación de la vigueta del lote de viguetas	

de diferente densidad cuya huella esté cubierta como mínimo por un 35% de madera.....	274
<b>Figura 7.8.-</b> (a) Espectros de frecuencia de las viguetas 4, 14 y 20 con el dispositivo de adquisición de datos <i>Cara_PerpendicularF</i> ; (b) Espectros de frecuencia de las viguetas 1, 8 y 14 colocando la antena a 35 cm de la vigueta.....	276
<b>Figura 8.1.-</b> Componentes del resistógrafo: (a) Instrumento de perforación; (b) aguja perforadora; (c) cable conexión a la unidad electrónica; (d) unidad electrónica de registro.....	288
<b>Figura 8.2.-</b> (a) Perforación de una pieza; (b) Sección en testa de una muestra de <i>Pinus pinaster</i> Ait., donde se aprecian los anillos de crecimiento en el que se superpone el resistograma obtenido.....	289
<b>Figura 8.3.-</b> Esquema dispositivos de registro con ultrasonidos en el estudio de la madera de forma longitudinal a las fibras: (a) Transmisión directa; (b) transmisión indirecta paralela; (c) transmisión indirecta cruzada.....	294
<b>Figura 8.4.-</b> (a) Equipo Sylvatest DUO de ultrasonidos: (a) palpadores; (b) unidad de control; (c) sistema de almacenamiento de registros.....	296
<b>Figura 8.5.-</b> (a) Perforación en cara en la dirección radial a las fibras; (b) Perforación en canto la dirección tangencial a las fibras; (c) Resistogramas de la vigueta 6 al atravesar el canto y la cara.....	299
<b>Figura 8.6.-</b> (a) Perforaciones realizadas en el canto de la vigueta 6 cada 15 cm; (b) Efecto de la variación del <i>CH</i> en las amplitudes promedio por vigueta del resistógrafo ( $AR_{mv}$ ) en viguetas de diferente densidad.....	300
<b>Figura 8.7.-</b> (a) Medición por transmisión directa en la dirección longitudinal con el equipo de ultrasonidos Sylvatest; (b) detalles de los palpadores en los que se aprecia su punta cónica.....	301
<b>Figura 8.8.-</b> Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de ultrasonidos en viguetas de diferente densidad.....	302
<b>Figura 8.9.-</b> (a) Resistogramas en el punto central de la vigueta 1 en la sesión S8 y en la sesión S13; (b) Ajuste entre la variación del <i>CH</i> y la	

<i>AR<sub>mv</sub></i> del <i>Pinus pinaster</i> Ait .....	305
<b>Figura 8.10.-</b> Contenido de humedad de cada vigueta de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. en cada una de las sesiones de registro con ultrasonidos.....	306
<b>Figura 8.11.-</b> (a) Variación de la velocidad de propagación media por sesión de los ultrasonidos y (b) variación del módulo de elasticidad dinámico en las distintas sesiones de medición para el <i>Pinus pinaster</i> Ait.....	307
<b>Figura 8.12.-</b> (a) Efecto de la variación del <i>CH</i> en la velocidad de propagación de los ultrasonidos y (b) en el módulo de elasticidad dinámico en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait .....	309
<b>Figura 8.13.-</b> Ajuste entre la densidad ( $\rho$ ) de las viguetas con (a) la amplitud del resistógrafo media de vigueta ( <i>AR<sub>mv</sub></i> ), (b) con las velocidades de propagación de los ultrasonidos ( $v_p$ ) y (c) con el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ).....	312
<b>Figura 9.1.-</b> Principales singularidades de la madera que afectan a su resistencia. (a-f) Nudos en diferentes posiciones en la vigueta y con diferentes grados de adherencia; (g) fenda; (h) bolsa de resina; (i) azulado y hongo blanco.....	330
<b>Figura 9.2.-</b> Máquina clasificadora mecánica Cook-Bolinder (Laboratorio de estructuras de maderas CIFOR - INIA).....	334
<b>Figura 9.3.-</b> Toma de lectura del <i>CH</i> con el higrómetro de puntos en el lote de 100 viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don.....	336
<b>Figura 9.4.-</b> Viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. Don. clasificadas por la norma UNE 56544:2007. En la imagen se muestran las viguetas <i>R4136</i> , <i>R4135</i> , <i>R4134</i> , <i>R4133</i> en las que se marca el resultado de la clasificación: Rechazo ( <i>R</i> ).....	337
<b>Figura 9.5.-</b> Equipo de georradar SIR-3000 (GSSI) en el que se encuentra integrado el sistema de visualización con la unidad de control conectado a una antena de 1.6 GHz de frecuencia central.....	337
<b>Figura 9.6.-</b> Adquisición de registros con la antena de frecuencia central de	

1.6 GHz (GSSI) en el Laboratorio de Estructuras de Madera de CIFOR-INIA (Madrid, España)..... 338

**Figura 9.7.-** Sección de un radargrama de una vigueta de *Pinus radiata* D. Don. apoyada en un extremo en una base de madera (a) y la superposición de las trazas características con y sin la base de madera (b); criterio de toma de lecturas de tiempos de llegada de la onda directa y reflejada (c)..... 344

**Figura 9.8.-** Radargrama obtenido al desplazar la antena a lo largo de la cara de la vigueta de *Pinus radiata* D. Don. *R4143* perteneciente al grupo *GI* (a) y de las viguetas *R4138* y *R4193* pertenecientes al grupo *G-R*..... 347

**Figura 9.9.-** Relación entre velocidades de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas con el módulo de resistencia a flexión. Las vigas de la clasificación por medio de georradar pertenecientes al grupo *GI* se representan con un punto gris y las del grupo *G-R* con uno verde..... 352

**Figura 9.10.-** Radargramas de las viguetas *R4118* y *R4103* clasificadas dentro del grupo *G-R* mediante georradar..... 354

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.-</b> Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío.....	72
<b>Tabla 3.1.-</b> Valores de humedad y resistividad aproximados de la madera (Vignote y Martínez, 2006).....	106
<b>Tabla 3.2.-</b> Clases resistentes y valores característicos correspondientes según la norma UNE-EN 338:2003 para las coníferas y el chopo.....	113
<b>Tabla 4.1.-</b> Diferencias de tiempos teóricos $\Delta t_{(teórico)}$ y medidos $\Delta t_{(medido)}$ al propagarse la onda por el aire emitida con la antena de 1.6 GHz.....	125
<b>Tabla 4.2.-</b> Superficie que cubre la huella a diferentes distancias, según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).....	133
<b>Tabla 4.3.-</b> Dimensiones de las placas metálicas 1, 2 y 3 para el estudio de las pérdidas por efecto de contorno.....	135
<b>Tabla 4.4.-</b> Porcentaje de la huella de la antena que queda fuera de cada una de las placas metálicas empleadas en el estudio de las pérdidas por efecto de contorno calculadas según la 1ª zona de Fresnel y según Conyers y Goodman (1997).....	136
<b>Tabla 4.5.-</b> Constantes dieléctricas, velocidades de propagación y resolución vertical máxima y mínima para diferentes medios con la antena de 1.6 GHz (GSSI).....	139
<b>Tabla 4.6.-</b> Velocidades de propagación y constante dieléctrica del hormigón a los 90 días de fabricación en probetas de diferentes tamaños..	140
<b>Tabla 4.7.-</b> Cambios de fase en las reflexiones en las interfases de diferentes medios: aire-reflector metálico, aire-madera, madera-aire y madera-reflector metálico.....	145
<b>Tabla 4.8.-</b> Posiciones de la antena y nomenclatura del dispositivo de registro.....	151

<b>Tabla 5.1.-</b> Dimensiones, densidades y contenidos de humedad del lote de maderas de diferentes especies.....	168
<b>Tabla 5.2.-</b> Velocidades y constantes de las 20 especies distintas obtenidas con los dispositivos de registro <i>Cara_PerpendicularF (L)</i> y <i>Cara_ParalelaF(T)</i> .....	180
<b>Tabla 5.3.-</b> Relación de amplitudes normalizadas cuando el campo es paralelo o perpendicular de las ondas directas y reflejadas de 20 especies distintas.....	182
<b>Tabla 5.4.-</b> Amplitudes normalizadas promedio y desviación típica de las muestras de <i>Pinus pinaster</i> Ait. con el dispositivo de registro <i>Canto</i> y <i>Testa</i> .....	196
<b>Tabla 5.5.-</b> Velocidades de propagación y constante dieléctrica promedio de las 20 especies con el dispositivo de registro <i>Canto</i> y <i>Testa</i> .....	200
<b>Tabla 5.6.-</b> Amplitudes de la onda directa, del primer y segundo máximo positivo de la onda reflejada normalizadas con el dispositivo de registro <i>Canto (C)</i> y <i>Testa (T)</i> .....	202
<b>Tabla 6.1.-</b> Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en cada sesión.....	214
<b>Tabla 6.2.-</b> Parámetros de los ajustes del <i>CH</i> con los tiempos de llegada de la onda directa. Función exponencial de ajuste: $CH(\%) = \exp^{(a-bt)}$ .....	222
<b>Tabla 6.3.-</b> Resumen de ajustes entre amplitudes normalizadas en cada sección versus el <i>CH</i> registradas con distintos dispositivos.....	236
<b>Tabla 6.4.-</b> Dimensiones, densidades y <i>CH</i> iniciales de las viguetas de madera de diferentes especies.....	240
<b>Tabla 7.1.-</b> Dimensiones, densidades y contenido de humedad del lote de viguetas de diferente densidad.....	260

<b>Tabla 7.2.-</b> Ajustes de la densidad con las velocidades de propagación y constantes dieléctricas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.	264
<b>Tabla 7.3.-</b> Ajustes de la densidad con las amplitudes normalizadas de las ondas directas para los 4 dispositivos de adquisición de registros.....	266
<b>Tabla 7.4.-</b> Amplitudes normalizadas de los máximos en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros con el dispositivo <i>Cara_PerpendicularF</i> .....	268
<b>Tabla 7.5.-</b> Amplitudes de la onda directa, reflejada y reflejada normalizada en las maderas de diferente densidad al adquirir los registros colocando la antena a 35 cm de separación de la vigueta.....	271
<b>Tabla 7.6.-</b> Porcentaje de área de la vigueta que queda incluida en la huella de la antena a 35 cm de separación.....	273
<b>Tabla 8.1.-</b> Variación del <i>CH</i> (%) del lote de maderas de diferente densidad.....	298
<b>Tabla 8.2.-</b> Módulos de elasticidad dinámicos ( $E_d$ ) y velocidades longitudinales de propagación de ultrasonidos ( $v_p$ ) en diferentes estados de <i>CH</i> para maderas de distinta densidad.....	301
<b>Tabla 8.3.-</b> Contenido de humedad (%) promedio, máximo y mínimo de las 22 viguetas de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. en cada sesión con el resistógrafo.	304
<b>Tabla 8.4.-</b> Módulo de elasticidad dinámico promedio por sesión ( $E_{d\_medio}$ ) en MPa y desviación ( $\sigma$ ) del promedio en cada sesión en MPa. ....	308
<b>Tabla 8.5.-</b> Comparación de ajustes y correlaciones al estudiar el efecto que produce la variación del <i>CH</i> en viguetas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar....	317
<b>Tabla 8.6.-</b> Comparación de ajuste realizados y correlaciones obtenidas al estudiar el efecto que produce la variación de la densidad en 20 viguetas en los registros del resistógrafo, de la técnica de ultrasonidos y del georradar.....	318

<b>Tabla 9.1.-</b> Ejemplo de correspondencia de clases resistentes (UNE-EN 338:2003) y calidades visuales (UNE 56544:2007) de las maderas de procedencia españolas dadas en UNE-EN 1912:2005+A2:2008.....	332
<b>Tabla 9.2.-</b> Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don diferenciado entre el grupo de viguetas que cumplen con la clase <i>C18</i> de la norma UNE-EN 338:2003 y las que no la cumplen ( <i>R</i> ).....	340
<b>Tabla 9.3.-</b> Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>ME-1 + ME-2</i> y <i>R</i> según la norma UNE 56544:2007.....	341
<b>Tabla 9.4.-</b> Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>US-C18</i> y <i>US-R</i> a partir de la velocidad de corte.....	343
<b>Tabla 9.5.-</b> Propiedades mecánicas del lote de <i>Pinus radiata</i> D. clasificado en los grupos <i>G1</i> y <i>G-R</i> por medio de georradar a partir de la identificación de singularidades en el interior de la vigueta.....	348
<b>Tabla 9.6.-</b> Comparación de clases resistentes asignadas según la norma UNE-EN 338:2003 al lote de viguetas de <i>Pinus radiata</i> D. a partir de diferentes procedimientos de clasificación: visual, ultrasonidos y georradar.....	349
<b>Tabla 9.7.-</b> Porcentajes de las viguetas que son de clase <i>C18</i> de cada uno de los grupos obtenidos y el error que se comete por los diferentes métodos de clasificación aplicados: visual, ultrasonidos y georradar.....	350
<b>Tabla A.1.-</b> Nomenclatura de las distintas especies de madera empleadas a lo largo de la tesis según la norma UNE-EN 13556:2004.....	399
<b>Tabla B.1.-</b> Código, dimensiones y parámetros registrados durante los ensayos de flexión a rotura y con la técnica de ultrasonidos del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don .....	404
<b>Tabla B.2.-</b> Grupo de clasificación resistente al que pertenece cada vigueta del lote de <i>Pinus radiata</i> D. Don según los distintos métodos.....	407