

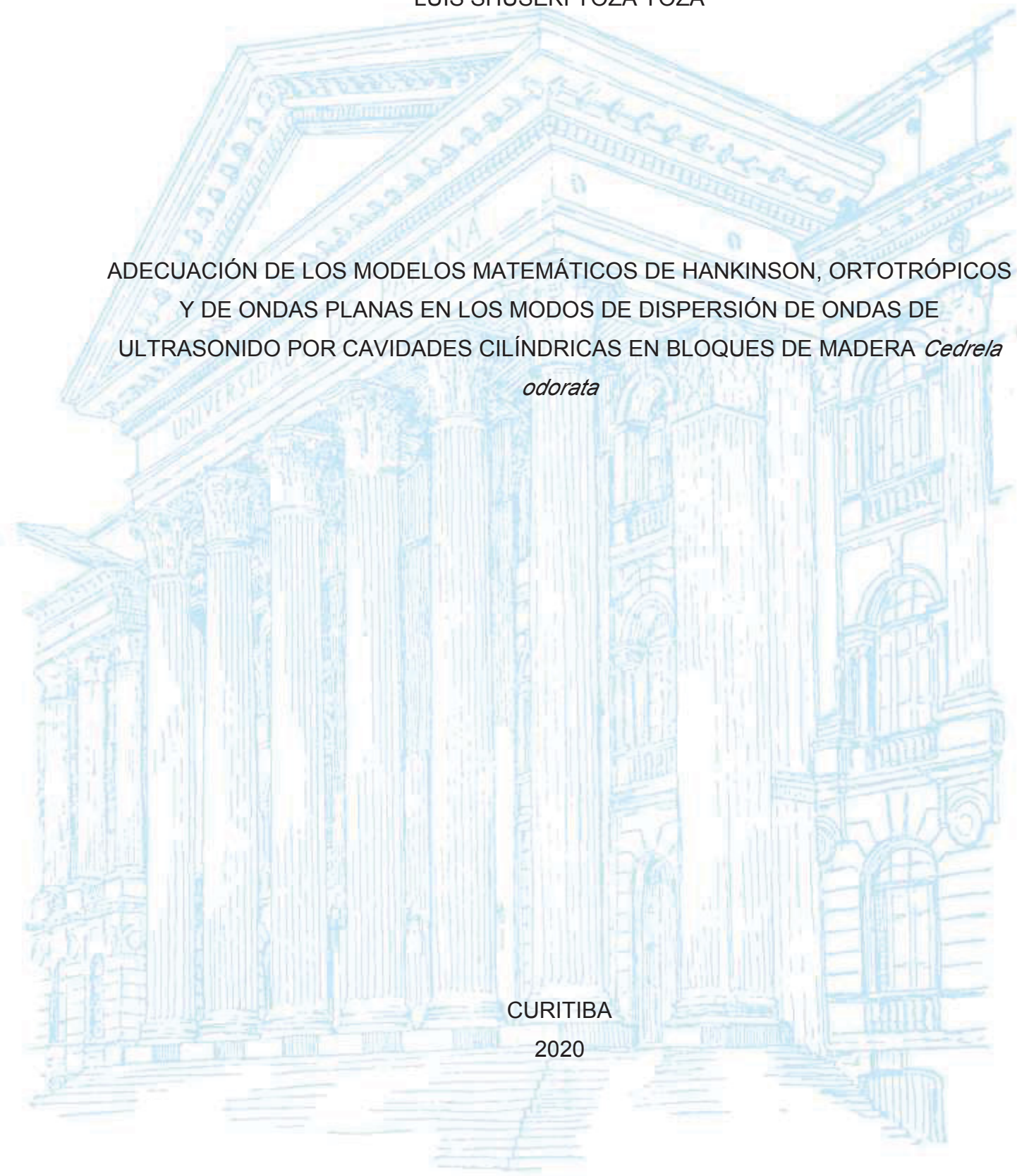
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIS SHUSEKI YOZA YOZA

ADECUACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE HANKINSON, ORTOTRÓPICOS
Y DE ONDAS PLANAS EN LOS MODOS DE DISPERSIÓN DE ONDAS DE
ULTRASONIDO POR CAVIDADES CILÍNDRICAS EN BLOQUES DE MADERA *Cedrela*
odorata

CURITIBA

2020



LUIS SHUSEKI YOZA YOZA

ADECUACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE HANKINSON, ORTOTRÓPICOS
Y DE ONDA PLANA EN LOS MODOS DE DISPERSIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO
POR CAVIDADES CILÍNDRICAS EN BLOQUES DE MADERA *Cedrela odorata*

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais. Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Jorge Luis Monteiro de Matos
Co-orientador: Marcio Pereira da Rocha
Co-orientador: Ivan Venson

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Yoza Yoza, Luis Shuseki

Ación de los modelos matemáticos de Hankinson, ortotrópicos y de ondas planas en los modos de dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas en bloques de madera *Cedrela odorata* / Luis Shuseki Yoza Yoza. - Curitiba, 2020.

128 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

Coorientadores: Prof. Dr. Marcio Pereira da Rocha; Ivan Venson

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 30/10/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Madeira - Doenças e pragas - Peru. 2. Madeira - Doenças e pragas - Controle. 3. Insetos. 4. Ondas ultrassônicas. 5. Modelos matemáticos. 6. Teses. I. Matos, Jorge Luis Monteiro de. II. Rocha, Marcio Pereira da. III. Venson, Ivan. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.453(85)



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LUIS SHUSEKI YOZA YOZA** intitulada: **ADECUACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE HANKINSON, ORTOTRÓPICOS Y DE ONDA PLANA EN LOS MODOS DE DISPERSIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO POR CAVIDADES CILÍNDRICAS EN BLOQUES DE MADERA *Cedrela odorata***, sob orientação do Prof. Dr. JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica

02/11/2020 21:27:18.0

JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/11/2020 10:24:22.0

TIAGO KROETZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ - CAMPUS PATO BRANCO)

Assinatura Eletrônica

03/11/2020 11:21:25.0

DILE PONTAROLO STREMEL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/11/2020 08:37:12.0

THIAGO CORRÊA DE FREITAS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/11/2020 09:55:55.0

LUCIELI ROSSI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

A mis padres y hermanos

AGRADECIMIENTO

INSTITUCIONES:

Ministerio de Educación del Perú. (MINEDU)

Rector y Vicerrectora de Investigación de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

A todos los profesores de la Universidade Federal do Paraná, Curso de Engenharia Florestal, y de la Facultad de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria de la Molina Lima Perú.

RESUMO

No Peru, a avaliação de elementos estruturais de madeira em monumentos históricos é muito difícil devido à necessidade de conservá-los para que a intervenção neles seja mínima, tendo-se estabelecido políticas de conservação muito rígidas; A utilização de técnicas não destrutivas assume grande relevância, principalmente a das técnicas de ultrassom. O presente trabalho busca encontrar a adaptação mais próxima dos modelos matemáticos ortotrópicos e de ondas planas de Hankinson aos modos de dispersão de ondas de ultrassom por cavidades cilíndricas em blocos de madeira de *Cedrela odorata* para substituir as espécies de *Entandrophragma* sp usadas em edifícios antigos no Peru. Primeiramente, os testes foram realizados em equipamento de ultrassom de 23 kHz e os resultados foram comparados com o modelo de Hankinson com bons resultados. Em segundo lugar, usando ondas de ultrassom de 1 MHz em um modelo ortotrópico de madeira, os coeficientes elásticos das espécies estudadas foram determinados e modelos de propagação foram construídos para blocos com simetria longitudinal radial (LR) e simetria longitudinal tangencial (LT), o que permitiu que essas estruturas fossem claramente diferenciadas. Finalmente, usando as equações diferenciais de dispersão de ondas planas de ultrassom de 23 kHz em meio isotrópico, as dispersões foram calculadas numericamente para condições de campo próximo. Modelos de dispersão de ondas acústicas para cavidades de diferentes diâmetros foram obtidos, buscando simular o ataque de xilófagos, e os lóbulos de dispersão foram calculados para cada diâmetro com bons resultados; entretanto, as dispersões com simetrias LR e LT dos blocos usados não puderam ser claramente diferenciadas.

Palavras-chaves: Propagação de ondas P e T. Cavidades, Dispersão de ondas. Quase velocidade. Lóbulos de emissão. Cupins

ABSTRACT

In Peru, the evaluation of wooden structural elements in historical monuments is very difficult due to the need to conserve them so that the intervention in them is minimal, having established very strict conservation policies; Therefore, the use of non-destructive techniques is highly relevant, especially ultrasound techniques. The present work seeks to find the adequacy of Hankinson's mathematical, orthotropic and plane wave models in the modes of dispersion of ultrasound waves by cylindrical cavities in *Cedrela odorata* wood blocks to replace the species *Entandrophragma sp* used in ancient buildings in Peru. First, tests were carried out using 23 kHz ultrasound equipment and the results were compared with the Hankinson model with good results. Next, using 1MHz ultrasound waves in an orthotropic model of the wood, the elastic coefficients of the studied species were determined and propagation models were constructed for blocks with both radial longitudinal symmetry (LR) and tangential longitudinal symmetry (LT), which allowed these structures to be clearly differentiated. Finally, using the differential equations of 23 kHz plane ultrasound wave dispersion in isotropic media, the dispersions were calculated numerically for near field conditions. Obtaining models of dispersion of acoustic waves by cavities of different diameters, simulating the attacks of xylophages, then calculating the dispersion lobes for each diameter with good results; however, this did not allow to clearly differentiate the dispersions with LR and LT symmetries of the used blocks.

Key words: Waves polarization P and T. Cavities. Dispersion. Radiation lobes. Termites.

RESUMEN

En el Perú, la evaluación de elementos estructurales de madera, en los monumentos históricos, es muy difícil debido a la necesidad de conservarlos de forma que la intervención en ellos sea mínima, habiéndose establecido políticas de conservación muy estrictas; la de uso de técnicas no destructivas, toma una gran relevancia, en especial, la de técnicas de ultrasonido. El presente trabajo, busca encontrar la adecuación más cercana de los modelos matemáticos de Hankinson, ortotrópicos y de ondas planas, a los modos de dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas en bloques de madera *Cedrela odorata* en sustitución de la especie *Entandrophragma sp* usada en las edificaciones antiguas en el Perú. Primero, se efectuaron ensayos usando un equipo de ultrasonido de 23 kHz y se compararon los resultados con el modelo de Hankinson con buenos resultados. Segundo, usando ondas de ultrasonido de 1 MHz en un modelo ortotrópico de la madera se determinaron los coeficientes de elásticos de las especies estudiadas y fueron construidos modelos de propagación para bloques tanto con simetría longitudinal radial (LR) como con simetría longitudinal tangencial (LT), que permitió diferenciar claramente estas estructuras. Finalmente, usando las ecuaciones diferenciales de dispersión de ondas planas de ultrasonido de 23 kHz en medios isotrópicos se calculó numéricamente las dispersiones para condiciones de campo cercano. Se obtuvieron modelos de dispersión de ondas acústicas por cavidades de diferentes diámetros, buscando que simular los ataques de xilófagos, se calcularon, luego, los lóbulos de dispersión para cada diámetro con buenos resultados; sin embargo, no se pudo diferenciar, claramente las dispersiones con simetrías LR y LT de los bloques usados.

Palabras-claves: Propagación ondas P y T. Cavidades, Dispersión de ondas. Cuasi velocidad. Lóbulos de emisión. Termitas

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COLONIZACIÓN DE <i>Cryptotermes brevis</i> EN MADERA DE PINO IMÁGENES DE RAYOS X DIGITALIZADAS DE LA COLONIZACIÓN DE LA UNIDAD DE PRUEBA DE PINO POR LA TERMITA DE LA MADERA SECA DE LAS INDIAS OCCIDENTALES.....	30
FIGURA 2 - DAÑO DE <i>Cryptotermes brevis</i> EN UNA PIEZA DE MADERA. ESTRUCTURAL DE <i>PINUS SP.</i> ABIERTA, PARA EXPONER A LAS CRÍAS DE C. BREVIS, LAS GALERÍAS Y LOS PELLETS FECALES.....	31
FIGURA 3 - BLOQUE DE MADERA, PLANOS LONGITUDINAL RADIAL (LR) Y LONGITUDINAL TANGENCIAL (LT).	33
FIGURA 4 - MEDICION DE PROPAGACION DE ONDAS DE ULTRASONIDO MODELO DE HANKINSON	33
FIGURA 5 - REGRESION DE VELOCIDADES MEDIDAS DE VARIAS ESPECIES COMPARADAS CON LA ECUACION DE HANKINSON	34
FIGURA 6 - VARIACION DE LA VELOCIDAD EN LA <i>Thuja plicata</i> MODELO DE REGRESIÓN LINEA CONTINUA EN NEGRA Y VALORES EXPERIMENTALES EN CIRCULOS	35
FIGURA 7 - VARIACION DE LAS VELOCIDADES DE <i>Acer saccharum</i> MODELO DE REGRESION y VALORES EXPERIMENTALES.....	35
FIGURA 8 - SISTEMA DE COORDENADAS CILINDRICAS, ESTRUCTURA DE LA MADERA.....	36
FIGURA 9 - SISTEMA DE ESFUERZOS LONGITUDINALES Y DE CORTE PARA LA ESTRUCTURA DE LA MADERA	37
FIGURA 10 – PLANO XY (LR) y VECTOR DE PROPAGACIÓN P	43
FIGURA 11 - PLANO LR y VECTOR DE PROPAGACIÓN DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y T	45
FIGURA 12 - DIAGRAMA EXPERIMENTAL DE DISPERSION DE ONDAS DE ULTRASONIDO POR LAS CAVIDADES CILINDRICAS.....	47

FIGURA 13 - GRAFICOS LOBULOS DE LA DISPERSION DE UNA ONDA PLANA POR CILINDROS DE MADERA CON DISTINTOS VALORES DE (KR) Y GRAFICO DE LA DISPERSION PARA DIFERENTES ANGULOS	52
FIGURA 14 - ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA	54
FIGURA 15 - EQUIPO DE PRUEBA DE ULTRASONIDO PARAMETRIC 5800PR OLIMPUS DE 1MHz	57
FIGURA 16 - BLOQUE 2, PLANO TRANSVERSAL (RT)	58
FIGURA 17- BLOQUE 3, PLANO TRANSVERSAL (RT)	58
FIGURA 18 - BLOQUE D, PLANO TRANSVERSAL (RT).....	58
FIGURA 19 - PREPARACIÓN DE LA PRUEBA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA EN LA VIGA USANDO LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES EN LÍNEAS PARALELAS PARA MUESTRAS DE SECCIONES RECTANGULARES ...	60
FIGURA 20 - TOMOGRAFIA DEL CORTE DEL BLOQUE	60
FIGURA 21 - CORTE TRANSVERSAL DE LA MUESTRA EN LA ALTURA DONDE SE EFECTUÓ LA TOMOGRAFÍA, EN LA PARTE INFERIOR SE NOTA LA FORMA DEL ATAQUE DE LAS TERMITAS EN FRANJAS CIRCULARES	61
FIGURA 22 - DISPOSICIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN.....	62
FIGURA 23 - DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES PARA USAR EL MODELO ANISOTRÓPICO FUENTE CENTRAL	63
FIGURA 24 - DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES CON EL EQUIPO DE ULTRASONIDO MICRO TIMER BLOQUE 1.....	63
FIGURA 25 - DISPOSICIÓN DE LA MEDICIONES CON UN BLOQUE CON PERFORACION LONGITUDINAL.....	65
FIGURA 26 - BLOQUE "A" <i>Cedrela odorata</i> DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES LONGITUDINALES DE 16 mm DE DIAMETRO	65
FIGURA 27 - BLOQUE D, DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES CON PERFORACION LONGITUDINAL Y NIVELES DE MEDICION.....	66
FIGURA 28 - GRAFICO IZQUIERDO, LENTITUDES (SLOWNESS) DE QL (punteado) y QT (negro), LADO DERECHO GRAFICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$ DE LA ESPECIE <i>Douglas Fir A</i> 1MHz	68
FIGURA 29 - CONFIGURACION DEL MODELO DE DISPERSION.....	69

FIGURA 30 - DISPERSION DE LA ONDA DE ULTRASONIDO PLANA de 23 kHz POR UNA CAVIDAD CILINDRICA DE $\Phi = 1,91\text{cm}$ y $k_r = 1,122$ EN UN BLOQUE DE <i>Cedrela odorata</i>	70
FIGURA 31 - MACROFOTOGRAFÍAS: (A) TANGENCIAL, (B) RADIAL Y (C) TRANSVERSAL. MICROFOTOGRAFÍAS: (D) TRANSVERSAL, (E) RADIAL Y (F) TANGENCIAL, DE LA ESPECIE <i>ENTANDROPHRAGMA SP.</i>	72
FIGURA 32 - MACROFOTOGRAFÍA (A)TRANSVERSAL. MICROFOTOGRAFÍAS (B) TRANSVERSAL, (C) RADIAL Y (D) TANGENCIAL, DE LA ESPECIE <i>CEDRELA ODORATA</i>	74
FIGURA 33 - BLOQUE 1, <i>Cedrela odorata</i> , VELOCIDADES MEDIDAS A DIFERENTES NIVELES CON RESPECTO A LA CARA (LR) SIN CAVIDAD	81
FIGURA 34 - BLOQUE 1, <i>Cedrela odorata</i> , MODELO HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS A NIVEL DE 1,5 cm DE LA FUENTE, SIN CAVIDAD, $n = 1,659$	81
FIGURA 35 - BLOQUE 1, <i>Cedrela odorata</i> , VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS, NIVEL DE 1,5 CM, $n = 1.659$	82
FIGURA 36 - BLOQUE 1, <i>Cedrela odorata</i> , RELACIÓN ENTRE LAS VELOCIDAD Y DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 8 CM DE LA FUENTE	82
FIGURA 37 - BLOQUE 2, <i>Cedrela odorata</i> , MODELO HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS SIN CAVIDAD PARA $n = 1,793$	83
FIGURA 38 - BLOQUE 2, <i>Cedrela odorata</i> , VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS AL NIVEL DE 1,5cm	84
FIGURA 39 - BLOQUE 2, <i>Cedrela odorata</i> , RELACION ENTRE LAS VELOCIDADES Y LOS DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 13,5 cm DE LA FUENTE.....	84
FIGURA 40 - BLOQUE 3, <i>Cedrela odorata</i> , MODELOS HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS SIN CAVIDAD PARA EL NIVEL 1,5 cm , CON $n = 1,83$	85
FIGURA 41 - BLOQUE 3, <i>Cedrela odorata</i> , VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS AL NIVEL DE 1,5 cm.....	85

FIGURA 42 - BLOQUE 3, <i>Cedrela odorata</i> , RELACIÓN DE LA VELOCIDAD y LOS DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 15,5 cm DE LA FUENTE.....	86
FIGURA 43 - Bloque A, <i>Cedrela odorata</i> , MODELO DE HANKINSON CON VELOCIDADES MEDIDAS A NIVELES DE 1,5; 3,5 y 5,5 cm DE LA SUPERFICIE, n = 1,62.....	88
FIGURA 44 - BLOQUE A, <i>Cedrela odorata</i> , VELOCIDADES COM RESPECTO AL ANGULO θ EN FUNCION DEL NUMERO DE CAVIDADES LONGITUDINALES DE 16 mm DE DIAMETRO, DE ACUERDO A LA FIGURA 26.....	89
FIGURA 45 - BLOQUE D, <i>Cedrela odorata</i> MODELO DE HANKINSON CON VELOCIDADES MEDIDAS EN LOS NIVELES DE 2, 4 y 6 cm con n=1,586	90
FIGURA 46 - BLOQUE "D" , <i>Cedrela odorata</i> , CON CAVIDAD LONGITUDINAL DE 60 mm MEDICIONES A DIFERENTES NIVELES.....	90
FIGURA 48 - BLOQUE 2, <i>Cedrela odorata</i> , MODELO ORTOTROPICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL,QT Y $(QL \times QT)^{1/2}$, PLANO (LR).....	93
FIGURA 49 - BLOQUE 3, <i>Cedrela odorata</i> , MODELO ORTOTROPICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$ PLANO (LT)	94
FIGURA 50 - GRAFICOS DEL BLOQUE 2, <i>Cedrela odorata</i> , CON COEFICIENTES DE RIGIDEZ INDEPENDIENTE CAMBIADOS MOSTRANDO LOS EFECTOS EN LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$	95
FIGURA 51 - GRAFICOS DEL BLOQUE 3, <i>Cedrela odorata</i> , CON COEFICIENTES DE RIGIDEZ INDEPENDIENTE CAMBIADOS MOSTRANDO LOS EFECTOS EN LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$	96
FIGURA 52 - BLOQUE 2, GRAFICOS DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPO CERCANO.....	99
FIGURA 53 - BLOQUE 2, GRAFICOS DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPO CERCANO.....	100
FIGURA 54 - BLOQUE 3, GRAFICO DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPOS CERCANOS	101

FIGURA 55 - BLOQUE 3, GRAFICO DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPOS CERCANOS	102
---	-----

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1 – REDUCCION DE LOS INDICES DEL TENSOR VOIGT Y SU EQUIVALENCIA PARA MADERA.....	38
CUADRO 2 - INDICES DEL TENSOR DE RIGIDEZ Y SU EQUIVALENCIA PARA LA ESTRUCTURA DE LA MADERA	39
CUADRO 3 – NORMAS TECNICAS PERUANAS (NTP), EMPLEADAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA.....	55
CUADRO 4 - CLASIFICACIÓN SEGÚN INSPECCIÓN VISUAL E INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA.....	106

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 - PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS DE LAS ESPECIES <i>Entandrophragma sp</i> antiguo Y <i>Cedrela odorata</i>	76
TABLA 2 - ANALISIS ESTADISTICO DEL MODULO DE ELASTICIDAD DESTRUCTIVO MOE(des) Y MODULO DE ELASTICIDAD NO DESTRUCTIVO MOE (no des)	76
TABLA 3 - VELOCIDADES DE ONDAS DE ULTRASONIDO LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES DE 1 MHZ EN LAS DIFERENTES DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN.....	78
TABLA 4 - MOES Y MÓDULOS DE CORTE DINÁMICOS MEDIDOS CON ONDAS DE ULTRASONIDO DE 1 MHZ EN LAS DIFERENTES 44 DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN.....	78
TABLA 5 – ANALISIS ESTADISTICO DE LOS SUPUESTOS Y PRUEBAS DE COMPARACION	79
TABLA 6 - VALORES DE LAS VELOCIDADES REFERENCIALES, CONTENIDOS DE HUMEDAD Y DENSIDADES APARENTES DE LOS BLOQUES 1, 2 y 3 ...	80
TABLA 7 - VALORES DE LAS VELOCIDADES REFERENCIALES Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS BLOQUES A, B y D	87
TABLA 8 - COEFICIENTE DEL TENSOR DE RIGIDEZ BLOQUES 1,2 y 3 en Pa.10 ⁸ ..	92

LISTA DE SIGLAS

ICOMOS	-	Centro de Documentación UNESCO
L	-	Longitudinal, dirección
LR	-	Longitudinal Radial
LT	-	Longitudinal Tangencial
R	-	Radial, dirección
RT	-	Radial Tangencial
T	-	Tangencial, dirección
TND	-	Técnicas No Destructivas

LISTA DE ABREVIACIONES

C.V.	-	Coefficiente de variación
D.E.	-	Desviación estándar
H	-	Función de Hankel
J	-	Función de Bessel
kHz	-	kilo Hertz
kg/m ³	-	Densidad
M	-	metros
m/s	-	metros/segundo
QL	-	Cuasi Velocidad longitudinal
QT	-	Cuasi Velocidad transversal

LISTA DE SIMBOLOS

σ_{ij}	-	Tensor esfuerzo de segundo orden
ϵ_{ij}	-	Tensor de deformación
C_{ijkl}	-	Tensor de esfuerzo
S_{ijkl}	-	Tensor de complianza
∇^2	-	Laplaciano
c	-	Velocidad de la onda, m/s
ω	-	Velocidad angular de la onda, rad/s
λ	-	Longitud de onda, m
k	-	Número de onda, 1/m

INDICE

1	INTRODUCCION	20
1.1	CONTEXTO DEL PROBLEMA	20
1.2	OBJETIVO	21
1.2.1	General	21
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
2	REVISION LITERATURA	23
2.1	CONSTRUCCION EN MADERA DEL PERU VIRREINAL XVI-XVIII.....	23
2.2	ATAQUE DE INSECTOS XILÓFAGOS.....	24
2.2.1	Características principales.....	24
2.2.2	Termitas de madera seca	27
2.2.3	Descripción del daño	30
2.2.4	Daño a construcciones históricas	32
2.2	METODOS NO DESTRUCTIVOS DE ULTRASONIDO.....	32
2.2.1	Ondas de ultrasonido en medios anisotrópicos	32
2.3	PROPIEDADES MECANICO ELASTICAS DE LA MADERA	36
2.3.1	Caracterización de medios ortotrópicos.....	36
2.3.2	Propagación de ondas de ultrasonido en medios ortotrópicos	40
2.3.3	Aplicaciones.....	42
2.3.4	Propagación de ondas de ultrasonido en medios ortotrópicos en direcciones no principales.....	43
2.4	ONDAS ACUSTICAS DISPERSADAS POR CAVIDADES CILINDRICAS	46
2.4.1	Consideraciones iniciales del problema.....	46
2.4.2	Dispersión elástica de una onda esférica con polarización longitudinal (P) por cavidades cilíndricas.....	46

2.4.3	Solución por medio de la expansión en series de la onda incidente esférica	48
2.4.4	Desarrollo de la onda dispersada por la cavidad cilíndrica	49
2.4.5	Solución total del proceso de dispersión debida a las cavidades cilíndricas	49
3	MATERIALES Y MÉTODOS	53
3.1	MATERIALES	53
3.1.1	Caracterización preliminar de las especies <i>Entandrophragma sp</i> y <i>Cedrela odorata</i>	53
3.1.2	Caracterización anatómica.	53
3.1.3	Caracterización preliminar destructiva de las especies <i>Entandrophragma sp</i> y <i>Cedrela odorata</i> utilizadas	54
3.1.4	Caracterización de las propiedades mecánicas no destructivas de especies en estudio:	55
3.1.5	Características de la <i>Cedrela odorata</i> como material usado en el estudio	57
3.1.6	Equipos de Laboratorio	59
3.2	MÉTODOS	59
3.2.1	Pruebas preliminares para establecer la geometría de las cavidades para el estudio usando tomografía acústica en las vigas de <i>Entandrophragma sp</i> antiguas	59
3.2.2	Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades anisotrópicas por la Ecuación Hankinson	61
	Caracterización de las propiedades anisotropías de los bloques de madera 1,2 y 3 con o sin cavidades transversales.	61
3.2.3	Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades anisotropías de los bloques A, B y D de madera para cavidades perforadas longitudinalmente	64
3.2.4	Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera 1,2 y 3.	66

3.2.5	Preparación de gráficos referenciales para el estudio de las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera.....	67
3.2.6	Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera 2 y 3, variando las constantes del tensor de rigidez.....	68
3.2.7	Modelo de dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas	69
4	RESULTADOS	71
4.1	CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LAS ESPECIES ENTANDROPHRAGMA SP. Y CEDRELA ODORATA.....	71
4.1.1	Caracterización preliminar destructiva y no destructiva de las especies <i>Entandrophragma sp</i> y <i>Cedrela odorata</i> utilizadas.....	75
4.1.2	Caracterización de las propiedades mecánicas no destructivas de la especie en estudio	77
4.2	PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE PARA PERFORACIONES CILÍNDRICAS VERTICALES, CON FUENTE CENTRAL	80
4.3	PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN LOS BLOQUES A, B y D DE <i>Cedrela odorata</i> CON CAVIDADADES LONGITUDINALES.....	87
4.3.1	Determinación de las velocidades referenciales en los bloques A, B y D.....	87
4.3.2	Pruebas de transmisión de ondas de ultrasonido en bloques A y B de <i>Cedrela odorata</i>	87
4.3.3	Pruebas de transmisión de ondas de ultrasonido en el Bloque D.....	90
4.4	MODELO ORTOTROPICO DE LOS BLOQUES 1, 2 Y 3	91
4.5	MODELO DE LA DISPERSION DE LAS ONDAS DE ULTRASONIDO POR CAVIDADADES EN CONDICIONES DE CAMPO CERCANO, EN LOS BLOQUES 2 y 3.....	97
5	DISCUSION	103
5.1	PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO ECUACIÓN DE HANKINSON PARA CAVIDADADES VERTICALES 1, 2 y 3	103

5.2	PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN BLOQUES A, B y D DE <i>Cedrela odorata</i> CON CILINDROS DE PERFORADOS LONGITUDINALMENTE	104
5.3	MODELO ORTOTRÓPICO DE LOS BLOQUES 1, 2 y 3.....	105
5.4	MODELO DE DISPERSIÓN PARA LOS BLOQUES 2 y 3	105
5.5	CONSIDERACIONES FINALES DEL USO DE TECNICAS NO DESTRUCTIVAS EN LA EVALUACIÓN DE MONUMENTOS HISTORICOS	106
6	CONCLUSIONES	108
	REFERENCIAS.....	110
	ANEXOS	114
	ANEXO 1	115
	Destructivo Vs No Destructivo.....	115
	1. Análisis exploratorio	115
	2. Comparaciones estadísticas	115
	2.1 MOE destructivo vs MOE No Destructivo por especie	115
	2.2 MOE Sapeli vs MOE Cedro por ensayo	117
	ANEXO 2	118
	1.-Comparación velocidades y MOES: Sapeli vs Cedro	118
	1.1 Análisis exploratorio	118
	Normalidad.....	119
	Homocedasticidad.....	120
	Prueba de Mann Whitney	120

1 INTRODUCCION

1.1 CONTEXTO DEL PROBLEMA

Los Monumentos Históricos en el Perú presentan, principalmente elementos estructurales de madera de más de 300 años de antigüedad que requieren evaluaciones que conduzcan a su buena conservación y puesta en valor para las generaciones futuras. Los elementos estructurales de estos monumentos provienen generalmente, de maderas de especies provenientes del África, siendo la especie *Entandrophragma sp* una de las más comunes, los que, por su antigüedad, vienen sufriendo los procesos de deterioro tanto abiótico como biótico. En este último, principalmente por ataques de termitas de madera seca. Este deterioro es el más notorio debido a las cavidades que se forman dentro de la madera, provocando pérdidas significativas en las propiedades mecánicas que son de difícil evaluación. Por este motivo, el uso de técnicas no destructivas (TND) viene a ser la propuesta más adecuada para este fin, principalmente, por su bajo nivel de intervención, su efectividad y facilidad de uso. En el Perú, en los últimos años, se han aplicado estas técnicas con bastante eficiencia en la restauración del Hotel El Comercio, en Lima, y la Catedral de la Ciudad de Ica, señalándose la importancia del uso de TND al evaluar los monumentos antes de iniciar los trabajos de restauración, Vizcarra et al. (2018). Después de evaluar varias técnicas, proponen aplicar modelos de propagación de ondas de ultrasonido determinando sus velocidades como en el modelo de Hankinson, también las técnicas de TND de ultrasonido que permitirán determinar las componentes del tensor de rigidez de la madera estudiada para luego ver su comportamiento. De otro lado, es posible usar un modelo de dispersión lineal de ondas de ultrasonido por cavidades, entre otras técnicas acústicas y no acústicas existentes.

En el presente estudio se busca evaluar el uso de las técnicas no destructivas en los monumentos históricos. Sin embargo, ante la falta de muestras sanas de los elementos estructurales antiguos se propone hacer las pruebas en una madera con propiedades semejantes a ella, para lo cual se propone utilizar madera de la especie *Cedrela odorata* como sustituta.

Con este fin planteamos las siguientes hipótesis de trabajo.

- Debido a las dificultades de encontrar bloques de madera de la especie Sapelli (*Entandrophragma sp*) antiguas y sanas en los monumentos históricos, es posible, sustituirla por bloques de madera de la especie cedro (*Cedrela odorata*).
 - El modelo de Hankinson puede diferenciar la dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas en bloques de madera de *Cedrela odorata*
 - El modelo ortotrópico puede evaluar, por medio de las componentes del tensor de rigidez de la madera de la especie *Cedrela odorata*, el comportamiento de la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido en los planos de propagación longitudinal radial (LR) y longitudinal transversal (LT) de bloques de la madera en estudio.
 - La dispersión de ondas de ultrasonido planas puede caracterizar la presencia de cavidades cilíndricas en bloques de madera de la especie *Cedrela odorata*
- Por lo expuesto podemos establecer el objetivo de la tesis de la siguiente forma:

1.2 OBJETIVO

1.2.1 General

Adecuar los modelos de Hankinson, ortotrópicos y ondas planas con los modos de dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas en bloques de madera de la especie *Cedrela odorata*

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer el modo para caracterizar la interacción de ondas de ultrasonido con las cavidades cilíndricas en los modelos de Hankinson y ondas planas.
- Proponer un modelo de interacción de las velocidades de ultrasonido con la estructura ortotrópica de madera por medio de las componentes del tensor de rigidez en los planos LR y LT

- Predecir la interacción de ondas de ultrasonido planas con cavidades cilíndricas en condiciones de campo cercano.

2 REVISION LITERATURA

2.1 CONSTRUCCION EN MADERA DEL PERU VIRREINAL XVI-XVIII

Las construcciones en el Perú, desde el inicio del virreinato, en el siglo XVI, fueron casonas con muros, arcos y bóvedas, semejantes a las construidas en España, pero, adaptándose a las condiciones geológicas y ambientales. Así el uso de madera rolliza, caña y tierra, condujo al empleo de la quincha, la aplicación de técnicas de escuadría de madera y yeso, propiciando la construcción de templos y palacios, con el uso de bóvedas encamionadas a partir del siglo XVII (HURTADO, 2007).

Chácara (2013) indica que, en la costa del Perú, desde la época del Virreinato, la construcción consistió básicamente de muros de adobe y quincha y que después del terremoto de 1746, empezó a utilizarse un sistema de construcción mixto consistente en un entramado, caña o bambú recubierta con barro mezclado con paja el cual se conoce como quincha Díaz, (1984). Así, en la reconstrucción de la catedral de Lima, sobresale la de 1746 realizada por Juan Rher, que usa la técnica señalada con el uso de bóveda de crucería.

Rodríguez y Rubio de Hita (1995), señalan que en los procesos de rehabilitación de monumentos históricos el problema principal es determinar la resistencia de la madera sin usar métodos destructivos, o sea, con técnicas no destructivas como la de ultrasonido, indicando, además, que es necesario evaluar el nivel de pudrición de estos elementos. Los autores desarrollan una metodología para la evaluación in situ e indican que un objetivo importante del estudio es comparar los elementos de madera, viejos y nuevos, y encontrar el comportamiento de las velocidades de ultrasonido en función de la dirección de transmisión y los parámetros abióticos correspondiente a su localización. Asimismo, señalan la importancia de crear una base de datos de las propiedades mecánicas destructivas y no destructivas de las distintas especies de madera estandarizadas y usadas en los monumentos históricos.

De otro lado, la carta del Centro de Documentación de la Unesco (ICOMOS) (2007), sobre los principios para el análisis, conservación y restauración de las

estructuras del patrimonio arquitectónico, establece con respecto conservación de elementos estructurales de madera en los patrimonios culturales las siguientes recomendaciones:

- Se requiere una exhaustiva evaluación de las características de la estructura y los materiales.
- Es fundamental disponer de información sobre la estructura en su estado original y las técnicas que se emplearon en la construcción, las alteraciones sufridas y sus efectos, los fenómenos que se han producido y sobre su estado actual.
- Es indispensable determinar cuáles fueron las causas de los daños y la degradación y después, evaluar el grado de seguridad que dichas estructuras ofrecen.

2.2. ATAQUE DE INSECTOS XILÓFAGOS

2.2.1 Características principales

Los insectos xilófagos pertenecen a tres órdenes, dentro de la clase *Insecta*:

Orden *Coleóptero*:

Reciben el nombre común de escarabajos. Los coleópteros perforadores pueden atacar a la madera en los arboles vivos, o recién cortados (familias *Cerambycidae* o *Bostrichidae*); durante el proceso de secado (familia *Platypodidae* y familia *Curculionidae*, subfamilia *Scolytinae*); o a la madera seca (familias *Anobiidae* y *Lyctidae*).

En todas las especies de escarabajos perforadores, son las larvas, de apariencia vermiforme, las que realizan la mayor parte del daño durante su desarrollo, pues abren galerías en el interior de la madera. Los adultos hacen orificios para salir al exterior para aparearse, luego de lo cual las hembras colocan huevos en las mismas piezas de madera donde se desarrollaron, o bien buscan otras nuevas. El polvillo que dejan los adultos al pie de los árboles o estructuras de madera, según sea el caso, para salir al exterior una vez terminado su desarrollo, suele delatar su presencia, aunque el insecto adulto no sea visto.

Los cerambícidos adultos son escarabajos que pueden alcanzar varios centímetros de longitud, según las especies. Se caracterizan principalmente por tener las antenas más largas que el cuerpo. Algunas especies son de colores muy vistosos, otras, en cambio, son de color marrón, negro o gris. Los bostríquidos adultos, por lo general, miden solo unos milímetros, y suelen presentar la cabeza dirigida hacia abajo, de tal forma que no es visible si son observados desde la parte superior del cuerpo. Sólo se conocen especies de color marrón o negro. Los platipódidos y escolítidos adultos alcanzan solo unos milímetros de longitud, y son de color marrón o negro. Todos estos escarabajos presentan el cuerpo aproximadamente cilíndrico.

Una vez que la madera está seca y en uso, por ejemplo, en habitaciones, es posible encontrar insectos adultos de alguna de las familias *Cerambycidae*, *Bostrichidae*, *Platypodidae* o *Curculionidae* (*Scolytinae*). Si se observan adultos de estas familias se debe a que algunos de ellos pueden terminar su desarrollo en la madera luego de que ésta ha concluido su proceso de secado, o más frecuentemente, la madera utilizada en esos casos no estaba completamente seca o fue utilizada inmediatamente después del secado.

La madera en uso o “seca” presenta un contenido de humedad menor al 30%. En esta condición, los coleópteros que pueden atacarla pueden ser de las familias *Anobiidae* y *Lyctidae*, los cuales son muy pequeños (apenas unos milímetros de largo), y son de color marrón o negro

Orden *Hymenoptera*:

Mason, Huber y. Fernández (2006) en Introducción a los Hymenoptera de la Región Neotropical, señalan que Hymenoptera es uno de los grandes órdenes de insectos, junto con Coleoptera, Lepidoptera y Diptera. Cada uno de estos incluye más de 100.000 especies descritas en el mundo. Para Hymenoptera indican que se manejan números entre 115.000 y 199.000 especies descritas, con algunas estimaciones que van de 600.000 a 1.200.000. De acuerdo a Mendes y Alves (1988) son principalmente tres grupos: hormigas carpinteras (familia *Formicidae*), abejas que utilizan la madera para depositar sus huevos (algunas especies de la familia *Apidae*), y avispas que se alimentan de la madera (familia *Siricidae*).

- Hormigas carpinteras: algunas especies de hormigas construyen sus colonias dentro de la madera en servicio, pudiendo ocasionar daños de gran magnitud. Algunas veces, son confundidas con termitas. Para diferenciar unas de otras, es necesario observar las alas y antenas de las castas aladas. Las hormigas reinas y machos presentan las alas posteriores más pequeñas que las anteriores, mientras que las termitas (reproductores) presentan las cuatro alas de la misma longitud.
- Abejas del género *Xylocopa*: colocan sus huevos en la madera, abriendo galerías en su interior. No se alimentan de la madera. Las larvas aprovechan como alimento el polen que las hembras dejan en el interior de las galerías con este propósito. Las galerías que realizan pueden generar serios daños si se presentan en grandes cantidades.
- Avispas de la familia *Siricidae*: a diferencia de las abejas de la madera, estas avispas se desarrollan alimentándose de esta, ocasionando serios daños en su interior.

Orden *Blattodea*:

Dentro de este orden, al cual pertenecen también las cucarachas, las termitas están clasificadas en el infraorden Isoptera.

Según Santos (2015) y Fontes y Milano (2002), las termitas son insectos xilófagos sociales, que viven en colonias muy estructuradas y grupos bien definidos, llamados castas, con funciones diferentes. Existen principalmente tres castas: los reproductores, que presentan cuatro alas antes de aparearse y fundar una nueva colonia, para lo cual pierden las alas; y dos castas ápteras; los soldados, que protegen la colonia; y las obreras, que se encargan de la mayoría de actividades, es decir, construyen y reparan los termiteros, acarrear alimento para las demás castas, cuidan de las crías, etc.

Los isópteros están divididos en varias familias, cada una de las cuales presenta diferentes hábitos de nidificación. En los bosques y otras áreas naturales existen termitas que construyen sus colonias sobre el suelo, sobre los árboles, o bien de forma subterránea. Todas las termitas se alimentan de la celulosa presente en sus fuentes de

alimentación (principalmente madera y derivados), la cual es degradada gracias a que sus tractos intestinales contienen una abundante carga de microorganismos que les ayudan a digerir la celulosa. Muchos de estos insectos construyen túneles que unen sus colonias con los lugares donde encuentran alimento. Las termitas tienen importancia ecológica en el campo, ya que contribuyen a degradar la madera muerta e incorporarla en el suelo, incluso las de vida subterránea contribuye a airear el suelo. Algunas especies pueden alimentarse de madera viva, convirtiéndose en plagas agrícolas de consideración. Entre las especies que atacan la madera muerta, algunas pueden constituirse en plagas muy serias, ya que pueden dañar gravemente construcciones, muebles, libros y otros productos hechos a partir de madera. En Sudamérica, son tres las principales familias de termitas que presentan especies capaces de convertirse en plagas de la madera seca: *Termitidae*, *Rhinotermitidae* y *Kalotermitidae*.

- Familia *Termitidae*:

El 85% de las especies de termitas conocidas pertenecen a esta familia. Existen diversos tipos conforme a la forma en que construyen sus colonias. Sus colonias o termiteros pueden ser de montículo, subterráneos, semi-arborícolas o arborícolas. En Brasil, algunas especies pueden ser plagas de construcciones hechas de madera en algunas regiones del país.

- Familia *Rhinotermitidae*:

Sus termiteros son exclusivamente subterráneos. En zonas naturales no existen señales de la presencia de ellos, salvo por los túneles que construyen para unir sus colonias con las fuentes de alimento. Las especies de climas tropicales pueden volverse serias plagas en zonas urbanas. En estos casos, la madera de las construcciones se convierte en su alimento, y es posible observar estos túneles ingresando a las estructuras de madera.

- Familia *Kalotermitidae*:

Se trata de termitas exclusivas de madera seca. Construyen sus colonias en el interior de construcciones hechas a partir de madera, así como en muebles, libros, chapas decorativas, etc. En el Perú, la especie *Cryptotermes brevis* se ha convertido en la principal plaga de las construcciones con madera.

2.2.2 Termitas de madera seca

Las termitas de madera seca aprovechan la madera de las construcciones, muebles y toda clase de productos derivados de ella, como libros, chapas decorativas y muchos otros como parte de su alimentación. En los Estados Unidos de Norteamérica, aproximadamente 5 mil millones de dólares son utilizados anualmente por los propietarios de las casas sólo para combatir a las termitas y reparar sus daños (ORKIN, 2016). En el Perú, las termitas de madera seca ocasionan serios daños en el interior de las viviendas, atacando principalmente a los muebles, libros y otros. Estas termitas se han reportado como una seria plaga de las construcciones de madera en muchos países donde ha sido introducida accidentalmente (FERREIRA et al., 2013).

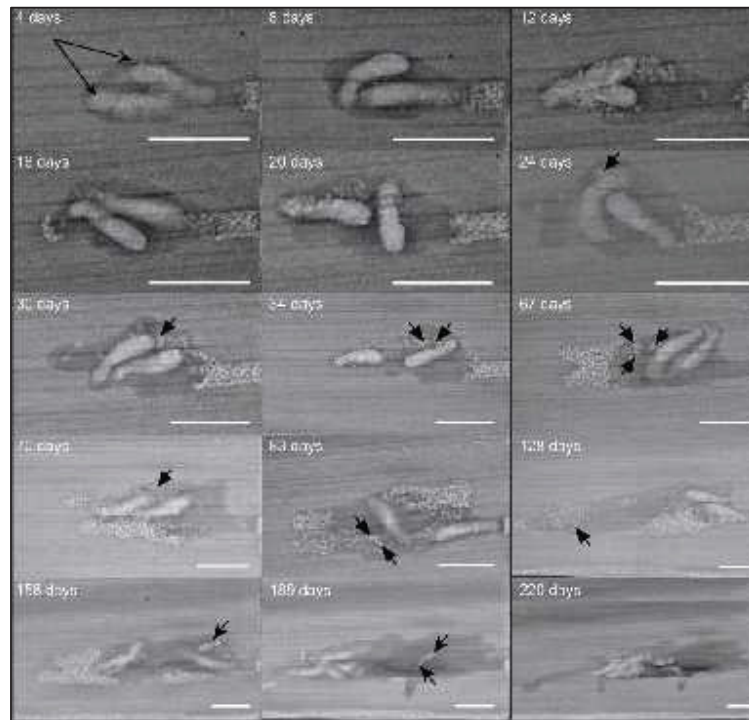
La especie *Cryptotermes brevis* es la que más daño produce en los productos de madera y derivados en la costa del Perú. Según Ripa y Luppichini (2004), son de cuerpo alargado, color claro, de hasta 5 mm de largo. Las alas de la casta reproductora miden hasta 8 mm de largo. Se encuentran preferentemente en regiones secas. Los adultos alados son de color castaño. Los soldados son escasos, de color crema pálido, de 4 a 6 mm de largo, presentan la cabeza achatada y oscura, mandíbulas relativamente pequeñas. *C. brevis* es la especie de más amplia distribución en el mundo. Se ha encontrado en Asia, África, Australia, y en toda América. A diferencia de las termitas subterráneas, sus colonias son usualmente pequeñas, conteniendo, tal vez, unos cientos de individuos. La mayoría de las especies de termitas de madera seca sólo infestan árboles, pero otras son plagas económicamente importantes, ya que ubican sus colonias en estructuras como vigas, marcos de puertas y ventanas, postes y muebles. Dentro de estas últimas, *C. brevis* es considerada como una de las más destructivas a escala mundial. En las maderas atacadas por las termitas de madera seca se observan pequeños orificios por los que, ocasionalmente, expulsan las fecas que pueden acumularse bajo dichas aperturas. Las galerías formadas dentro de las estructuras atacadas son relativamente limpias y no existe restos de suelo en ellas.

Las colonias son similares a las de otras termitas. Desarrollan individuos alados, reproductores, los cuales vuelan en gran número desde colonias maduras y en muchas establecen una nueva colonia en madera sólida. El período de vuelo o enjambrazón ocurre en horas del crepúsculo entre la primera y segunda quincena de diciembre. Estos

vuelos ocurren al interior de las viviendas y, en muchas ocasiones, en los entretechos, donde pasan inadvertidos. En la especie *C. brevis*, la pareja fundadora alada establece la colonia sobre madera con ciertas características de madurez, humedad, espesor y ausencia de productos químicos o pinturas repelentes. Antes de copular, pierden las alas e inician la construcción de una pequeña cámara en la que se aparean, y la hembra coloca 2 a 5 huevos pequeños, de color blanco brillante, los que la pareja cuida y mantiene limpios y libres de hongos. En laboratorio, la incubación demora entre 75 y 81 días. Al término del primer año, a la pareja fundadora se han sumado sólo 3 a 4 individuos y aún no se ha producido ningún soldado (ARTIGAS, 1994).

En otras especies, durante los primeros dos años de la nueva colonia, aparecen uno o dos soldados. Los alados pueden aparecer a partir del cuarto a sexto año. Las colonias antiguas establecidas pueden tener 2.000 a 3.000 individuos y 50 a 60 soldados. En invierno la ovoposición se detiene, en algunos casos hasta cinco meses, y luego continúa. De esta forma la colonia sigue creciendo y las nodrizas alimentan por regurgitación (alimentación estomodeal) o trofalaxia (alimentación proctodeal) a las ninfas en sus dos primeros estadios y a los soldados durante toda su vida. Una colonia adulta o madura llega a tener 300 individuos en relación de un soldado por cada 45 de las otras castas. La FIGURA 1 ilustra la termita *Cryptotermes brevis*.

FIGURA 1 – COLONIZACIÓN DE *Cryptotermes brevis* EN MADERA DE PINO IMÁGENES DE RAYOS X DIGITALIZADAS DE LA COLONIZACIÓN DE LA UNIDAD DE PRUEBA DE PINO POR LA TERMITA DE LA MADERA SECA DE LAS INDIAS OCCIDENTALES



FUENTE: COSME et al. (2017)

LEYENDA: a) Las imágenes secuenciales indican la colonización por un par de termitas →, b) → Huevos (hasta 128 días), c) → Inmaduros (después de 128 días), d) Barra blanca, 0.5 cm.

2.2.3. Descripción del daño

Las termitas de madera seca realizan daño, tanto de forma transversal como paralela al grano de la madera. Una vez que una pareja de reproductores primarios encuentra una cavidad para iniciar una nueva colonia, como, por ejemplo, el interior de una rajadura de un mueble de madera, estos insectos taponan todo contacto con el exterior, y se mantienen aislados, alimentándose de la madera. La hembra cuida de sus primeras crías, pero, cuando estas se desarrollan, se ocupan de toda la actividad de la colonia: la apertura de nuevos túneles y galerías, la alimentación de los reproductores primarios (o “pareja real”), el cuidado de las nuevas crías, etc. Un pequeño porcentaje de

las crías se desarrolla como soldados, que tienen una cabeza y mandíbulas de mayor tamaño y poder cortante que los inmaduros, y que defienden la colonia. Después de expulsar sus *pellets* durante varios días, taponan el agujero, y continúan alimentándose en el interior de la madera.

En las colonias desarrolladas aparecen reproductores primarios desde el mes de noviembre de cada año, hasta febrero o marzo del año siguiente (en Brasil ocurre de agosto a diciembre), durante el anochecer, atraídos por las luces artificiales, para luego dejar sus alas antes de aparearse y encontrar un lugar donde iniciar una nueva colonia. La presencia de las alas de las termitas no es un indicador de daño, ya que los reproductores pueden provenir de muchos lugares para ingresar a las casas, pero es una señal muy importante de alerta sobre una posible infestación.

Las galerías que realizan llegan hasta la superficie externa de la madera, dejando solamente una delgada capa. Las galerías presentan una apariencia lisa, esculpida, y contienen pocos o ningún pellet (FIGURA 2). La acumulación de pellets puede encontrarse a veces en galerías que no conectan con otras, o en túneles que no son utilizados.

FIGURA 2 - DAÑO DE *Cryptotermes brevis* EN UNA PIEZA DE MADERA. ESTRUCTURAL DE *PINUS SP.* ABIERTA, PARA EXPONER A LAS CRÍAS DE *C. BREVIS*, LAS GALERÍAS Y LOS PELLETS FECALES.



FUENTE: SCHEFFRAHN. Colony in wood (<https://www.cabi.org/>)

LEYENDA: Muestra abierta, para exponer a las crías de *C. brevis*, galerías y los pellets fecales.

La madera seriamente atacada pierde resistencia en los casos de infestaciones más serias, de tal forma que pueden estar en grave peligro las partes estructurales de las construcciones con madera seca.

2.2.4. Daño a construcciones históricas

Las termitas de madera seca pueden convertirse en un serio problema en las construcciones históricas, como ha sido verificado en ciudad de Lima. La especie de termita que ha ocasionado graves infestaciones en estas estructuras es *Cryptotermes brevis* (familia Kalotermitidae), Vizcarra et al. (2019). El hecho de que pueda encontrarse construcciones históricas contiguas ocasiona que sea más fácil la dispersión de estas termitas, y más difícil su control, por la accesibilidad a las piezas de madera afectadas.

2.2 METODOS NO DESTRUCTIVOS DE ULTRASONIDO

2.2.1 Ondas de ultrasonido en medios anisotrópicos

Debido a la anisotropía de madera en las diferentes direcciones y específicamente en los planos longitudinal-radial (LR) y longitudinal-tangencial (LT) FIGURA 3, en piezas de madera con esas orientaciones se producen velocidades de propagación de las ondas de ultrasonido con diferentes valores, de acuerdo con los ángulos que forman con la dirección longitudinal como se muestra en la FIGURA 4 para una fuente puntual, dadas por la ecuación de Hankinson, (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987):

$$V_{\theta} = \frac{V_L V_R}{V_L \sin^n(\theta) + V_R \cos^n(\theta)} \quad (1)$$

donde:

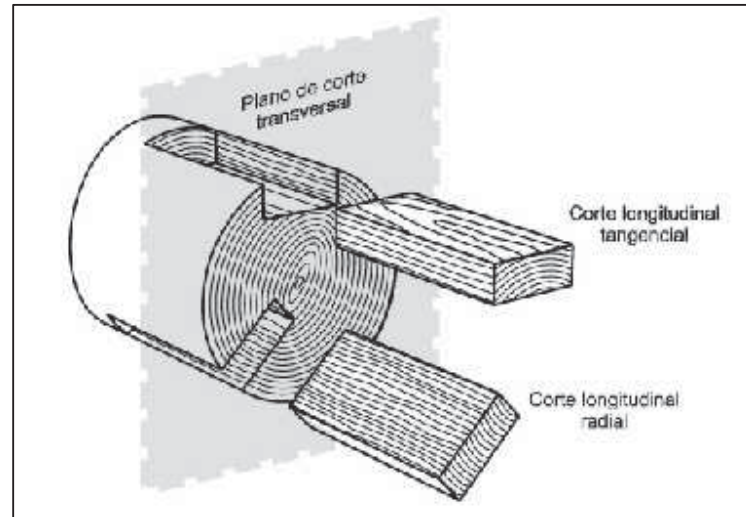
V_{θ} = velocidad de la onda en cualquiera de los ángulos θ , en m/s;

V_L = velocidad de la onda en la dirección longitudinal, en m/s;

V_R = velocidad de la onda en la dirección radial, en m/s;

n = es un parámetro de ajuste por determinar con valores entre 1,6 a 1,9.

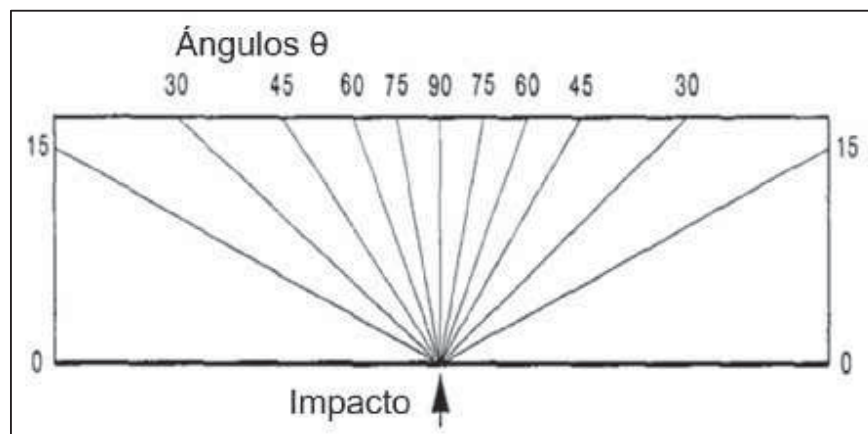
FIGURA 3 - BLOQUE DE MADERA, PLANOS LONGITUDINAL RADIAL (LR) y LONGITUDINAL TANGENCIAL (LT).



FUENTE: SPAVENTO (2008)

De otro lado, es importante señalar lo indicado por Hearing, Keunecke y Niemz (2012) que una aumento del contenido de humedad de 8,7 al 16,2% en la madera de haya, puede provocar una disminución del módulo de Young del orden de 21,1 % ; 8,3 % y 25,6 % en las direcciones radial, longitudinal y tangencial lo que exigiría considerar este factor como muy importante en estudios con muestras de bajo contenido de humedad.

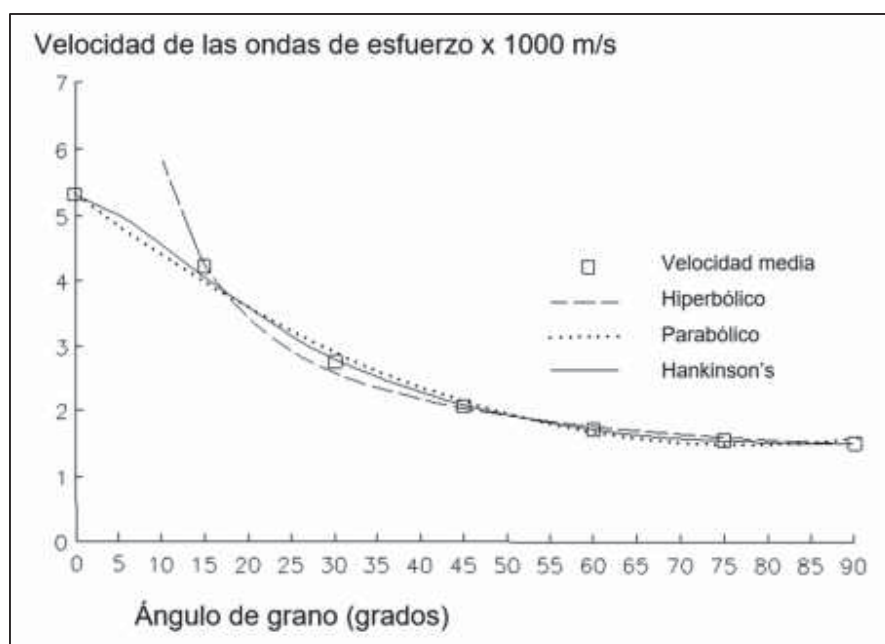
FIGURA 4 - MEDICION DE PROPAGACION DE ONDAS DE ULTRASONIDO MODELO DE HANKINSON



FUENTE: ARMSTRONG, PATTERSON Y SNECKENBERGER (1991, p. 36)

La relación utilizada por Armstrong, Patterson y Sneckenberger (1991), para comparar los resultados de regresiones de las mediciones de velocidades en varias especies usando la ecuación de Hankinson, concluyendo que esta última da la mejor aproximación. En la FIGURA 5 se muestra el comportamiento de las velocidades medidas con la regresión hiperbólica, parabólica y la ecuación de Hankinson.

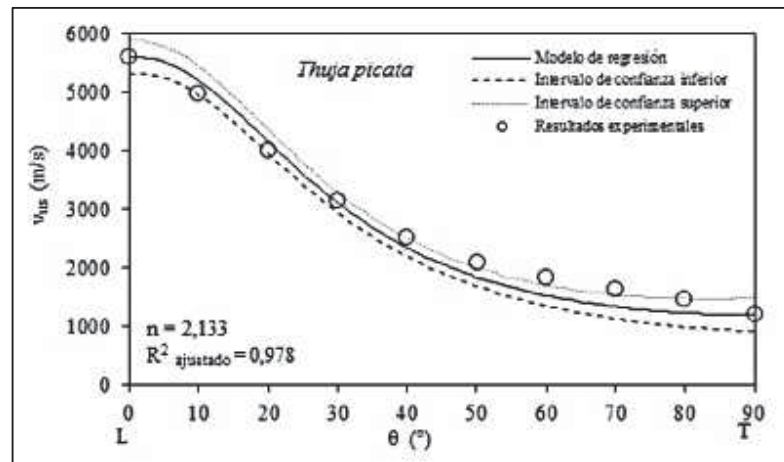
FIGURA 5 - REGRESION DE VELOCIDADES MEDIDAS DE VARIAS ESPECIES COMPARADAS CON LA ECUACION DE HANKINSON



LEYENDA: (□ Velocidad media, --- Ecuación Hiperbólica de segundo orden, Ecuación Parabólica de segundo orden, — Ecuación de Hankinson)

Sotomayor y Villaseñor (2016), FIGURA 5, estudian la anisotropía de las especies *Thuja plicata* y *Acer saccharum*, en muestras orientadas angularmente desde la dirección longitudinal hasta la tangencial, determinando, luego, sus velocidades de propagación y sus módulos elásticos, encontrando que en el caso de la *Thuja plicata* las velocidades son más variables y tienen un coeficiente de determinación de 0,978 y los valores experimentales no se ajustan bien para ángulos mayores a 50° (FIGURA 6).

FIGURA 6 - VARIACION DE LA VELOCIDAD EN LA *Thuja plicata* MODELO DE REGRESIÓN LINEA CONTINUA EN NEGRA Y VALORES EXPERIMENTALES EN CIRCULOS

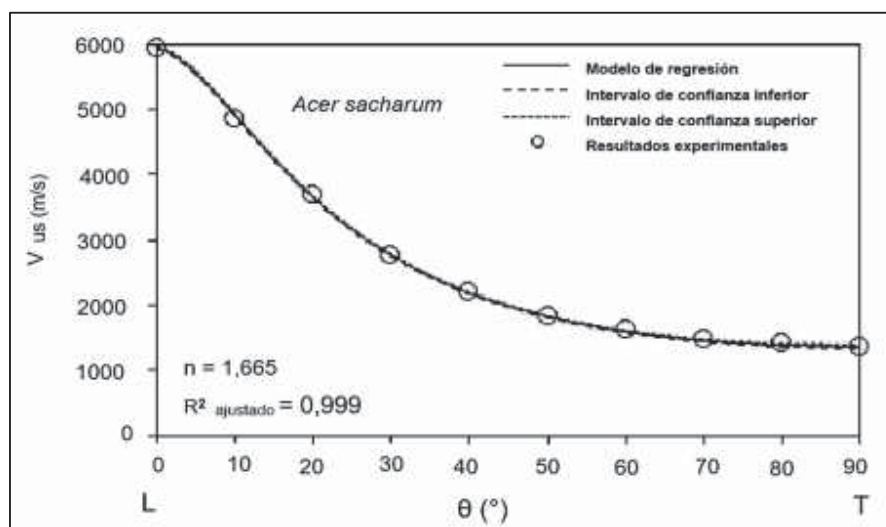


FUENTE: SOTOMAYOR y VILLASEÑOR (2016)

LEYENDA: Velocidad del ultrasonido (V_{us}), ángulo (θ), L= dirección longitudinal, T= dirección tangencial.

Sin embargo, en el caso de la especie *Acer saccharum* su coeficiente es de 0,999 que se ajusta mucho mejor, FIGURA 7. Además, no existen en ambos casos diferencias significativas entre los valores calculados de los módulos elásticos con los encontrados de acuerdo con la ecuación de Hankinson.

FIGURA 7 - VARIACION DE LAS VELOCIDADES DE *Acer saccharum* MODELO DE REGRESION Y VALORES EXPERIMENTALES



FUENTE: SOTOMAYOR y VILLASEÑOR (2016)

LEYENDA: Velocidad del ultrasonido (V_{us}), ángulo (θ), L= dirección longitudinal, T= dirección tangencial.

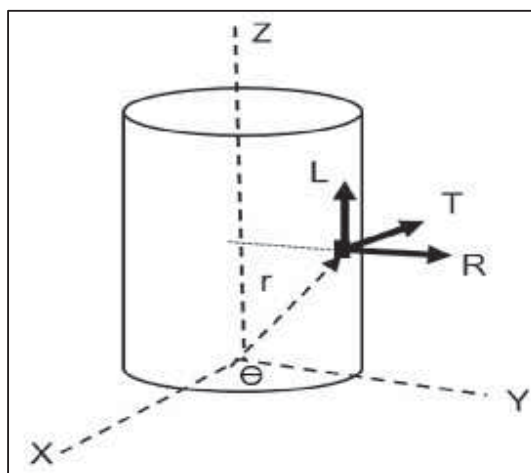
Acuña, Díez y Casado (2006), que evalúan las velocidades de ultrasonido de 30 kHz en diferentes ángulos de propagación en *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Ragús selvática* y *Chlorophora excelsa*, mostraron comportamientos similares de decaimiento de las velocidades con respecto al ángulo longitudinal, luego aplicándoles un modelo polinomial de segundo orden obtuvieron buenos resultado entre ellos, en base a pruebas estadísticas de Tukey y LSD Fisher, además de mostrar que la influencia de las dimensiones longitudinales de las probetas no fueron muy significativas. Balmori, Acuña y Basterra (2016), en el estudio de la anisotropía de las especies *Pinus sylvestris*. y *Pinus radiata* muestran una gran dispersión de las velocidades para el ángulo de 90° realizadas a lo largo de las vigas de casi 6 m de longitud.

2.3 PROPIEDADES MECANICO ELASTICAS DE LA MADERA

2.3.1 Caracterización de medios ortotrópicos

La madera debido a su crecimiento cilíndrico en el árbol puede ser considerada como un medio mecánico elástico lineal, continuo y con simetría ortotrópica para con cargas y deformaciones que no sobrepasen estos requerimientos. Pudiéndose adecuadamente, estudiarlo en un sistema de coordenadas cilíndrica (R, θ, Z), como se muestra en la (FIGURA 8), Acustic of Wood parte II, (BUCUR, 2006).

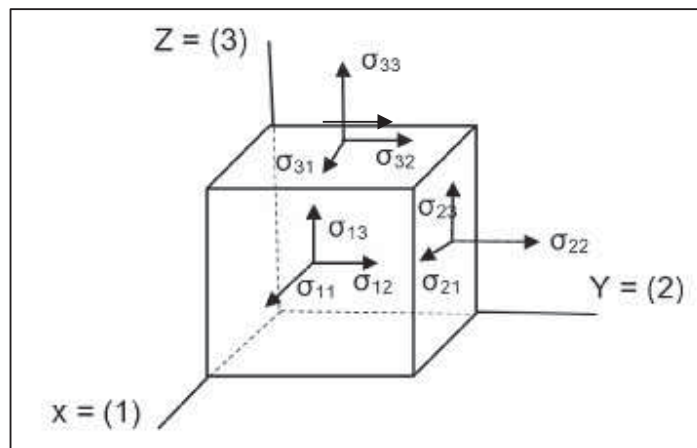
FIGURA 8 - SISTEMA DE COORDENADAS CILINDRICAS, ESTRUCTURA DE LA MADERA



FUENTE: EL AUTOR (2019)

O también, usando un sistema de coordenadas ortogonales, para describir los esfuerzos mecánicos sobre su estructura con se muestra en la (FIGURA 9). En el presente trabajo se usó el modelo lineal por ser más adecuado para el manejo de las ecuaciones como indica, (MASCIA, N., y ROCCO, F., 2006)

FIGURA 9 - SISTEMA DE ESFUERZOS LONGITUDINALES Y DE CORTE PARA LA ESTRUCTURA DE LA MADERA



FUENTE: EL AUTOR (2019)

Bucur (1984), Hernandez Sotomayor (2014) con el uso de ondas de ultrasonido y considerando a la madera un sólido elástico lineal y considerando la existencia de energía potencial elástica y su simetría ortotrópica, estudió sus propiedades mecánicas, en especial en especies de madera, utilizadas para la construcción de instrumentos musicales como el violín. Para lo cual, utilizando la ley de Hook generalizada, ecuaciones (2) y (3) y haciendo uso de la simetría ortotrópica de la estructura de la madera, se consigue que el tensor de rigidez de cuarto orden C_{ijkl} , se reduzca a nueve componentes independientes. Por lo que un material ortotropico tiene tres ejes y planos de simetría con nueve términos independientes.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2)$$

donde

i es la dirección de la tensión sobre la superficie con la fuerza normal en dirección j

o en su forma inversa:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} \quad (3)$$

donde

i, j, k y l toman los valores de 1, 2 y 3 y satisfacen la regla de sumatoria para índices repetidos

σ_{ij} = tensor de esfuerzo; en Pa

ε_{ij} = tensor de deformación; (sin unidades)

C_{ijkl} = tensor de rigidez; Pa

S_{ijkl} = tensor de complianza (1/Pa)

O también en forma matricial, matriz (4) y como también lo indica Guitard (1987).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & & & \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & & & \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & & & \\ & & & C_{2323} & & \\ & & & & C_{3131} & \\ & & & & & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

FUENTE: BUCUR (1984)

Esta matriz puede ser escrita en forma simplificada, haciendo uso de la convención de índices de Voigt, que, para el caso de la simetría ortotrópica se muestra en los cuadros siguientes:

CUADRO 1 – REDUCCION DE LOS INDICES DEL TENSOR VOIGT Y SU EQUIVALENCIA PARA MADERA

Índice ij	11	22	33	23	31	12
Índice de Voigt	1	2	3	4	5	6

FUENTE: Bucur (2006).

CUADRO 2 - INDICES DEL TENSOR DE RIGIDEZ Y SU EQUIVALENCIA PARA LA ESTRUCTURA DE LA MADERA

Tensor	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆
Equivalente en madera	C _{LL}	C _{RR}	C _{TT}	C _{TR}	G _{LT}	C _{LR}

FUENTE: Bucur (2006).

De otro lado, usando la ley de Hook en función del tensor de complianza S_{ijkl} para la simetría ortotrópica se tiene la forma matricial siguiente (MATRIZ 5):

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c}
 \begin{array}{l} \epsilon_{LL} \\ \epsilon_{RR} \\ 2\epsilon_{TT} \\ 2\epsilon_{TR} \\ 2\epsilon_{LT} \\ 2\epsilon_{LR} \end{array} & = & \begin{array}{ccc} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{array} & \begin{array}{c} \text{simétrico} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} S_{44} \\ \\ \\ S_{55} \\ \\ S_{66} \end{array} & \begin{array}{c} \sigma_{LL} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{array} & (5)
 \end{array}$$

y en su forma ingenieril (MATRIZ 6):

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c}
 \begin{array}{l} \epsilon_{LL} \\ \epsilon_{RR} \\ \epsilon_{TT} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{array} & = & \begin{array}{ccc} 1/E_L & -\nu_{LR}/E_L & -\nu_{LT}/E_L \\ \nu_{RL}/E_R & 1/E_R & \nu_{RT}/E_R \\ -\nu_{TL}/E_T & -\nu_{TR}/E_T & 1/E_T \end{array} & \begin{array}{c} \text{simétrico} \\ \\ \\ \\ \text{simétrico} \end{array} & \begin{array}{c} 1/G_{TR} \\ \\ 1/G_{LT} \\ \\ 1/G_{LR} \end{array} & \begin{array}{c} \sigma_{LL} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{array} & (6)
 \end{array}$$

donde:

$\gamma = 2\epsilon$, γ es denominado desplazamiento angular ingenieril;

ν_{ij} = es el coeficiente de Poisson que representa el factor de contracción a lo largo del eje "j" para obtener una extensión en el eje "i".

Siendo las relaciones del cambio de los elementos del tensor de rigidez y de complianza, Bucur, (1984), las siguientes ecuaciones:

$$S_{11} = \frac{C_{22}C_{33} - C_{23}^2}{\Delta C},$$

$$\begin{aligned}
S_{22} &= \frac{C_{33}C_{11}-C_{13}^2}{\Delta C}, \\
S_{33} &= \frac{C_{11}C_{22}-C_{12}^2}{\Delta C}, \\
S_{12} &= \frac{C_{23}C_{31}-C_{33}C_{21}}{\Delta C}, \\
S_{13} &= \frac{C_{21}C_{32}-C_{22}C_{31}}{\Delta C}, \\
S_{23} &= \frac{C_{13}C_{21}-C_{11}C_{23}}{\Delta C}, \\
S_{44} &= \frac{1}{C_{44}}, \\
S_{55} &= \frac{1}{C_{55}}, \\
S_{66} &= \frac{1}{C_{66}}, \\
\Delta C &= C_{11}C_{22}C_{33}+2C_{12}C_{23}C_{31}-C_{12}^2C_{23}-C_{33}^2C_{11}-C_{13}^2C_{22}.
\end{aligned} \tag{7}$$

2.3.2 Propagación de ondas de ultrasonido en medios ortotrópicos

La velocidad de la propagación de ondas elásticas de ultrasonido en medios como en la madera limpia (sin defectos), puede ser usada para la determinación de sus constantes elásticas. Sin embargo, Bucur (1984, p. 50), indica que en los materiales reales la propagación depende de la longitud de onda, de la no homogeneidad y de la viscoelasticidad, que pueden producir fenómenos de reflexión y dispersión en el material estudiado. Además, depende en gran medida de la estructura de los anillos de crecimiento, en el tamaño de las células y su alineamiento, que funcionan como guías de ondas y en el caso transversal como medios reflexivos y dispersivos. A continuación, se desarrollará las ecuaciones de propagación de ondas de ultrasonido en un material ortotrópico limpio que permitirán analizar el comportamiento de éstas dentro de bloques de madera.

La propagación de las ondas elásticas en un medio infinito está dada por la relación

$$\sigma_{ij,j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (8)$$

donde:

ρ = es la densidad aparente;

u = es el desplazamiento el índice antes de la coma indican la variable y las después sus derivadas.

De otro lado, considerando a (ϵ) la deformación del medio como:

$$\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

y aplicada a la ecuación (2), se tiene la propagación de la onda en función del desplazamiento como:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} = 0, \quad (10)$$

que representa un sistema de tres ecuaciones diferenciales de segundo orden con tres direcciones principales diferentes que permite analizar el desplazamiento de una onda elástica en un medio ortotrópico. Considerando una onda elástica plana propagándose en la dirección del vector \mathbf{p} , con el vector de desplazamiento \mathbf{u}_k en la dirección del vector \mathbf{A}_k se tiene la relación siguiente:

$$u_k = A_k \exp \left[j \omega \left(t - \frac{p_i x_i}{v} \right) \right] \quad (11)$$

donde:

p_i = cosenos directores del vector de propagación \mathbf{p} ;

ω = velocidad angular en radianes/segundo;

v = velocidad de fase ($v = \frac{\omega}{k}$) en m/s;

k = número de onda, ($k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$) en 1/cm;

λ = longitud de onda en cm.

Aplicando la relación anterior a ecuación (10) se obtiene:

$$C_{ijkl} p_l p_j A_k - \rho v^2 A_i = 0 \quad (12)$$

y definiendo el tensor de Christoffel como:

$$\Gamma_{ik} = C_{ijkl} p_l p_j \quad (13)$$

y haciendo uso de la notación de Kronecker, $A_i = A_k \delta_{ik}$, se obtiene la relación final de la ecuación (10)

$$(\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik}) \mathbf{d}_k = 0 \quad (14)$$

La cual, que permite relacionar la velocidad de fase en función de su polarización en la dirección de $\mathbf{d}_k = \mathbf{A}_k / A$, de una onda plana que se propaga en un medio material de rigidez C_{ijkl} , cuyos vectores propios estarían dados por el tensor de Christoffel, para una solución diferente de cero para \mathbf{d}_k de la ecuación 14.

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

Para el caso de materiales ortotrópicos el tensor de Christoffel se reduce a las siguientes relaciones (BUCUR, 1984):

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11} p_1^2 + C_{66} p_2^2 + C_{55} p_3^2 \\ \Gamma_{21} &= (C_{12} + C_{66}) p_1 p_2 \\ \Gamma_{13} &= (C_{13} + C_{55}) p_1 p_3 \\ \Gamma_{22} &= C_{22} p_2^2 + C_{66} p_1^2 + C_{44} p_3^2 \\ \Gamma_{23} &= (C_{23} + C_{44}) p_2 p_3 \\ \Gamma_{33} &= C_{55} p_1^2 + C_{33} p_3^2 + C_{44} p_2^2 \end{aligned} \quad (16)$$

2.3.3 Aplicaciones

En el modelo con una onda que se propaga en dirección: $p_1 = 1$; $p_2 = p_3 = 0$ se tiene en la ecuación (15):

$$\begin{vmatrix} C_{11} - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & C_{66} - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & C_{55} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

La determinante 17, que permite encontrar las velocidades siguientes:

$$v_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad \text{para la velocidad longitudinal en la dirección L;}$$

$$v_{LR} = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}} \quad \text{para la velocidad transversal polarización en la dirección T, } C_{66} = C_{LR};$$

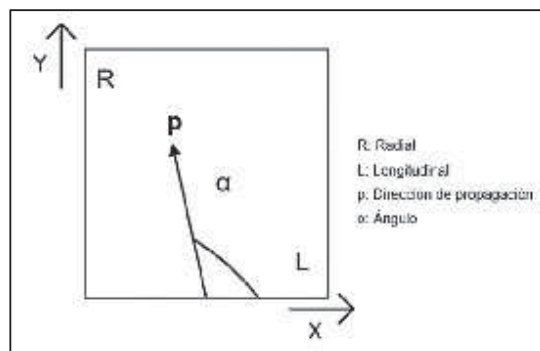
$$v_{LT} = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}} \quad \text{para la velocidad transversal polarización en la dirección R; } C_{55} = C_{LT}.$$

De la misma forma, se puede encontrar las relaciones para cualquier dirección de propagación de la onda plana en un medio ortotrópico.

2.3.4 Propagación de ondas de ultrasonido en medios ortotrópicos en direcciones no principales

Caso A.- Propagación en el plano LR como se muestra en la FIGURA 10 considerando los cosenos directores $p_1 = \cos(\alpha)$, $p_2 = \sin(\alpha)$ y $p_3 = 0$.

FIGURA 10 – PLANO XY (LR) y VECTOR DE PROPAGACIÓN P



FUENTE: EL AUTOR (2019).

Las ecuaciones (16) se reducen a:

$$\Gamma_{11} = C_{11}p_1^2 + C_{66}p_2^2$$

$$\Gamma_{21} = (C_{12} + C_{66})P_1P_2$$

$$\Gamma_{13} = 0$$

$$\Gamma_{22} = C_{22}p_2^2 + C_{66}p_1^2$$

$$\Gamma_{23} = 0$$

$$\Gamma_{33} = C_{55}p_1^2 + C_{44}p_2^2$$

(18)

Aplicando las relaciones anteriores a la ecuación (15), se tiene las relaciones siguientes:

$$(\Gamma_{33}-\rho v^2)[(\Gamma_{11}-\rho v^2)(\Gamma_{22}-\rho v^2)-\Gamma_{12}^2] = 0 \quad (19)$$

que permite encontrar primeramente la siguiente solución:

$$\Gamma_{33}-\rho v^2 = 0,$$

sustituyendo los elementos de $\Gamma_{\mathbf{3}}$, se tiene:

$$C_{55}p_1^2 + C_{44}p_2^2 - \rho v^2 = 0$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{C_{55}p_1^2 + C_{44}p_2^2}{\rho}\right)} \quad (20)$$

La cual corresponde a la velocidad de una onda transversal pura de polarización en la dirección 3 o T, la cual no es solución para el plano LR debido a que $p_3 = 0$.

De otro lado, el segundo término será:

$$(\Gamma_{11}-\rho v^2)(\Gamma_{22}-\rho v^2)-\Gamma_{12}^2 = 0$$

$$(C_{11}p_1^2 + C_{66}p_2^2 - \rho v^2)(C_{22}p_2^2 + C_{66}p_1^2 - \rho v^2) - (c_{12} + c_{66})^2 p_1^2 p_2^2 = 0$$

La cual es una ecuación de segundo grado en ρv^2 y que permite encontrar las velocidades de la onda cuasi longitudinal (QL) y, de la onda cuasi transversal (QT).

$$(\rho v^2)^2 - \rho v^2(\Gamma_{11} + \Gamma_{22}) + \Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{12}^2 = 0$$

Donde, la ecuación es cuadrática y permite dos soluciones una longitudinal y la otra transversal las cuales se denominan velocidad cuasi longitudinal (QL) y velocidad cuasi transversal (QT), no siendo necesariamente perpendiculares ente si debido la ortotropicidad de la madera.

La cuasi velocidad longitudinal es en m/s:

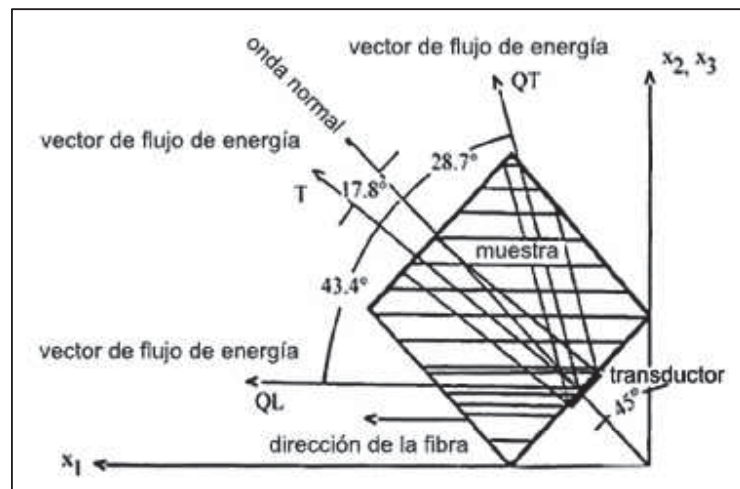
$$QL = \left[\frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{22} + [(\Gamma_{11} + \Gamma_{22})^2 - 4(\Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{12}^2)]^{1/2}}{2\rho} \right]^{1/2} \quad (21)$$

y la cuasi velocidad transversal en m/s es:

$$QT = \left[\frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{22} - [(\Gamma_{11} + \Gamma_{22})^2 - 4(\Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{12}^2)]^{1/2}}{2\rho} \right]^{1/2} \quad (22)$$

La FIGURA 11 muestra la propagación de una onda de ultrasonido en un ángulo de 45° con un eje principal de la madera, donde se produce la birrefringencia de acuerdo a la ley de Snell para la refracción y reflexión formándose las cuasi velocidades QL y QT, además de una componente de polarización transversal T.; indicado por (MACKENCIE 2009)

FIGURA 11 - PLANO LR y VECTOR DE PROPAGACIÓN DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y T



FUENTE: BUCUR (2006)

En las ecuaciones anteriores elevándolas al cuadrado y multiplicándolas se tiene:

$$\rho QL^2 \rho QT^2 = (C_{11}p_1^2 + C_{66}p_2^2)(C_{22}p_2^2 + C_{66}p_1^2) - (C_{12} + C_{66})^2 p_1^2 p_2^2 \quad (23)$$

despejando C_{12} , se obtiene:

$$C_{12} = \frac{[(C_{11}p_1^2 + C_{66}p_2^2)(C_{22}p_2^2 + C_{66}p_1^2) - \rho^2 QL^2 QT^2]^{1/2}}{p_1 p_2} - C_{66} \quad (24)$$

En forma similar se puede determinar los coeficientes de rigidez C_{13} y C_{23} para el caso C_{13} , con los cosenos directores $p_1 = \cos(\alpha)$, $p_2 = 0$ y $p_3 = \sin(\alpha)$:

$$C_{13} = \frac{[(C_{11}p_1^2 + C_{55}p_3^2)(C_{33}p_3^2 + C_{55}p_1^2) - \rho^2 QL^2 QT^2]^{1/2}}{p_1 p_3} - C_{55} \quad (25)$$

Caso C_{23} coseno director $p_1 = 0$, $p_2 = \cos(\alpha)$ y $p_3 = \sin(\alpha)$:

$$C_{23} = \frac{[(C_{22}p_2^2 + C_{44}p_3^2)(C_{44}p_2^2 + C_{33}p_1^2) - \rho^2 QL^2 QT^2]^{1/2}}{p_2 p_3} - C_{44} \quad (26)$$

Las ecuaciones de las cuasi velocidades y los coeficientes de rigidez permitirán elaborar los modelos de propagación por las estructuras de madera en los planos LR y LT respectivamente.

2.4 ONDAS ACUSTICAS DISPERSADAS POR CAVIDADES CILINDRICAS

2.4.1 Consideraciones iniciales del problema

El presente análisis desarrolla las relaciones matemáticas para evaluar la dispersión de ondas acústicas por cavidades ubicadas dentro de materiales sólidos y modelarlo físicamente. Para lo cual, se utilizarán bloques de madera con dimensiones mayores en las caras LR y LT, por lo que se podría considerar condiciones cuasi de 2D, con cavidades perforadas cilíndricamente de diferentes diámetros y cuyos ejes principales sean perpendiculares a las caras mencionadas y en las direcciones R o T de los bloques. De otro lado, se considera que la mayor parte de la dispersión se produce en el área alrededor de las secciones transversales de las cavidades lo que permite aplicar la condición de campo cercano.

2.4.2 Dispersión elástica de una onda esférica con polarización longitudinal (P) por cavidades cilíndricas.

Se considera un frente de onda esférica propagándose en el plano xy, polarizada longitudinalmente en el eje radial (r) cuya fuente se encuentra sobre el mismo eje y a una distancia (r_0) del centro de la cavidad, para un material isotrópico, Graff (1975), Morse y Uno Ingard (1986) y Skudrzyk (1971), (FIGURA 12).

El campo de desplazamiento de la onda está dado por:

$$\begin{aligned} u_r &= u(x, y, t), \\ u_z &= 0 \end{aligned} \tag{27}$$

Luego, la ecuación de la función desplazamiento de la onda en el medio será:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{28}$$

Dónde:

∇^2 es el laplaciano de una función.

La superficie de la cavidad se encuentra libre y no sujeta a tracción y requiere las condiciones de contorno:

$$\tau_{rr} = \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (29)$$

para $r = a$

donde:

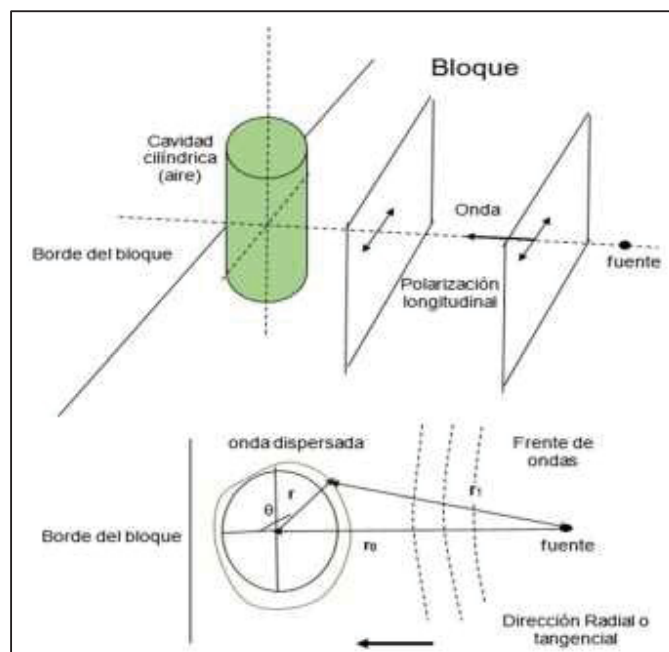
T son los esfuerzos de tensiones y corte respectivos.

Las condiciones de contorno exigen que las velocidades radiales en la frontera de las ondas incidentes y dispersada sean iguales y de sentido contrario anulándose mutuamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial u_s}{\partial r} = 0 \quad (30)$$

Donde, u_i es la onda incidente y u_s es la onda dispersada hacia fuera de la cavidad (FIGURA 12).

FIGURA 12 - DIAGRAMA EXPERIMENTAL DE DISPERSION DE ONDAS DE ULTRASONIDO POR LAS CAVIDADES CILINDRICAS



FUENTE: EL AUTOR (2019).

2.4.3 Solución por medio de la expansión en series de la onda incidente esférica

Considerando una onda esférica de la función de desplazamiento incidente (u_i) y propagándose desde la fuente posición y_0 en un medio isotrópico con polarización longitudinal para una onda plana:

$$u_i = U_0 \exp\{i(\omega t - kr_1)\} = U_0 e^{-i\omega t} e^{ikr_1} \quad (31)$$

donde:

$k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda;

c : es la velocidad del sonido en el medio;

$\omega = ck$: es la velocidad angular de la onda;

f : es la frecuencia de la onda;

kr es producto número de onda con la distancia a la fuente.

De la FIGURA 12 se tiene para posiciones cercanas al cilindro $r_0 > r$ y usando la ley de cosenos en el triángulo formado por los vectores \mathbf{r} , \mathbf{r}_0 y \mathbf{r}_1 , se tiene:

$$kr_1 = (r_0^2 + r^2 + 2r_0 r \cos\theta)^{1/2}$$

y considerando que $(r/r_0)^2 \sim 0$, y multiplicando la relación con el número de onda k ,

$$kr_1 = kr_0 \left(1 + 2 \left(\frac{r}{r_0}\right) \cos\theta\right)^{1/2} \sim kr_0 \left(1 + \left(\frac{r}{r_0}\right) \cos\theta\right),$$

en la ecuación (31)

$$u_i = U_0 e^{-i\omega t} e^{ikr_1} \cong U_0 e^{-i\omega t} e^{ikr_0} e^{-ikr \cos\theta} e^{ikct},$$

haciendo $U_0 = U_0 e^{-i\omega t} e^{ikr_0}$ como una nueva constante, se obtiene:

$$u_i = U_0 e^{-ikr \cos\theta} e^{ikct} = U_i e^{ikct}, \quad (32)$$

de la misma forma haciendo $U_i = U_0 e^{-ikr \cos\theta}$

donde, U_i es una onda plana, que se puede expandir en series de Bessel sin la componente temporal (PAO y MOW, 1973):

$$U_i(r, \theta) = U_0 \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-1)^m J_m(kr) \cos(m\theta) \quad (33)$$

donde:

$$\epsilon_0 = 1;$$

$$\epsilon_m = 2 \text{ para todo } m \neq 0.$$

2.4.4 Desarrollo de la onda dispersada por la cavidad cilíndrica

Como las ondas incidentes y la dispersada son independientes, se puede aplicar la ecuación (28) para encontrar la función de desplazamiento dispersada, que es:

$$u_s = e^{-ikr} \Theta e^{i\omega t} = R\Theta e^{i\omega t} = U_s e^{i\omega t} \quad (34)$$

donde:

Θ es la función angular; R es la función radial de la onda dispersada, con soluciones para Θ igual a:

$$\Theta = A \cos(k\theta) + B \sin(k\theta) \quad (35)$$

donde:

$B = 0$ por simetría de la solución y k sea un número entero.

Y la solución para R como:

$$R = C_m H_m^{(2)}(kr) + D_m H_m^{(1)}(kr) \quad (36)$$

donde:

H son las funciones de Hankel de 1^{ra} y 2^{da} orden.

Como la onda difractada se dirige hacia afuera de la cavidad hace que $D_m = 0$ haciendo que la solución del campo de desplazamiento dispersada atemporal sea:

$$U_s(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m H_m^2(kr) \cos(m\theta) \quad (37)$$

haciendo $A_m = AC_m$.

2.4.5 Solución total del proceso de dispersión debida a las cavidades cilíndricas

Cuando la onda incidente de desplazamiento es dispersada por la superficie del cilindro se genera la onda de dispersión, la cual conjuntamente con la onda incidente genera un campo acústico total:

$$U_t = U_i + U_s \quad (38)$$

De otro lado, en condiciones estacionarias, sin considerar el factor $e^{-i\omega t}$:

$$U_t = U_i(r, \theta) + U_s(r, \theta)$$

$$U_t = U_0 \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-1)^m J_m(kr) \cos(m\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m H_m^2(kr) \cos(m\theta)$$

Aplicando las condiciones de contorno de la relación 30, se tiene:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left\{ U_0 \varepsilon_m (-1)^m \frac{dJ_m(kr)}{dr} + A_m \frac{dH_m^{(2)}(kr)}{dr} \right\} \cos(m\theta) e^{i\omega t} = 0$$

luego para $r = a$, el constante A_m tendrá los siguientes valores:

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{-\varepsilon_m (-1)^m U_0 J_m'(ka)}{H_m^2(ka)} \\ A_0 &= \frac{-U_0 J_1'(ka)}{H_1^2(ka)} \\ A_m &= \frac{-2(-1)^m U_0 (J_{m+1}(ka) - J_{m-1}(ka))}{H_{m+1}^2(ka) - H_{m-1}^2(ka)} \end{aligned} \quad (39)$$

Utilizando la relación $H_m^2(ka) = J_m(ka) - iY_m(ka)$ se puede escribir las relaciones:

$$A_0 = U_0 \frac{1}{1 - i \frac{Y_1}{J_1}}, \quad A_m = -2(-1)^m U_0 \frac{1}{1 - i \frac{Y_{m+1} - Y_{m-1}}{J_{m+1} - J_{m-1}}}$$

y utilizando la relación algebraica $\frac{1}{1-iq} = \frac{1}{1+q^2} + \frac{iq}{1+q^2}$, haciendo $q = \cot(\gamma_0)$,

donde:

$$\cot(\gamma_0) = \frac{Y_1(ka)}{J_1(ka)} \quad \text{y} \quad \cot(\gamma_m) = \frac{Y_{m+1}(ka) - Y_{m-1}(ka)}{J_{m+1}(ka) - J_{m-1}(ka)}$$

se obtiene:

$$\gamma_0 = \text{acot} \left(\frac{Y_1(ka)}{J_1(ka)} \right), \quad \gamma_m = \frac{Y_{m+1}(ka) - Y_{m-1}(ka)}{J_{m+1}(ka) - J_{m-1}(ka)}$$

que representan la fase de la onda dispersada alrededor del cilindro, (Morse y Uno Ingard, 1968).

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\begin{aligned} A_0 &= -iU_0 \text{sen}(\gamma_0) \exp(-i\gamma_0) \\ A_m &= 2(-1)^{m+1} U_0 \text{sen}(\gamma_m) \exp(-i\gamma_m) \end{aligned}$$

Luego, la solución de la onda de desplazamiento dispersada por el cilindro será:

$$\begin{aligned} u_s(r, \theta, t) &= U_0 e^{i\omega t} \left\{ -i \text{sen}(\gamma_0) \exp(-i\gamma_0) H_0^2(kr) + \right. \\ &\quad \left. 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} \text{sen}(\gamma_m) \exp(-i\gamma_m) H_m^2(kr) \cos(m\theta) \right\} \end{aligned} \quad (40)$$

En forma similar, tanto la función de desplazamiento y la función de presión no dependen de la variación temporal, como es el caso de la función de velocidad, por lo que ambas deben de tener el mismo comportamiento, señalado por Graff (1975), luego se tiene que:

$$p_s(r, \theta, t) = P_0 e^{i\omega t} \left\{ -i \text{sen}(\gamma_0) \exp(-i\gamma_0) H_0^2(kr) + \right.$$

$$2 \sum_{m=1}^{\infty} (-i)^{m+1} \sin(\gamma_m) \exp(-i\gamma_m) H_m^2(kr) \cos(m\theta) \quad (41)$$

donde:

$p_s = P_s e^{i\omega t}$ y P_0 es el módulo de la presión incidente.

Skudryk (1971) desarrollo la ecuación para cavidades cilíndricas con valores de (kr) pequeñas, campo cercano, que dispersan ondas planas en estado estacionario, siendo la relación:

$$P_s = P_0 \frac{2\pi^2 a^2}{\sqrt{r\lambda^3}} \left[\frac{1}{2} + \cos(\theta) \right] e^{-i\left(kr + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (42)$$

para lo cual se usó la relación encontrada por Morse (1968) de $\gamma_0 = \gamma_1 = \pi(ka/2)^2$ y las relaciones siguientes de Hankel de segundo orden:

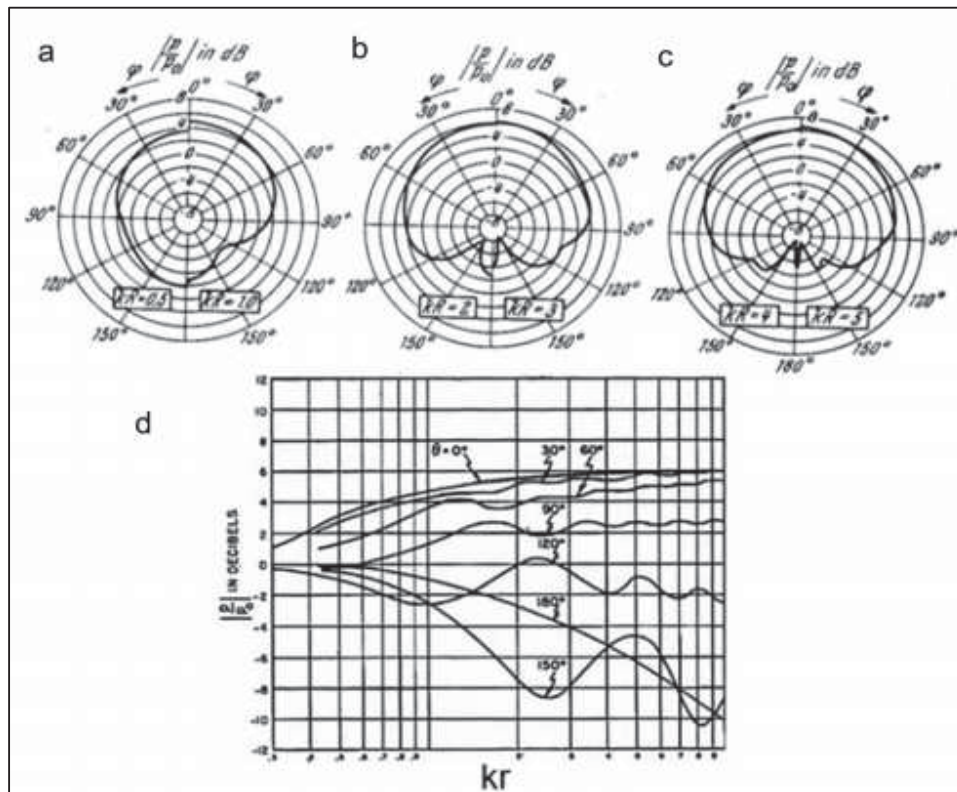
$$H_0^2 = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-i\left(kr - \frac{\pi}{4}\right)} \quad y \quad (43)$$

$$H_1^2 = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-i\left(kr - 3\frac{\pi}{4}\right)} \quad (44)$$

para la solución de campo cercano, e igualando los desfases de las relaciones de Hankel H_1 y H_2 .

Wiener citado por Skudrzyk (1971) usando unos cilindros de madera de 9,7cm de diámetro en una cámara anecoica, midió la dispersión de ondas de 200 a 6000 Hz a 0,1cm de la superficie de los cilindros, obteniendo los gráficos que se muestran, indicando que el campo detrás de los cilindros casi no es perturbado, como se muestra en la FIGURA 13. Luego, tomando ángulos fijos de θ como 0° , 60° , 180° y otros, determino los valores de la presión $\frac{|P_s|}{|P_0|}$ para cada ángulo en función de los valores de (kr) como se muestra en la (FIGURA 13).

FIGURA 13 - GRAFICOS LOBULOS DE LA DISPERSION DE UNA ONDA PLANA POR CILINDROS DE MADERA CON DISTINTOS VALORES DE (KR) Y GRAFICO DE LA DISPERSION PARA DIFERENTES ANGULOS



FUENTE: Skudrzyk (1971).

LEYENDA: a) KR de 0,5 a 1,0 (b); KR de 2 a 3 (c); KR de 4 a 5 (d); Gráfico de dispersión

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Caracterización preliminar de las especies *Entandrophragma sp* y *Cedrela odorata*

La especie de madera estructural usada en los monumentos históricos en el Perú fue principalmente de la especie sapelli o caoba africana (*Entandrophragma sp*) que, debido a las dificultades en adquirirla en el Perú, se buscó sustituirla por una madera de la misma familia (Meliaceae) pero existente en el país, escogiéndose la especie cedro (*Cedrela odorata*) por las facilidades de encontrarla dentro del mercado peruano.

Las muestras de maderas que se seleccionaron provienen del monumento histórico Hotel El Comercio, en el caso de sapelli o caoba africana (*Entandrophragma sp*) y del Proyecto “Evaluación dendrológica y anatómica de las especies del género cedrela”, para el caso de *Cedrela odorata*. Con este propósito, se realizaron la caracterización anatómica, determinaciones de la densidad, módulo de elasticidad en flexión estática y módulo de elasticidad dinámico; así como pruebas de ultrasonido.

3.1.2 Caracterización anatómica.

Las muestras de madera orientadas en los tres planos: transversal, radial y tangencial son sumergidos en agua en ebullición para su ablandamiento. Luego, son fijados en el micrótopo de deslizamiento para obtener cortes histológicos en las tres secciones mencionadas, con espesor entre 15-20 μm ., que son transferidos a placas Petri, previamente tratados con hipoclorito de sodio al 20%, deshidratados en alcohol de: 30°, 60° y 96°; coloreados con safranina y montados en láminas de vidrio con Merkoglass como adherente (JOHANSEN 1940, SASS 1958). Con dichas secciones de láminas histológicas permanentes, se realizaron la descripción cualitativa y cuantitativa en poros y vasos. Para las mediciones de la longitud, diámetro, lumen y espesor de pared de las fibras el material de estudio pasó por un proceso de maceración utilizando peróxido de hidrogeno; según método indicado por Dadswell (1972); al igual que las láminas de

secciones, se prepararon láminas permanentes de fibras y vasos, luego del lavado con agua destilada y coloreado con safranina. Se realizaron 25 mediciones; para la longitud, diámetro, lumen y espesor de pared de las fibras. Mediante un Microscopio Leica DM750 con software LAZ de Leica conforme a lo indicado por IAWA (1989). La descripción anatómica se realizó teniendo en consideración la norma del IBAMA (1991) y la List of microscopic feature for hardwood identification (IAWA, 1989).

3.1.3 Caracterización preliminar destructiva de las especies *Entandrophragma sp* y *Cedrela odorata* utilizadas

Se realizaron los ensayos de propiedades físicas y mecánicas en la madera, de acuerdo a los métodos indicados en las Normas Técnicas Peruanas (NTP) (2014), las cuales se muestran en el Cuadro 3 y los ensayos de las probetas se realizaron en la prensa universal de ensayo de Materiales Electromecánica Eurotest-100, del Laboratorio del Instituto Tecnológico de Producción- Red CITE Madera. La FIGURA 14 ilustra el ensayo de flexión estática.

FIGURA 14 - ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA



FUENTE: EL AUTOR (2019).

CUADRO 3 – NORMAS TECNICAS PERUANAS (NTP), EMPLEADAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA.

PROPIEDADES FÍSICAS	NORMAS
Método para determinar el contenido de humedad	NTP 251.010
Método para determinar la densidad	NTP 251.011
PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMAS
Método de ensayo de flexión estática-método secundario	NTP 251 017

FUENTE: EL AUTOR (2019).

Respecto a determinación de la flexión estática mediante la prensa universal FIGURA 14, el método secundario estipula que las dimensiones de las probetas son de 25 x 25 x 410 mm con una luz de 350 mm. y velocidad de la cabeza móvil de 0,05 pulg/min (1.3 mm/min). La expresión para el determinar el módulo de elasticidad según la Norma Técnica Peruana, (NTP 251 017) (2014), es la siguiente:

$$MOE = \frac{(PL^3)}{(4ae^3y)} \quad (45)$$

dónde:

P= Carga al límite proporcional (kg)

L= Luz de la probeta (cm)

a= Ancho de la probeta (cm)

e = Espesor de la probeta (cm)

y = Deflexión en el centro de la luz al límite proporcional (cm.)

Las probetas de madera fueron estabilizadas por 48 horas en condiciones de laboratorio para un contenido de humedad de equilibrio del 12%. El número de repeticiones fueron de 20, debido a las limitaciones impuestas por su carácter histórico.

3.1.4 Caracterización de las propiedades mecánicas no destructivas de especies en estudio:

Para la caracterización de las propiedades mecánicas no destructivas se prepararon 60 probetas siguiendo las diferentes direcciones: longitudinal, radial, tangencial con dimensiones de 2 x 2 x 2 cm, estabilizadas previamente en la cámara

climática en el laboratorio de Propiedades Mecánicas de la Universidad Nacional agraria La Molina y acondicionadas en condiciones ambientales del Laboratorio de Física de la Universidad de Bio Bio, Concepción, Chile, a 20 °C de temperatura y 66 % de humedad relativa, para alcanzar un contenido de humedad de equilibrio del 12 %, distribuidas de la siguiente forma:

- muestras antiguas de Monumento Histórico, Hotel Comercio Lima, tres vigas con 60 probetas.
- *Cedrela odorata*: muestras provenientes de departamento de Ucayali, Atalaya, Perú de tres árboles con 60 probetas.

Las pruebas se realizaron usando el equipo Parametric 5800PR OLIMPUS NDT, en las que se colocaron los sensores de polarización longitudinal de 1MHz y se midieron los tiempos de propagación de las ondas de ultrasonido con precisión de +/- 0,1micro segundo y con las dimensiones de las probetas medida con precisión de +/- 0,01cm. Luego se determinaron las velocidades de propagación en las direcciones mencionadas. Para el caso de la propagación transversal, con los sensores respectivos y cuidando la orientación del sensor, en la dirección señalada (como la medición en la dirección de propagación radial y polarización tangencial para el caso de la medición en la cara RT de la probeta). Se midieron los tiempos de propagación y luego las velocidades respectivas en las direcciones L,R y T, y velocidades de corte LR, LT, RT. La FIGURA 15, muestra el equipo utilizado.

Con la información obtenida y los valores de las densidades aparentes respectivas se calcularon de los módulos elásticos (MOES) en las direcciones: L, R y T y los módulos de corte G(L), G(LT) y G(RT) de acuerdo con la relación para los módulos elásticos o de corte siguiente. (ECUACION 46)

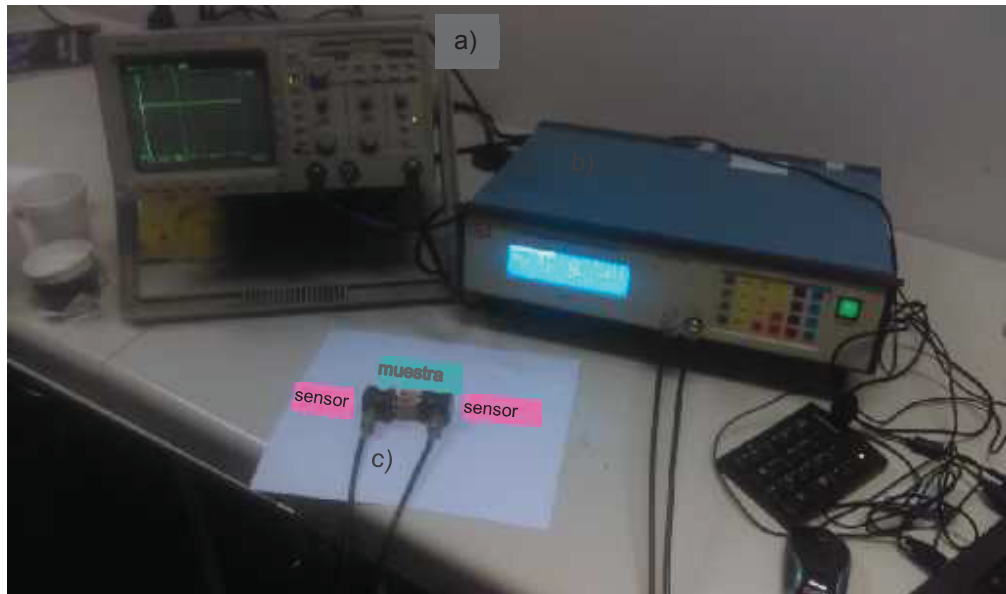
$$\text{MOES} = V^2 \rho \quad (46)$$

donde:

V = la velocidad de la onda en m/s

ρ = la densidad aparente en kg/m³

FIGURA 15 - EQUIPO DE PRUEBA DE ULTRASONIDO PARAMETRIC 5800PR OLIMPUS DE 1MHz



FUENTE: EI AUTOR (2018)

LEYENDA: a) Osciloscopio, b) Equipo de ultrasonido OLIMPUS, c) Sensores y muestras

3.1.5 Características de la *Cedrela odorata* como material usado en el estudio

Se tomó seis bloques de *Cedrela odorata* provenientes de la zona Ucayali, Pucallpa Perú con dimensiones:

Bloque 1: L = 39,4 cm, R = 15,5 cm y T= 7cm, cara longitudinal-radial (LR)

Bloque 2: L = 40,0 cm, R = 20,0 cm y T= 7,8 cm, cara longitudinal-radial (LR)

Bloque 3: L = 39,6 cm, T = 19,6 cm y R= 7,6 cm, cara longitudinal-tangencial (LT)

Bloque A: L = 36,4 cm, R = 16,2 cm y T= 6,5 cm, cara longitudinal-radial (LR)

Bloque B: L = 40,0 cm, R = 20,0 cm y T= 7,9 cm, cara longitudinal-radial (LR)

Bloque D: L = 44,9 cm, R = 19,1cm y T= 12,3 cm, cara longitudinal-radial (LR)

Las pruebas se realizaron de la siguiente forma: En los bloques 1, 2 y 3, (FIGURA 16 y 17), se efectuarán pruebas con cavidades perforadas transversalmente, y en los bloques A, B y D, se utilizaron para las pruebas con cavidades longitudinales. La FIGURA 18 muestra el bloque D con cavidad central.

FIGURA 16 - BLOQUE 2, PLANO TRANSVERSAL (RT)



FUENTE: EL AUTOR (2019).

FIGURA 17- BLOQUE 3, PLANO TRANSVERSAL (RT)



FUENTE: EL AUTOR (2019).

FIGURA 18 - BLOQUE D, PLANO TRANSVERSAL (RT)



FUENTE: EL AUTOR (2019).

3.1.6 Equipos de Laboratorio

- 1 equipo de ultrasonido FAKOPP Micro Timer de 23 kHz,
- 1 equipo de ultrasonido OLIMPUS Parametric 5800PR de 1MHz,
- 1 Tomógrafo acústico Arborsonic 3D Fakopp,
- Medidor de contenido de humedad Sanko TH-2C.

Para lo cual se utilizará el equipo Micro Timer en la determinación de las velocidades de propagación de las ondas de ultrasonido en los bloques *de Cedrela odorata*, el equipo OLIMPUS se usará para caracterizar las especies en estudio, y el medidor de contenido de humedad para el control del proceso.

3.2 METODOS

3.2.1 Pruebas preliminares para establecer la geometría de las cavidades para el estudio usando tomografía acústica en las vigas de *Entandrophragma* sp antiguas

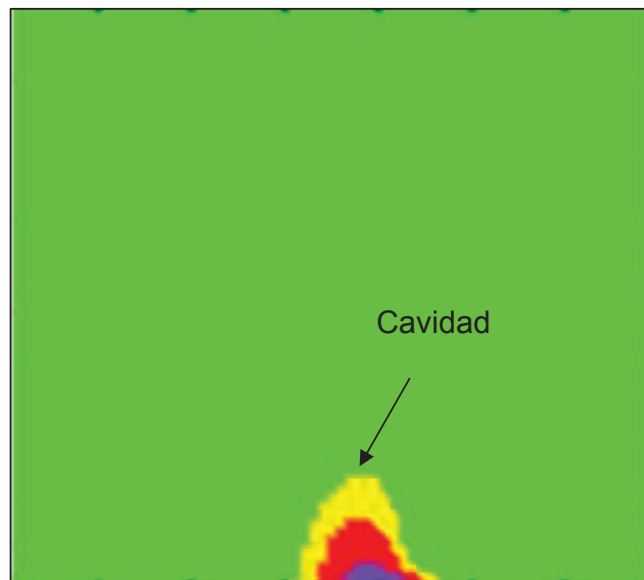
Con la finalidad evaluar las cavidades en vigas antiguas del monumento histórico se tomó una muestra de una viga del Hotel el Comercio Lima Perú, haciendo uso de un tomógrafo ArborSonic 3D FAKOOP como se muestra en la FIGURA 19 y con la disposición del equipo a la altura de las cavidades, se obtuvo la tomografía como se muestra en la (FIGURA 20).

FIGURA 19 - PREPARACIÓN DE LA PRUEBA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA EN LA VIGA USANDO LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES EN LÍNEAS PARALELAS PARA MUESTRAS DE SECCIONES RECTANGULARES



FUENTE: EL AUTOR (2019).

FIGURA 20 - TOMOGRAFIA DEL CORTE DEL BLOQUE



FUENTE: EL AUTOR (2019)

De otro lado, se practicó un corte transversal del bloque mostrando la cavidad producida por el ataque, el cual se muestra en forma circular, generalmente rodeando los anillos de crecimiento con preferencia con ataque en la zona temprana entre los anillos, FIGURA 21. Lo cual permitió definir la geometría de las cavidades para ser usado en el modelo.

FIGURA 21 - CORTE TRANSVERSAL DE LA MUESTRA EN LA ALTURA DONDE SE EFECTUÓ LA TOMOGRAFÍA, EN LA PARTE INFERIOR SE NOTA LA FORMA DEL ATAQUE DE LAS TERMITAS EN FRANJAS CIRCULARES



FUENTE: EL AUTOR (2019).

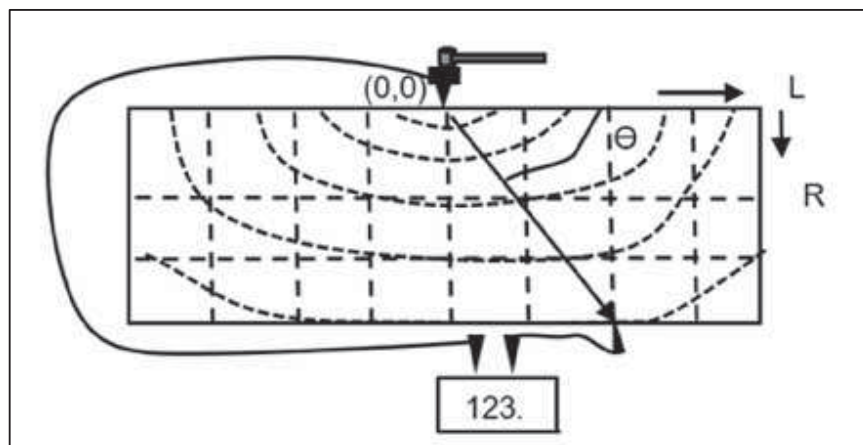
3.2.2 Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades anisotrópicas por la Ecuación Hankinson

En el presente trabajo, usando la ecuación de Hankinson se evaluarán primeramente los bloques sin perforaciones para luego proceder a hacer las comparaciones con los bloques con perforaciones tanto transversales en las caras LR o LT.

Caracterización de las propiedades anisotrópicas de los bloques de madera 1,2 y 3 con o sin cavidades transversales.

- a- Determinación de las características básicas de los bloques como dimensiones, masa, contenido de humedad.
- b- Evaluación de bloques sin cavidades. Se procede primeramente a efectuar un grillado de 2 x 2 cm en la cara en estudio, ubicando el punto (0,0) en el medio la arista de la dirección longitudinal (FIGURA 22). Luego, se procede a determinar las velocidades referenciales en las direcciones longitudinal y transversal de cada bloque de acuerdo con la ecuación del modelo, colocando para ello, los sensores en las caras laterales del bloque con un total de 27 mediciones en tres niveles.

FIGURA 22 - DISPOSICIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

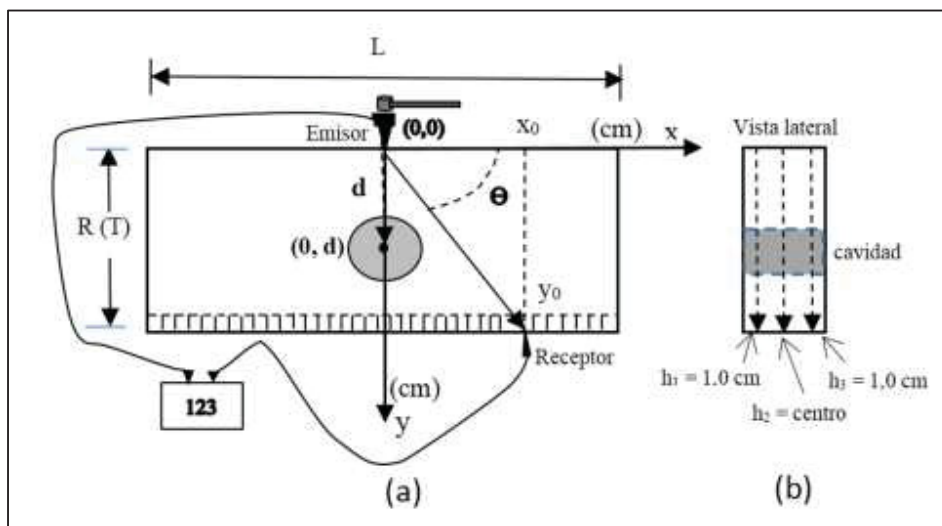


FUENTE: EL AUTOR (2019).

- c- Posteriormente, con los bloques sin cavidad, se procede a las mediciones de las velocidades en las diferentes direcciones angulares, para lo cual se ubica el sensor emisor en el punto (0,0) y se mide los distintos valores del tiempo de propagación al sensor receptor que se ubica en los distintos vértices de las grillas localizadas de la arista inferior, usando el ángulo (θ) para ubicar cada vértice con el eje longitudinal del lado derecho del bloque (FIGURA 23) en tres niveles con respecto a la cara en estudio: en la superficie, en medio y en el fondo, con un total de 306 mediciones por bloque. Paralelamente, se calculan las velocidades para los mismos ángulos usando la ecuación de Hankinson con un valor inicial de "n" de 1,7 que se ajustará posteriormente.

d- Evaluación de los bloques con cavidades. En este caso, se perforan las cavidades perpendiculares a la cara en estudio con diferentes diámetros y posiciones (FIGURA 23 y 24). Ubicándose el centro de las cavidades a diferentes distancias de la fuente emisora. Por cada cavidad se efectuarán mediciones de velocidades de propagación en forma similar a las realizadas anteriormente sin cavidad, con un total de 306 mediciones en tres niveles.

FIGURA 23 - DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES PARA USAR EL MODELO ANISOTRÓPICO FUENTE CENTRAL



FUENTE: EL AUTOR (2019).

FIGURA 24 - DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES CON EL EQUIPO DE ULTRASONIDO MICRO TIMER BLOQUE 1



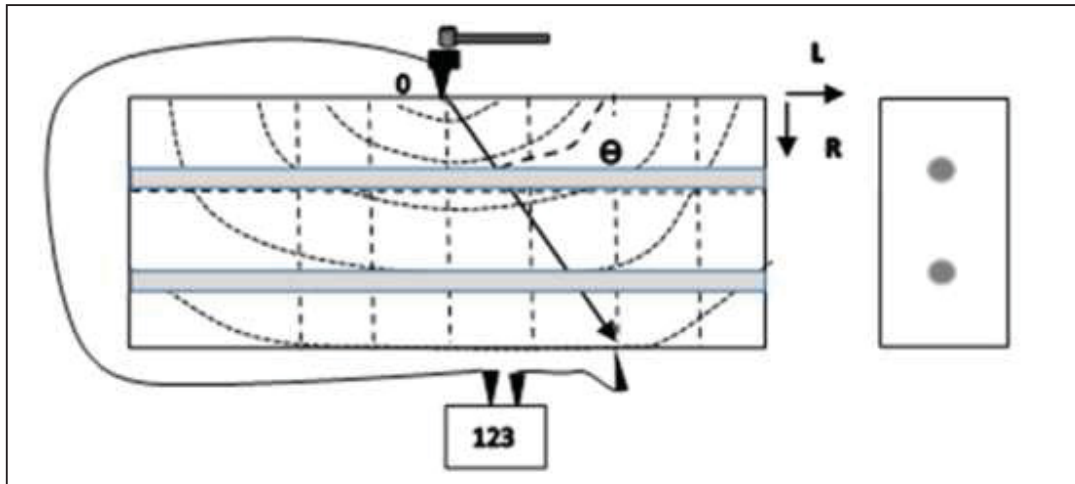
FUENTE: EL AUTOR (2019).

3.2.3 Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades anisotropías de los bloques A, B y D de madera para cavidades perforadas longitudinalmente.

- a- Determinación de las características básicas de los bloques como dimensiones, masa, contenido de humedad
- b- Evaluación del bloque sin cavidad. Se procede primero, a efectuar un grillado de 2 x 2 cm en la cara en estudio (LR), ubicando el punto (0,0) en el medio la arista de la dirección longitudinal (FIGURA 25). Luego, para implementar la ecuación del modelo de Hankinson se procede a determinar las velocidades referenciales en las direcciones longitudinal y transversal de cada bloque, ecuación (1), colocando para ello los sensores en las caras laterales del bloque con un total de 27 mediciones en tres niveles.
- c- Posteriormente con los bloques sin cavidad, se procede a la determinación de las velocidades en las diferentes direcciones angulares, para este efecto, se ubica el sensor emisor en el punto (0,0) y se miden los distintos valores del tiempo de propagación y distancia al sensor receptor que se ubica en los distintos vértices de la grilla localizada de la arista inferior, usando el ángulo (θ) con el eje longitudinal del lado derecho del bloque, para ubicar cada vértice FIGURA 25. Se repite el procedimiento en tres niveles (1,5; 3,5 y 5,5 cm) para los bloques A y B y para los niveles de (2, 4 y 6 cm) para el bloque D con respecto a la cara (LR), con un total de 306 mediciones por bloque. En forma paralela se calculan las velocidades para los mismos ángulos y niveles usando la ecuación de Hankinson con un valor inicial de "n" de 1,6 o 1,7 que se ajustará posteriormente.
- d- Evaluación de los bloques A y B con cavidades. En este caso, se perforan cavidades longitudinales de 16 mm de diámetro en diferentes posiciones, siendo en el bloque A de 1 a 7 perforaciones y en el B de 1 a 6 perforaciones, ubicándose las cavidades simétricamente como se muestra en las FIGURA 25 y 26 con mediciones en los 3 niveles indicados. Por cada perforación se medirán las velocidades de propagación en forma similar a las realizadas

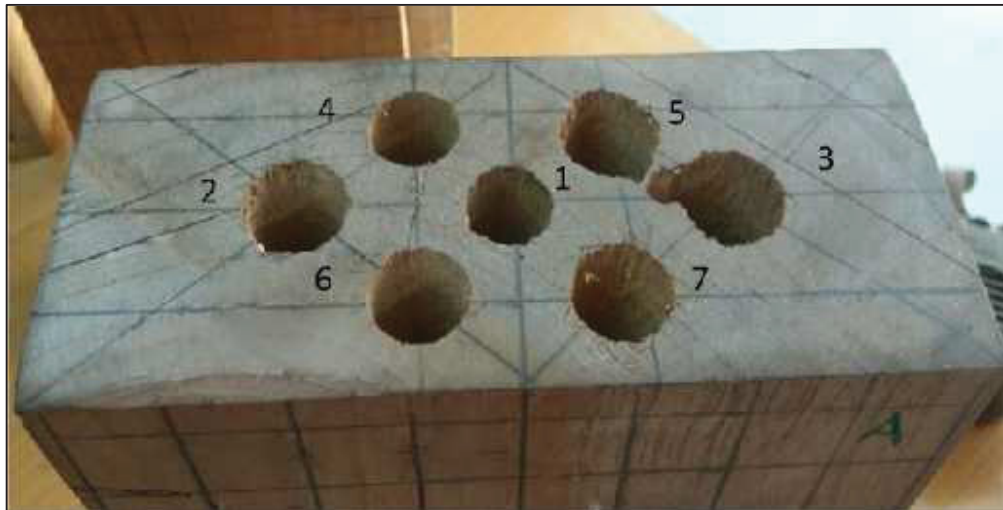
anteriormente de acuerdo al procedimiento “b”, con un total de 306 mediciones en tres niveles.

FIGURA 25 - DISPOSICIÓN DE LA MEDICIONES CON UN BLOQUE CON PERFORACION LONGITUDINAL



FUENTE: EL AUTOR (2019).

FIGURA 26 - BLOQUE “A” *Cedrela odorata* DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES LONGITUDINALES DE 16 mm DE DIAMETRO

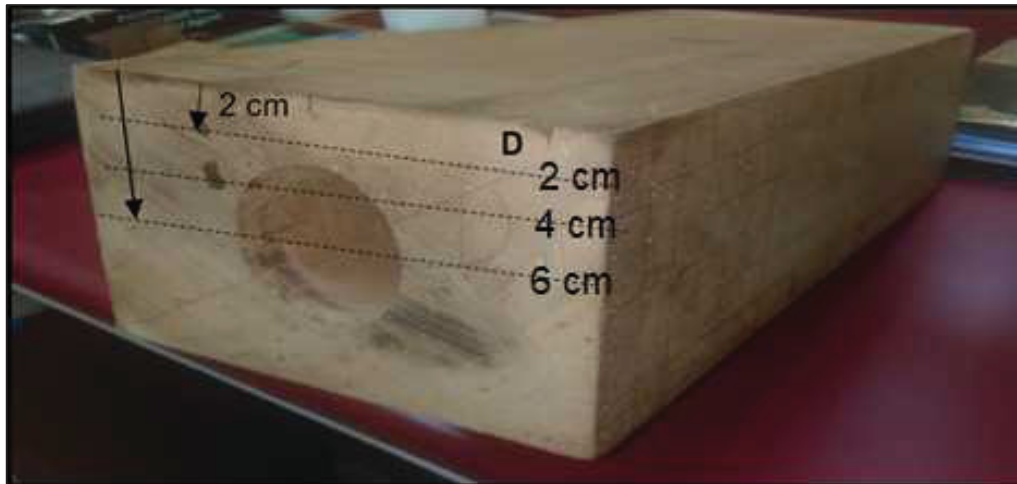


FUENTE: EL AUTOR (2019).

e- Evaluación del bloque D, en este bloque se harán perforaciones sucesivas de 16, 38,1 y 60 mm de diámetro en el mismo eje central, efectuándose

mediciones como se indica en el paso “b” en cada una de ellas, en diferentes niveles de 2, 4, 6 y 10 cm (FIGURA 27).

FIGURA 27 - BLOQUE D, DISPOSICIÓN DE LAS MEDICIONES CON PERFORACION LONGITUDINAL Y NIVELES DE MEDICION



FUENTE: EL AUTOR (2019).

3.2.4 Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera 1,2 y 3.

Con la finalidad de desarrollar el modelo de la interacción de las ondas de ultrasonido en materiales como madera es importante conocer sus características ortotrópicas de los bloques en estudio, lo cual indica conocer los diferentes módulos elásticos del material y que actúan en el proceso e interacción.

Una vez determinados los módulos elásticos, se puede generar el modelo ortotrópico usando el tensor de Christoffer y calculando las cuasi velocidades ecuaciones (21 y 22) y variando las direcciones de propagación angularmente, como los muestra en la FIGURA 28.

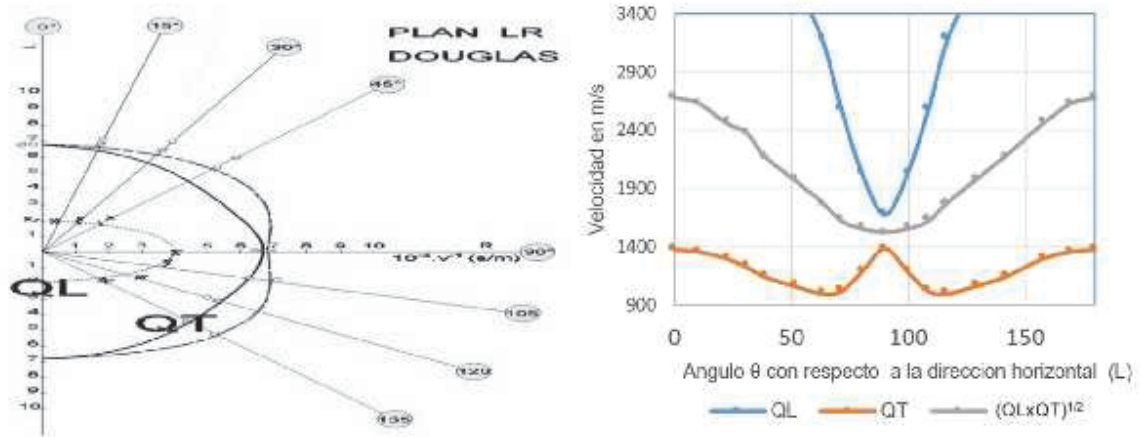
La metodología adoptada fue la siguiente: concluidas las pruebas del modelo de Hankinson se procede a preparar muestras para las pruebas del modelo ortotrópico; Con este fin se cortarán los bloques en probetas de forma cubica de 2 cm orientadas en las direcciones principales L, R y T con una cantidad de 30 probetas y luego, 15 probetas con orientación de 30°, 45° y 60° para cara (LR), (LT) y (RT) con un total de 165 probetas

por bloque, procediendo a su estabilización en el ambiente del laboratorio de Física de la Universidad de Bio Bio Concepción Chile julio de 2019, y la densidad aparente (ρ) y contenido de humedad del 12,3%. Luego, se efectuarán las mediciones de las velocidades (V), longitudinales y transversales en todas las direcciones indicadas, con el equipo de ultrasonido de 1MHz con polarización longitudinal y transversal. Con la información obtenida se determinaron módulos elásticos y los coeficientes de principales de rigidez de cada bloque: C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , y C_{66} ; y coeficientes transversales C_{12} , C_{13} y C_{23} con cubos orientados de 30° , 45° y 60° . de acuerdo con las ecuaciones 17, 24, 25 y 26.

3.2.5 Preparación de gráficos referenciales para el estudio de las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera.

Por lo mencionado, anteriormente, debemos encontrar la metodología para generar los gráficos de las cuasi velocidades como se muestra en lado derecho de la FIGURA 28, Bucur (2006), usando las especies roble (oak) y abeto (*Douglas fir*), en el que estudio de la propagación de ondas de ultrasonido, de 1MHz, para diferentes ángulos de propagación obtuvo mediciones de las lentitudes (lentitud = inverso de la velocidad = slownesses en s/m) para estas especies, para diferentes ángulos de propagación, como se muestra en la FIGURA 28 lado izquierdo, para la especie Douglas fir,. En el presente trabajo se usará el mismo procedimiento usando las cuasi velocidades QL y QT como variable de medición, ecuaciones (21 y 22), para generar los gráficos similares mostrados (FIGURA 28, lado derecho). Para lo cual, se usó la misma simetría del modelo Hankinson, con un emisor en el centro de superior del bloque punto (0,0) y el receptor en el borde opuesto, en función del ángulo θ con respecto a la dirección horizontal (L).

FIGURA 28 - GRAFICO IZQUIERDO, LENTITUDES (SLOWNESS) DE QL (punteado) y QT (negro), LADO DERECHO GRAFICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$ DE LA ESPECIE *Douglas Fir A* 1MHz



FUENTE: BUCUR (1984)

EL AUTOR (2019).

3.2.6 Método de ultrasonido para caracterizar las propiedades ortotrópicas de los bloques de madera 2 y 3, variando las constantes del tensor de rigidez

El presente trabajo propone elaborar un modelo del comportamiento de las cuasi velocidades angularmente, luego simular el comportamiento de las cuasi velocidades variando los valores de las constantes de rigidez independientemente. Para lo cual, se propone una simulación que disminuye los valores de las constantes hasta un 20 %, de acuerdo con el CUADRO 4 que considera el deterioro del bloque en la primera fase hasta el 25 % y luego analizar los efectos que producen en las cuasi velocidades QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$, considerando las siguientes, condiciones y supuestos:

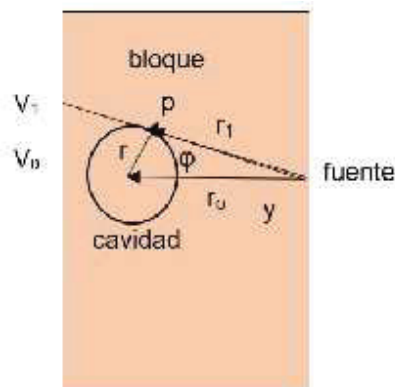
- El ataque de xilófagos produce, en promedio, una reducción de los valores de las constantes de rigidez del elemento estructural estudiado,
- Se dispone de dos tipos propagación en la estructura de madera en estudio, una en el plano LR (bloques 1 y 2) y otra con el plano LT (bloque 3), FIGURA 23
- Los valores iniciales de las constantes de rigidez fueron obtenidos con las pruebas de ultrasonido de 1 MHz polarización longitudinal y transversal, por lo que provienen de materiales reales.

- Se simula una disminución del 20 % del valor de cada uno de los coeficientes individualmente.

3.2.7 Modelo de dispersión de ondas de ultrasonido por cavidades cilíndricas

En pruebas iniciales, usando ondas de ultrasonido de 23 kHz en los bloques de *Cedrela odorata* se encontraron que para ángulos φ menor a 30° , mostrado en la FIGURA 29, la diferencia entre las velocidades V_0 y V_1 , sin la cavidad presente, es menor a 5 % por lo cual, en buena aproximación, el área formada por la cavidad, se puede considerar ubicada en una zona de material cuasi isotrópico dentro del margen del 5 % de error (FIGURA 29). Además, la relación entre el radio de la cavidad (r) y la distancia (r_0) a la fuente, para las cavidades pequeñas, (diámetros menores a 3,18 cm) es menor al 12,3 %. Tomando en cuenta consideración para las cavidades más pequeñas, se consideró en esa zona aproximar la onda esférica a una onda plana con polarización longitudinal.

FIGURA 29 - CONFIGURACION DEL MODELO DE DISPERSION



FUENTE: EL AUTOR (2020).

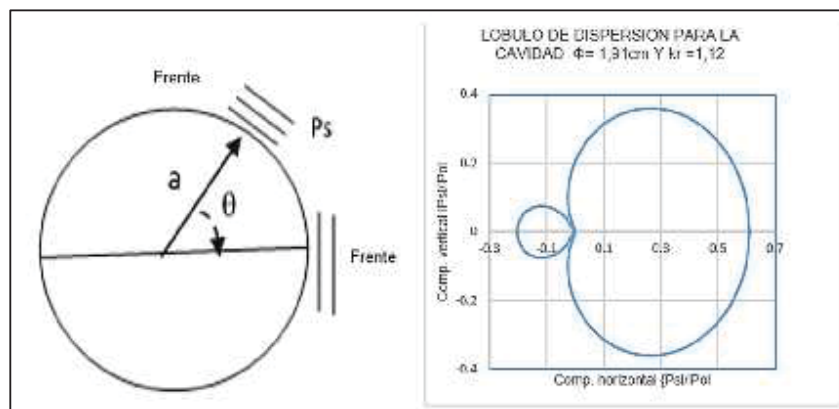
Para el desarrollo de la teoría del modelo físico de dispersión de las ondas acústicas por medio de cavidades en bloques de madera se propone las siguientes consideraciones:

- El modelo puede considerarse cuasi en 2D, plano xy correspondiendo para los bloques 1 y 2 el plano RL y en el caso del bloque 3 el plano TL, FIGURA 29.

- La zona en estudio estaría limitado en el área menor de 30° en ambos lados del eje de la fuente al centro de las cavidades, por lo que considerar el material isotrópico en esa zona y las propiedades mecánicas el bloque estarían contraladas por la velocidad del sonido en la dirección transversal (R o T) y la densidad aparente de los bloques.
- De otro lado, para cavidades pequeñas, se puede usar onda de ultrasonido del tipo plana hasta un nivel del 12% entre el radio de la cavidad y la distancia a la fuente de ultrasonido.

En la FIGURA 30 se muestra el comportamiento del proceso de dispersión calculado con la ecuación (42), para una cavidad de 1,91 cm de diámetro y con el valor de (kr) ecuación 35, igual a 1,122 mostrando un comportamiento similar a los mostrados por Morse y Uno Ingard (1986) para ondas planas. Sin embargo, indica que en el caso de usar ondas esféricas la estela detrás del cilindro es mucho mayor. Cabe indicar que el lóbulo graficado en la parte derecha se obtiene de la solución de la ecuación (42), calculando cada uno de las presiones P_s en función del ángulo θ y graficando luego sus componentes.

FIGURA 30 - DISPERSION DE LA ONDA DE ULTRASONIDO PLANA de 23 kHz POR UNA CAVIDAD CILINDRICA DE $\Phi = 1,91\text{cm}$ y $kr = 1,122$ EN UN BLOQUE DE *Cedrela odorata*



FUENTE: EL AUTOR (2020).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LAS ESPECIES ENTANDROPHRAGMA SP. Y CEDRELA ODORATA

4.1.1 Características Anatómicas *Sapeli antiguo* (Entandrophragma sp.)

- Características macroscópicas:

Anillos de crecimiento poco diferenciados por bandas oscuras de forma irregular. Porosidad difusa, con poros visibles a simple vista, difusos, solitarios de forma ovalada y múltiple radiales de dos poros. Parénquima longitudinal, visible con lupa de 10x, para traqueal vasicentrico, aliforme y en bandas de tipo marginal o terminal. *Radios*: en sección transversal visible con lupa de 10x; en sección tangencial son estratificados.

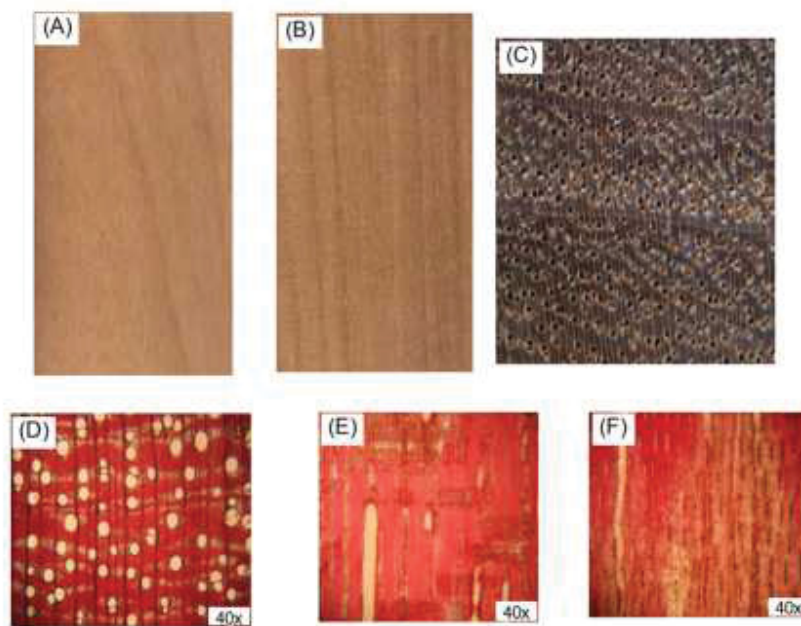
- Características microscópicas:

Vasos / Poros: Difusos, redondos y ovalados; solitarios y múltiples radiales de dos a tres poros. Diámetro tangencial promedio 122 μm clasificados como medianos, variando de 90 a 180 μm . En promedio 12 poros/ mm^2 clasificados como pocos, variando de 9 a 15 poros. Longitud promedio de los elementos vasculares 480 μm , clasificados como medianos, variando de 450 a 500 μm . Platina de perforación simple, poco inclinadas. Puntuaciones intervasculares alternas, de forma redonda y poligonal, abertura incluida de forma lenticular. Parénquima Longitudinal, en la sección transversal en bandas de hasta tres células de ancho. También, presencia de parénquima marginal y paratraqueal aliforme, aliforme confluyente y aliforme unilateral; no estratificado. Radios, en la sección tangencial estratificados y algunas veces no estratificados; homogéneos, mayormente seriados y escasos uniseriados; muy cortos, de altura promedio 286 μm , de 11 a 15 células de altura y 2 células de ancho. En la sección radial homocelulares formados por células procumbentes. De 6 radios/mm en promedio, clasificados como poco numerosos, variando de 4 a 8. Puntuaciones radiovasculares similares a las intervasculares. Presencia de inclusiones gomosas.

Fibras libriformes, con punteaduras simples, no estratificadas. Longitud promedio 1380 μm clasificadas como medianas, variando de 700 a 1620 μm micras; espesor de pared de 5 micras clasificada como delgada.

En la FIGURA 31 Se presentan macro y microfotografía de la madera descrita.

FIGURA 31 - MACROFOTOGRAFIAS: (A) TANGENCIAL, (B) RADIAL Y (C) TRANSVERSAL. MICROFOTOGRAFIAS: (D) TRANSVERSAL, (E) RADIAL Y (F) TANGENCIAL, DE LA ESPECIE *ENTANDROPHRAGMA SP.*



FUENTE: Laboratorio de Anatomía de la Madera, (Universidad Nacional Agraria La Molina).
Donde las figuras A,B, y C con 10x aumentos

4.1.1 Cedro (*Cedrela odorata*)

- Características macroscópicas:

Poros, visibles a simple vista, porosidad semicircular, poros predominantemente solitarios de forma redonda y escasos múltiples radiales de dos a tres poros; líneas vasculares rectilíneas, visibles a simple vista. Presencia de gomas de color rojo. Parénquima, visible con lupa de 10X, de color más claro que el tejido fibroso; paratraqueal vasicentrico y en bandas del tipo marginal o terminal. Radios, visibles con lupa de 10X, sin contraste o poco contrastados en sección radial, no estratificados en sección tangencial.

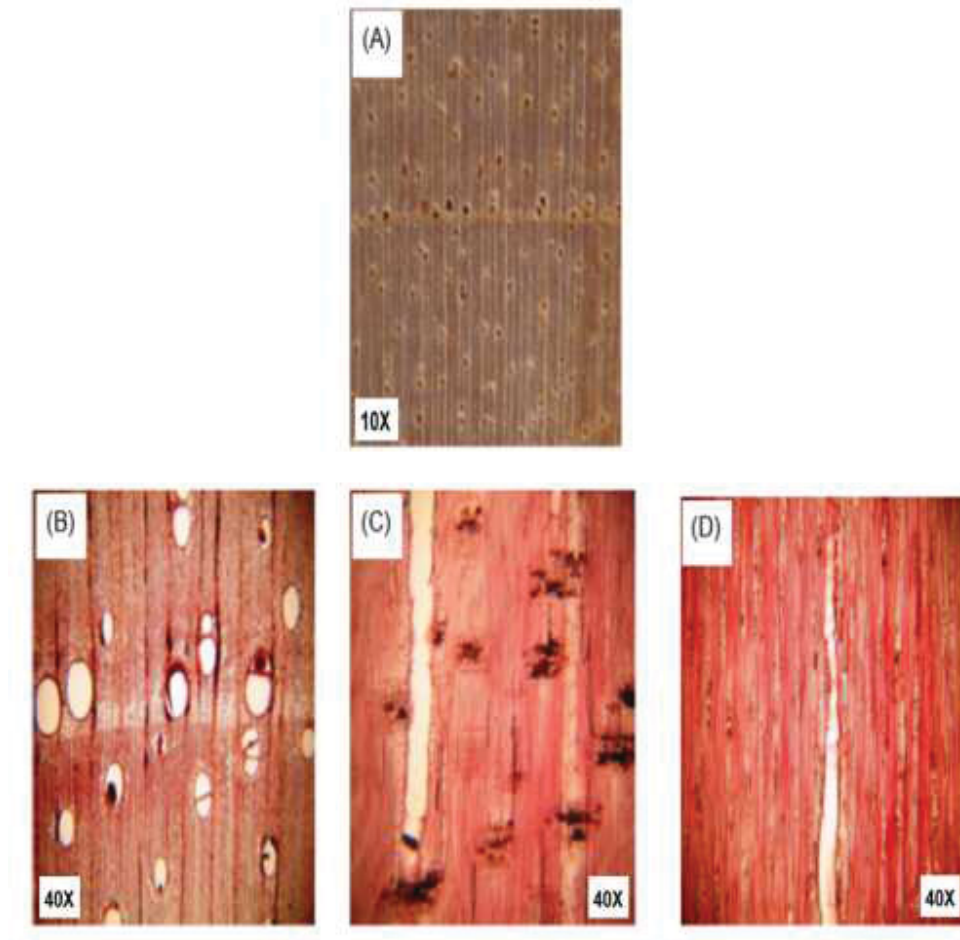
- Características microscópicas:

Vasos / Poros: poros difusos, redondos. Diámetro tangencial promedio 135 μm , clasificado como medianos. En promedio 3 poros/ mm^2 , clasificado como muy pocos. Longitud promedio de elementos vasculares 270 μm , clasificados como cortos. Platinas de perforación simple; punteaduras intervasculares alternas de forma redonda, apertura incluida de forma alargada. Presencia de apéndices pequeños en uno o en los dos extremos de los elementos vasculares. Presencia de gomas. Parénquima, en sección transversal apotraqueal difuso, paratraqueal vasicentrico con 1 a 2 células a su alrededor; en bandas del tipo marginal a terminal con 6 a 8 células de ancho. En corte longitudinal no estratificado, con 5 a 8 septas por célula. Presencia de cristales de forma romboide. Radios: en sección tangencial altura promedio de 311 μm , clasificados como extremadamente bajos, homogéneos y heterogéneos tipo II. En sección radial, pocos homocelulares formado por células procumbentes y mayormente heterocelulares formado por células procumbentes con una hilera marginal de células erectas y/o cuadradas. En promedio 4 radios/ mm , clasificado como poco numerosos; no estratificados. Punteaduras radiovasculares similares a las intervasculares en forma y tamaño. Presencia de gomas.

Fibras: libriformes; longitud promedio 1189 μm , clasificado como medianas; diámetro total en promedio 26 μm , clasificadas como medianas. Promedio del lumen 23 μm ; espesor de pared muy delgada; en promedio 3 μm ; con punteaduras no visibles. Fibras no septadas y no estratificadas.

En la FIGURA 32. se presentan macro y microfotografía de la madera descrita.

FIGURA 32 - MACROFOTOGRAFÍA (A) TRANSVERSAL. MICROFOTOGRAFÍAS (B) TRANSVERSAL, (C) RADIAL Y (D) TANGENCIAL, DE LA ESPECIE *CEDRELA ODORATA*.



FUENTE: Laboratorio de Anatomía de la Madera, (Universidad Nacional Agraria-La Molina)
 Dónde: Figura A con 10x aumentos y las figuras B, C y D con 40x aumentos

Desde el punto de vista de las características macroscópicas, se aprecian diferencias en su porosidad, mientras en sapelli la distribución de los poros es difusa; en el cedro es semicircular. En relación a los radios, destaca la presencia de radios estratificados sólo en la madera de sapelli. En ambas especies solo los poros son visibles a simple vista; mientras que para apreciar el parénquima longitudinal y los radios es necesario el uso de una lupa 10X.

4.1.1 Caracterización preliminar destructiva y no destructiva de las especies

Entandrophragma sp y *Cedrela odorata* utilizadas

En la Tabla 1, se presentan los resultados de los ensayos de los módulos de elasticidad obtenidos mediante técnicas destructivas y no destructivas, de las especies *Entandrophragma sp* antiguo y *Cedrela odorata*. Asimismo la Tabla 2, muestra el análisis estadístico, el cual permite afirmar, con un 95% de confianza, que el comportamiento de ambas especies, no presentan diferencias significativas $p \geq 0,05$. En el Anexo 1, se incluye información complementaria

TABLA 1 - PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS DE LAS ESPECIES *Entandrophragma* sp antiguo Y *Cedrela odorata*

Especie	Módulo de elasticidad					
	Destructivo			No destructivo		
	Promedio (GPa)	D.E.	C.V. (%)	Promedio (GPa)	D.E.	C.V.(%)
Entandrophragma sp antiguo	7,67	1,16	15,15	8,06	1,42	17,61
Cedrela odorata	8,06	0,37	4,61	8,26	0,36	4,38

FUENTE: El autor (2019).

TABLA 2 - ANALISIS ESTADISTICO DEL MODULO DE ELASTICIDAD DESTRUCTIVO MOE(des) Y MODULO DE ELASTICIDAD NO DESTRUCTIVO MOE (no des)

RUBRO	PROPIEDAD	COMPARACIÓN	SUPUESTOS				COMPARACION					
			NORMALIDAD		HOMOCEDASTICIDAD		PRUEBA		PRUEBA			
			W	p-valor	Chi cuadrada	p-valor	t- student	p- valor	U de Mann Whitney	Sign.	p- valor	Sign.
Especies	MOE(des)	Sapelli vs cedro	0,95	0,06	13,27	0,00	NO			259	0,11	NS
	MOE(no des)	Sapelli vs cedro	0,93	0,01	15,41	0,00	NO			187	0,74	NS
Ensayos	MOE(des) vs MOE(no des)	Sapelli	0,96	0,01	0,78	0,38	SI	-0,95	0,35	NS		
		Cedro	0,90	0,00	0,01	0,91	NO			135	0,08	NS

FUENTE: El autor (2019).

4.1.2 Caracterización de las propiedades mecánicas no destructivas de la especie en estudio

En las Tablas 3 y 4, se presentan las velocidades de ondas de ultrasonidos longitudinales y transversales de 1 MHz, y los módulos de elasticidad (MOE) y módulos de corte dinámicos medidos con ondas de ultrasonido de 1 MHz, en las diferentes direcciones de propagación.

Luego del análisis estadístico, se puede afirmar, con un 95% de confianza, mediante la prueba t-student, que no existen diferencias significativas en el comportamiento de la velocidad LR y el MOE longitudinal, entre ambas especies. Asimismo, la prueba de U - Mann Whitney, indica que la densidad, la velocidad longitudinal, la velocidad TL, el MOE LR y el MOE TL, y MOE RL tampoco presentan diferencias significativas entre ambas especies. En la Tabla 5, se presenta dicho análisis estadístico y en el Anexo 2 se incluye información complementaria.

TABLA 3 - VELOCIDADES DE ONDAS DE ULTRASONIDO LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES DE 1 MHZ EN LAS DIFERENTES DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN

	LONG	RAD	TANG	LR	LT	RL	RT	TR	TL
<i>Entandrophragma sp antiguo</i>									
Velocidad m/s	4147,94	1630,37	1185,11	1281,17	1107,27	1281,12	619,69	605,35	1106,03
D.E.	101,50	63,69	46,89	51,25	32,08	46,02	21,75	15,26	94,07
C.V.(%)	2,46	3,89	3,92	4,02	2,89	3,58	3,46	2,53	8,66
<i>Cedrela odorata</i>									
Velocidad m/s	4155,23	1877,84	1365,85	1289,2	1095,65	1304,89	548,5	550,25	1144,10
D.E.	82,06	60,06	53,47	44,41	47,66	42,08	40,28	40,86	59,68
C.V.(%)	1,96	3,22	3,91	3,43	4,35	3,21	7,25	7,47	5,31

FUENTE: EL AUTOR (2019). D.E: desviación estándar; C.V: coeficiente de variación

TABLA 4 - MOES Y MÓDULOS DE CORTE DINÁMICOS MEDIDOS CON ONDAS DE ULTRASONIDO DE 1 MHZ EN LAS DIFERENTES 44 DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN

	LONG	RAD	TANG	GLR	GLT	GRL	GRT	GTR	GTL	Densidad aparente kg/m ³
<i>Entandrophragma sp antiguo</i>										
MOE (GPa)	8,35	1,29	0,68	0,79	0,59	0,80	0,19	0,18	0,60	483,93
D.E.	0,72	0,14	0,08	0,05	0,05	0,07	0,02	0,01	0,08	24,16
C.V.(%)	8,57	11,00	11,76	6,84	7,50	8,97	9,29	7,83	13,45	4,96
<i>Cedrela odorata</i>										
MOE (GPa)	7,37	1,51	0,80	0,71	0,51	0,73	0,13	0,13	0,56	426,37
D.E.	0,44	0,14	0,08	0,06	0,05	0,07	0,3	0,02	0,07	20,66
C.V.(%)	5,79	9,39	9,95	8,73	10,07	8,99	17,79	18,44	12,60	4,71

FUENTE: EL AUTOR (2019). D.E: desviación, C.V: coeficiente de variación

TABLA 5 – ANALISIS ESTADISTICO DE LOS SUPUESTOS Y PRUEBAS DE COMPARACION

PROPIEDAD EVALUADA	SUPUESTOS				PRUEBA DE COMPARACIÓN						
	Normalidad		Homocedasticidad		Cumplen Supuestos	t-Student	p_valor	Sig.	Mann Whitney	p_valor	Sig.
	W	p_valor	Chisquare	p_valor							
Densidad	0.96	0.09	13.65	0.00	No				333	0,70	NS
Longitudinal	0.98	0.42	6.96	0.01	No				376	0,22	NS
Radial	0.96	0.12	0.21	0.65	Sí	15.72	0,00	***			
Tangencial	0.98	0.59	7.76	0.01	No				625	0,00	***
LR	0.99	0.98	0.32	0.57	Sí	1.95	0,06	NS			
TL	0.99	0.98	8.51	0.00	No				264	0,35	NS
RT	0.94	0.01	5.16	0.02	No				151	0,00	***
Longitudinal	0.97	0.27	1.29	0.26	Sí	1.42	0,16	NS			
Radial	0.97	0.18	5.49	0.02	No				618	0,00	***
Tangencial	0.92	0.00	15.05	0.00	No				624	0,00	***
LR	0.98	0.45	7.71	0.01	No				365	0,32	NS
TL	0.95	0.05	7.73	0.01	No				249	0,22	NS
RT	0.87	0.00	10.40	0.00	No				124	0,00	***

FUENTE: EL AUTOR (2019). resumido anexo 2

Con respecto a la anisometría de características elásticas para maderas, señalado por Hernández y Sotomayor (2014) . Tenemos para las especies estudiadas:

Entandrophragma sp antiguo: $E_L > E_R > E_T : 8,35 > 1,29 > 0,68$; $G_{LR} > G_{TL} > G_{RT} : 0,795 > 0,595 > 0,18$.

Cedrela odorata: $E_L > E_R > E_T : 7,37 > 1,51 > 0,8$; $G_{LR} > G_{TL} > G_{RT} : 0,72 > 0,535 > 0,13$.

Valores que permite ver más claramente la semejanza de las entre la muestra estudiadas .

4.2 PRUEBAS DE TRANSMISIÓN DE ONDAS DE PARA PERFORACIONES CILÍNDRICAS VERTICALES, CON FUENTE CENTRAL

De acuerdo con el procedimiento (b), propuesto en el ítem 3.2.3, se grillaron los bloques 1 y 2 con divisiones de 2 x 2 cm en las caras LR y para el bloque 3. en la cara LT. En condiciones de laboratorio a 20°C y contenido de humedad de los bloques mostrados en la TABLA 6, controlados en la cámara de climatización con 20°C y 66% de humedad relativa, luego se midieron las velocidades referenciales de acuerdo a la ecuación (1), de Hankinson, con los valores mostrados a continuación. Estimando para la ecuación un error del 7,9% en función de los errores angulares y de las velocidades VL y VR ,tabla 6. Indicando, además, que los procedimientos deben realizarse en un ambiente bien controlado y en el menor tiempo posible, de forma que el contenido de humedad de las muestras no cambie significativamente.

TABLA 6 - VALORES DE LAS VELOCIDADES REFERENCIALES, CONTENIDOS DE HUMEDAD Y DENSIDADES APARENTES DE LOS BLOQUES 1, 2 y 3

Bloque	Velocidad. Long. (VL) m/s	Velocidad Trans. (VR) m/s	Velocidad Trans. (VT) m/s	Parámetro (n)	CHE (%)	Densidad aparente Kg/m ³
1	4413,2±127,3 CV(2,9%)	1735,8±68,9 CV(4,0%)		1,659 8,7%	12	357,72
2	4456,7± 132,9 CV(2,98%)	1345,1± 183,0 CV (15,3%)		1,793 5,5%	12	397,62
3	4053,2± 227,8 CV(5,6%)		1367,7±148,1 CV(12,2%)	1,83 6,6%	12	402,84

FUENTE: El autor (2019).

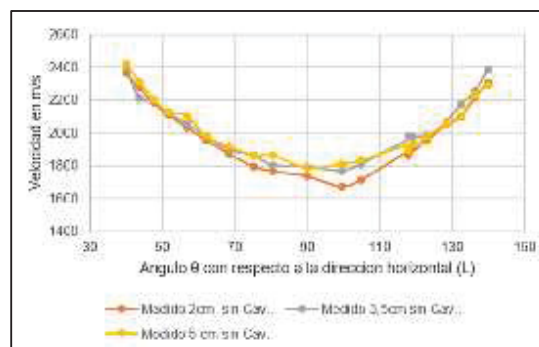
Es importante resaltar que la medición promedio de la velocidad transversal del bloque 2 dio un valor más bajo en comparación al bloque 1, posiblemente debido algún factor de calidad de la madera del bloque 2; pero que no influyó en su comportamiento.

Del procedimiento (c) del ítem 3.2.2 con los bloques sin cavidades se determinaron las velocidades en función del ángulo (θ) FIGURA 22, en 3 niveles con respecto a la cara superficial de los bloques, las cuales fueron graficadas como se muestra en la FIGURA 33, para el bloque 1, mostrando que en los 3 niveles el mismo comportamiento, al igual en los otros bloques, por lo que se optó usar el primer nivel

como referencia para el estudio para los 3 bloques, ya que además, visualmente se puede garantizar la calidad de la superficie de este nivel.

Luego, usando la ecuación (1) de Hankinson fueron calculados los valores de las velocidades, ajustando los valores (n) minimizando la suma de diferencia cuadrática entre la ecuación de Hankinson y los datos experimentales a los mostrados en la TABLA 6.

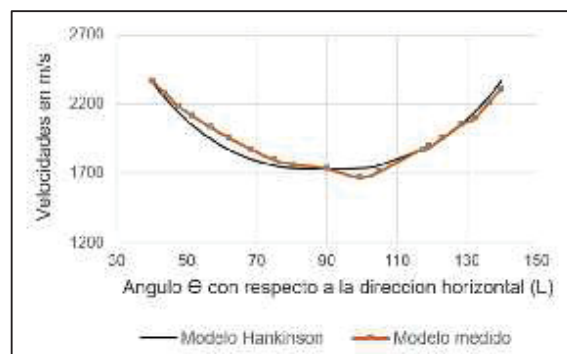
FIGURA 33 - BLOQUE 1, *Cedrela odorata*, VELOCIDADES MEDIDAS A DIFERENTES NIVELES CON RESPECTO A LA CARA (LR) SIN CAVIDAD



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 34 se muestra el gráfico de ajuste entre los valores de las velocidades medidas y el modelo de Hankinson para el bloque 1 con el parámetro de ajuste $n = 1,659$ ecuación 1, con un el error estimado de 8,7% entre el modelo y los datos experimentales, encontrándose además que el parámetro es muy sensible hasta el 3 decimal.

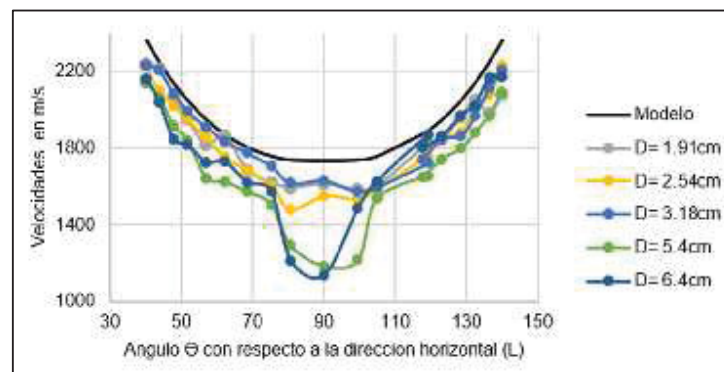
FIGURA 34 - BLOQUE 1, *Cedrela odorata*, MODELO HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS A NIVEL DE 1,5 cm DE LA FUENTE, SIN CAVIDAD, $n = 1,659$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

Usando el procedimiento (d) del ítem 3.2.2, se midieron las velocidades de propagación de ultrasonido con cavidades de 1,91; 2,54; 3,18; 5,4 y 6,4 cm de diámetro; cuyos centros están ubicados desde el punto emisor a 8,0; 13,5 y 15,5 cm para los bloques 1, 2 y 3 respectivamente. En la FIGURA 35 se muestra el comportamiento del bloque 1. Indicando que los diámetros mayores de las cavidades se refieren a ataques muy pronunciados a semejanza de lo mostrado en la FIGURA 21

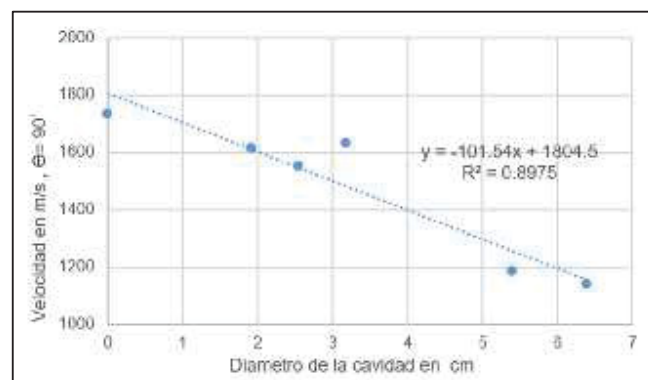
FIGURA 35 - BLOQUE 1, *Cedrela odorata*, VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS, NIVEL DE 1,5 CM, $n=1.659$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 36 se muestra la relación entre el cambio de la velocidad de propagación de ultrasonido en función del diámetro de las cavidades para el ángulo de 90° .

FIGURA 36 - BLOQUE 1, *Cedrela odorata*, RELACIÓN ENTRE LAS VELOCIDAD Y DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 8 CM DE LA FUENTE



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 37 se muestra el comportamiento del bloque 2, modelo de Hankinson y los valores medidos de las velocidades sin cavidad con un valor de ajuste de $n = 1,793$ y con un error estimado del 5,5%.

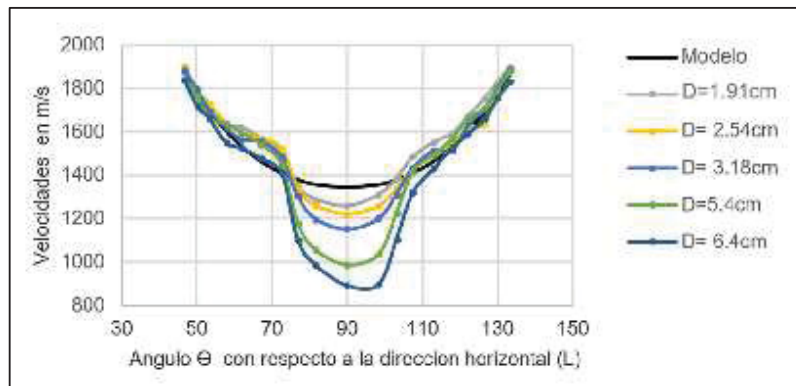
FIGURA 37 - BLOQUE 2, *Cedrela odorata*, MODELO HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS SIN CAVIDAD PARA $n = 1,793$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 38 se muestra un buen ajuste angular del bloque al modelo, salvo pequeñas zonas, sobresaliendo la que se encuentra alrededor del ángulo de 65° con 5° de ancho y una diferencia entre las velocidades con un máximo de 3,3% con respecto al modelo; además, podemos notar el cambio de las velocidades de propagación de las ondas de ultrasonido en función del diámetro de las cavidades en el bloque 2. Wei et al. (2019), estudio las especies de la China, *Betula platyphylla*, *Fraxinus mandshurica*, *Ulmus pumila* y *Larix gmelinii*, con polinomios de 2do grado, y construyendo modelos de regresión multivariado de las cavidades con resultados similares a los encontrados en el presente trabajo, además señala similarmente, la asimetría encontrada en los bloques 1 y 2, FIGURA 35 y 38.

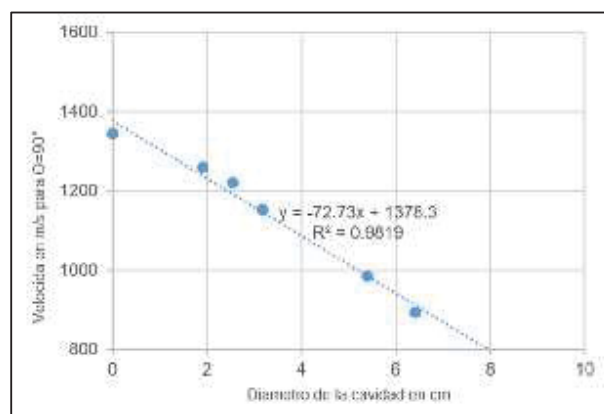
FIGURA 38 - BLOQUE 2, *Cedrela odorata*, VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS AL NIVEL DE 1,5cm



FUENTE: EL AUTOR (2019).

De otro lado, se puede notar que para el ángulo de 90° existe una posible correlación entre los valores de las velocidades y los diámetros de las cavidades, por lo que se evaluó la posible correlación, en la FIGURA 39 se muestra para el bloque 2, una buena correlación entre la disminución de velocidades de propagación y los diámetros de las cavidades con un coeficiente de determinación de 98,2 %.

FIGURA 39 - BLOQUE 2, *Cedrela odorata*, RELACION ENTRE LAS VELOCIDADES Y LOS DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 13,5 cm DE LA FUENTE

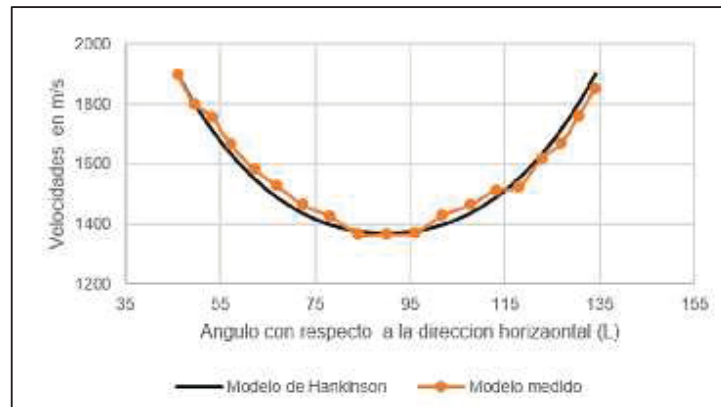


FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 40 se muestra el comportamiento de las velocidades medidas y calculadas de acuerdo con el modelo de Hankinson del bloque 3, siendo en este caso el

plano (LT) el estudiado, con el parámetro de ajuste $n = 1,83$ con un error estimado del 6,6%.

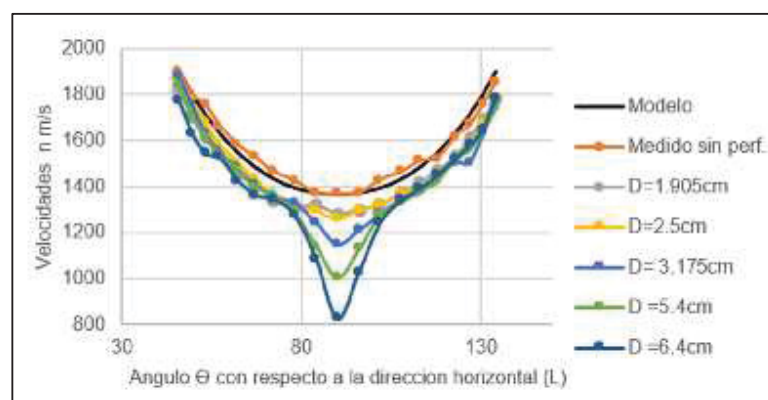
FIGURA 40 - BLOQUE 3, *Cedrela odorata*, MODELOS HANKINSON Y VELOCIDADES MEDIDAS SIN CAVIDAD PARA EL NIVEL 1,5 cm , CON $n=1,83$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 41 se muestran el comportamiento de las velocidades ante la presencia de cavidades de diferentes diámetros se puede notar que los gráficos son más convexos que en los anteriores bloques debido posiblemente a que el material es más homogéneo en esa dirección (T).

FIGURA 41 - BLOQUE 3, *Cedrela odorata*, VELOCIDADES PARA CAVIDADES DE DIFERENTES DIAMETROS AL NIVEL DE 1,5 cm

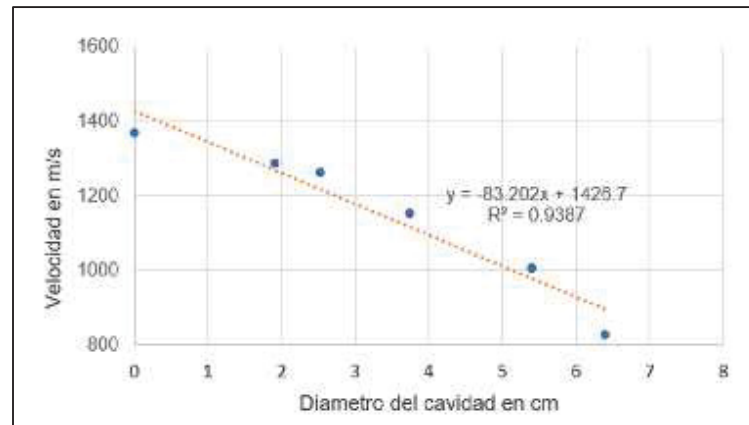


FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 42 se muestra la relación entre las velocidades y la presencia de cavidades para el ángulo de 90° con una correlación alta y coeficiente de determinación

del orden de 93,8%. Lo que indicaría que la diferencia entre la velocidad de la onda directa y las dispersadas dependen linealmente del diámetros de las cavidades.

FIGURA 42 - BLOQUE 3, *Cedrela odorata*, RELACIÓN DE LA VELOCIDAD y LOS DIAMETROS DE LAS CAVIDADES PARA $\theta = 90^\circ$, CENTRO DE LA CAVIDAD A 15,5 cm DE LA FUENTE



FUENTE: EL AUTOR (2019).

De los gráficos mostrados en las FIGURAS 34, 37 y 40, se puede ver que el modelo anisotrópico se acerca mucho a los valores experimentales encontrándose diferencias máximas entre los valores modelados y medidos en 8,7%, 5,5% y 6,6 % en los bloques 1, 2 y 3 respectivamente. Del otro lado de los gráficos de las FIGURAS 35, 38 y 41 podemos notar claramente una caída de la velocidad, con respecto al modelo, siendo mayor en la dirección perpendicular de las cavidades, que para el diámetro de 6,4cm se encontró diferencias de 31,4; 33,3 y 39,35% respectivamente; y haciendo notar claramente, la diferencia de convexidad entre los bloques 1, 2 comparado con el bloque 3. Finalmente podemos notar que existe una buena correlación entre la caída de las velocidades en la dirección perpendicular a las cavidades y los diámetros de las mismas. FIGURAS 36, 39 y 42 respectivamente, lo que permite señalar las bondades, del uso de las ondas de ultrasonido en la determinación de las cavidades dentro de bloques de madera. Kazammi-Najafi, Shalbfafan (2009) estudiando troza de árboles de haya usando ultrasonido encontró la relación inversa entre la velocidad y el diámetros de cavidades y longitud de muesca rectangulares practicadas en las muestras, y señaló que la posición de las cavidades no influye en este comportamiento.

4.3 PRUEBAS DE TRANSMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN LOS BLOQUES A, B y D DE *Cedrela odorata* CON CAVIDADADES LONGITUDINALES

4.3.1 Determinación de las velocidades referenciales en los bloques A, B y D

En la TABLA 7 se muestran las velocidades referenciales para los bloques A, B y D, estabilizadas en la cámara de climatización a 20°C y 60% de humedad ambiental. las cuáles fueron usadas en las pruebas de ultrasonido con cavidades longitudinales con el modelo de Hankinson.

TABLA 7 - VALORES DE LAS VELOCIDADES REFERENCIALES Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS BLOQUES A, B y D

Bloque	Velocidad Long. (VL) m/s	Velocidad Trans. (VR) m/s	Parámetro (n)	CHE %	Densidad aparente Kg/m ³
A	3938,6± 120,4 CV(3,1%)	1455,1 ±16,96 CV(1,2%)	1,62 4.,4%	12	520,98
B	4008,5 ±133,9 CV(2,7%)	1279,6 ± 43,2 CV(3,4%)	2,6%	12	410,32
D	4866,2 ±133,9 CV(2,7%)	1528,4 ±16,4 CV(1,1%)	1,586 3,3%	12	516,20

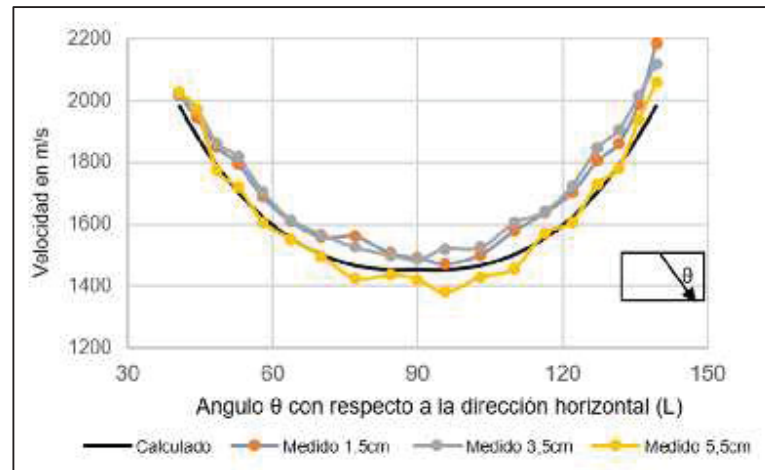
FUENTE: EL AUTOR (2019).

4.3.2 Pruebas de transmisión de ondas de ultrasonido en bloques A y B de *Cedrela odorata*

Con los bloques sin perforar se determinaron primeramente las velocidades para el modelo de Hankinson. Luego con las cavidades perforadas longitudinalmente como se muestran en la FIGURA 25 se midieron las velocidades en los diferentes niveles establecidos. En la FIGURA 43 se muestra los resultados del bloque A, con el modelo de Hankinson ajustados a los niveles de 1,5; 3,5 y 5,5cm y $n = 1,62$; simétrico con respecto al eje central (90°). Donde se puede notar que existe una asimetría en los niveles de 1,5 y 3,5 con respecto al gráfico de referencia (en negro) especialmente para ángulos menores (lado izquierdo) y más alejados (lado derecho), lo cual no es muy notorio en el nivel 5,5 cm. Esta asimetría se deba posiblemente a la presencia de los anillos de

crecimiento, radios y otros, señalados por Bucur (2006) y que no están siendo considerados en el modelo de Hankinson.

FIGURA 43 - Bloque A, *Cedrela odorata*, MODELO DE HANKINSON CON VELOCIDADES MEDIDAS A NIVELES DE 1,5; 3,5 y 5,5 cm DE LA SUPERFICIE, $n = 1,62$

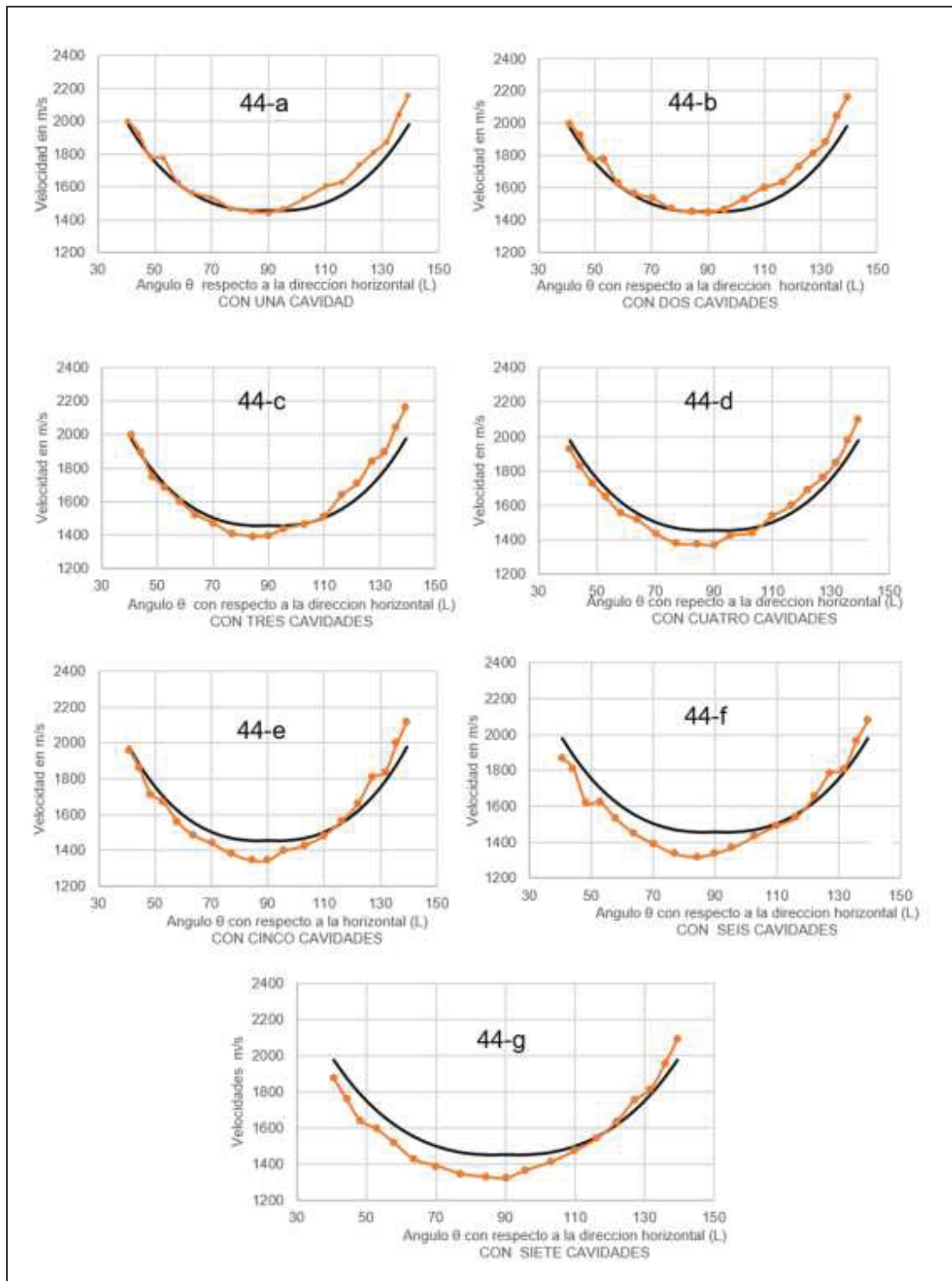


FUENTE: EL AUTOR (2019).

En los gráficos de la FIGURA 44, se muestran los comportamientos de las velocidades en relación al número de cavidades perforadas en el bloque A. En el gráfico con una cavidad (44-a) se nota el comportamiento asimétrico del bloque para ángulos mayores a 90° con velocidades mayores a los estimados por el modelo, que luego va disminuyendo hasta llegar a acercarse a la curva simétrica para cuatro cavidades (44-d), debido posiblemente que el aumento de cavidades uniformiza los caminos seguidos por la onda de ultrasonido. De otro lado, a partir de la cuarta cavidad (44-d) las velocidades van disminuyendo para ángulos menores, lo que indica la influencia del mayor camino seguido en la propagación de la onda, con una caída de 131,8 m/s para el ángulo de 90° para el caso del bloque con siete cavidades grafico (44-g).

En el bloque B, el proceso de realizar las perforaciones de las cavidades no pudieron hacerse uniformemente por lo que no fue posible analizar en detalle los resultados, sin embargo, su comportamiento fue muy similar al del bloque A.

FIGURA 44 - BLOQUE A, *Cedrela odorata*, VELOCIDADES COM RESPECTO AL ANGULO θ EN FUNCION DEL NUMERO DE CAVIDADES LONGITUDINALES DE 16 mm DE DIAMETRO, DE ACUERDO A LA FIGURA 26

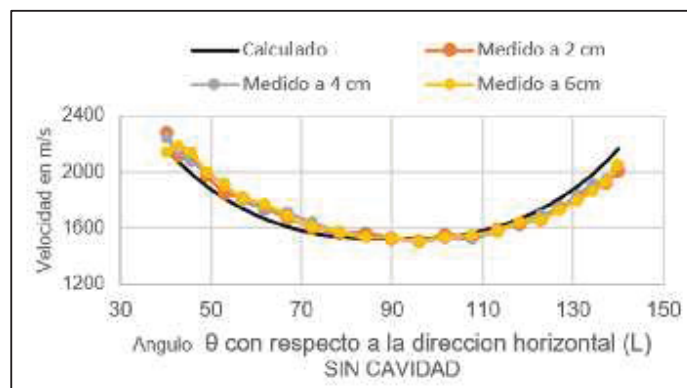


FUENTE: EL AUTOR (2019).

4.3.3 Pruebas de transmisión de ondas de ultrasonido en el Bloque D

En primer lugar, se efectuaron mediciones en el bloque D sin cavidades y a niveles de 2, 4 y 6 cm con respecto a la cara superficial, tanto como emisor para el receptor FIGURA 27, cuyos resultados se muestran en la FIGURA 45.

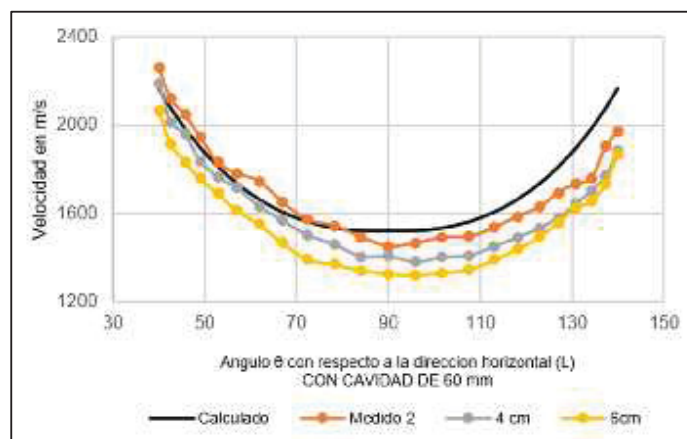
FIGURA 45 - BLOQUE D, *Cedrela odorata* MODELO DE HANKINSON CON VELOCIDADES MEDIDAS EN LOS NIVELES DE 2, 4 y 6 cm con $n=1,586$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 46 en forma similar se muestran las mediciones para el bloque con la cavidad de 60mm.

FIGURA 46 - BLOQUE "D" , *Cedrela odorata*, CON CAVIDAD LONGITUDINAL DE 60 mm MEDICIONES A DIFERENTES NIVELES



FUENTE: EL AUTOR (2019).

4.4 MODELO ORTOTROPICO DE LOS BLOQUES 1, 2 Y 3

Concluida las pruebas del modelo de Hankinson en el Laboratorio de Contaminación Acústica de la Universidad Agraria La Molina Lima, se procedió a la preparación de las probetas de los bloques 1,2 y 3 usados en las pruebas anteriores y acondicionándolas para ser llevadas al Laboratorio de Física de la Universidad de Bio Bio Concepción Chile en julio del 2019, donde se estabilizaron a 20°C y 12,3% de contenido de humedad, con la norma NTP 251.010:2014. Luego usando el equipo NDT de ultrasonido Olympus Panametrics 5800 de 1MHz se determinaron las velocidades de propagación en las diferentes direcciones y con las ecuaciones 17, 24, 25 y 26 se calcularon los valores del tensor de coeficientes de rigidez de la especie en estudio *Cedreia odorata* para ser usadas luego, para caracterizar su modelo ortotrópico propuesto como se muestra en la matriz 4. En la TABLA 8 se muestran los valores encontrados para los bloques 1, 2 y 3 respectivamente adicionándose sus respectivas desviaciones estándar y coeficiente de variación, donde podemos notar que los bloques 2 y 3 tienen un mejor comportamiento con coeficientes de variación bajas en comparación del bloque 1 que es más alta. Con respecto a las mediciones de las probetas con orientaciones de 30°, 45, 60° y 120° se midieron las cuasi velocidades QL y QT usando las ecuaciones (21 y 22), luego se determinaron los coeficientes C_{12} y C_{13} correspondientes, usando las ecuaciones (24 y 25).

De otro lado, los coeficientes C_{12} solo se midieron en los bloques 1 y 2 y el coeficiente C_{13} en el bloque 3 debido las dificultades técnicas en las mediciones. Similarmente las probetas del plano RT (coeficiente C_{23}) no se midieron por la baja amplificación de la señal de ultrasonido del equipo de medición en las pruebas . Sin embargo, los valores encontrados permitieron evaluar las propiedades ortotrópicas en los planos LR para los bloques 1 y 2 y en el plano LT para el bloque 3.

TABLA 8 - COEFICIENTE DEL TENSOR DE RIGIDEZ BLOQUES 1,2 y 3 en Pa.10⁸

	C_{LL} (C₁₁) Pa.10 ⁸	C_{RR} (C₂₂) Pa.10 ⁸	C_{TT} (C₃₃) Pa.10 ⁸	C_{RT} (C₄₄) Pa.10 ⁸	C_{LT} (C₅₅) Pa.10 ⁸	C_{LR} (C₆₆) Pa.10 ⁸	C₁₂ Pa.10 ⁸	C₁₃ Pa.10 ⁸
Bloque 1	53,71	10,33	3,32	2,41	3,54	4,87	8,10	
<i>D.E.</i>	15,39	3,62	0,63	0,30	0,56	0,71	3,15	
<i>CV. %</i>	28,6	35,1	18,9	12,4	16,3	14,6	38,7	
Bloque 2	61,41	10,40	5,64	2,57	4,85	5,72	11,40	
<i>D.E.</i>	6,11	1,43	1,42	0,31	0,28	0,24	2,3	
<i>CV. %</i>	9,9	13,8	25,1	12,2	5,7	4,2	20,2	
Bloque 3	72,22	14,40	7,00	3,45	6,66	7,65		9,2
<i>D.E.</i>	6,12	2,00	1,32	0,73	0,54	0,75		3,0
<i>CV. %</i>	8,5	13,9	18,9	21,1	8,2	9,8		30,0

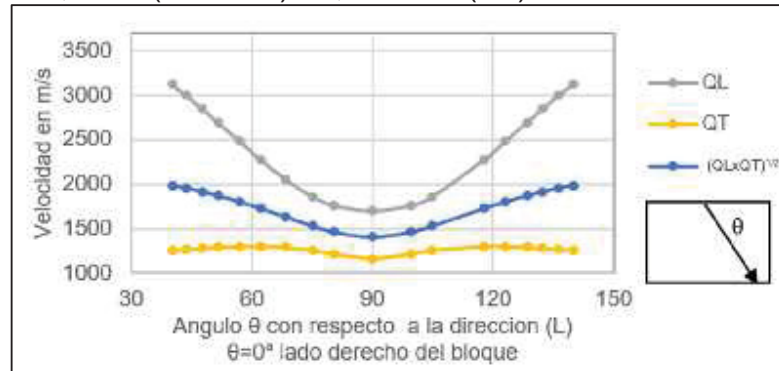
FUENTE: EL AUTOR (2019).

Con los datos experimentales mostradas en la TABLA 8, se observa valores altos en los coeficientes de variación en el bloque 1 por lo cual no fue considerado en el análisis final del modelo.

Se construyeron los gráficos que se muestran a continuación de las cuasi-velocidades QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$, usándose las constantes C₁₁, C₂₂ C₁₂ C₆₆ para caracterizar la propagación de las ondas en el plano LR, bloques 1 y 2; y las constantes C₁₁, C₂₂ C₁₃ y C₅₅ para el plano LT, bloque 3.

En primer lugar, en FIGURA 47 tenemos bloque 1 (plano LR), cuyas constantes de rigidez son menores que de los bloques 2 y 3, el gráfico de QL tiene una pendiente alrededor de los 45° y crece uniformemente con una concavidad notoria; el grafico de QT crece hasta aproximadamente los 110° y luego se estabiliza y $(QL \times QT)^{1/2}$ es semejante a QL.

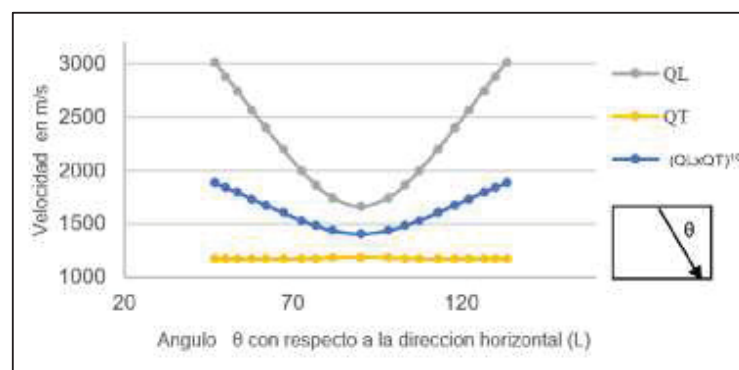
FIGURA 47 - BLOQUE 1, *Cedrela odorata*, MODELO ORTOTROPICO CUASI-VELOCIDADES QL,QT Y $(QL \times QT)^{1/2}$, PLANO (LR)



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 48 vemos los gráficos del bloque 2, (plano LR), muy semejante al bloque 1, el gráfico de QL es más convexo, el de QT es más plana y el de $(QL \times QT)^{1/2}$ es semejante a QL.

FIGURA 48 - BLOQUE 2, *Cedrela odorata*, MODELO ORTOTROPICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL,QT y $(QL \times QT)^{1/2}$, PLANO (LR)

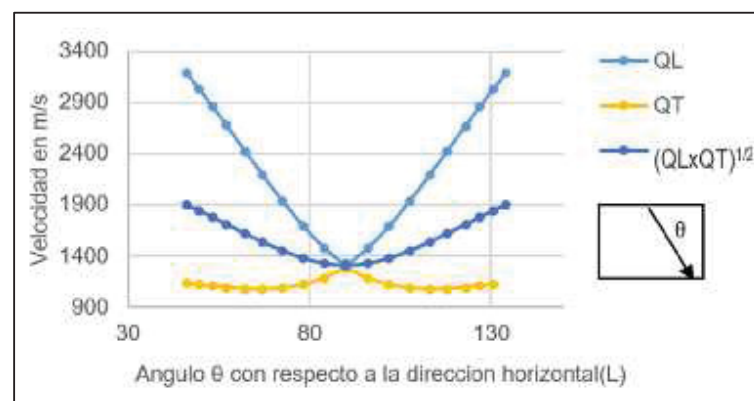


FUENTE: EL AUTOR (2019)

En la FIGURA 49, vemos los gráficos del bloque 3 (plano LT), primeramente, se muestra claramente que los gráficos de las cuasi velocidades se unen en el ángulo de 90° lo que no ocurre con los otros bloques, lo que marca la característica más importante entre los planos LR y LT para la propagación de las ondas acústicas. Además, el gráfico de QL es mucho más convexo que los anteriores y el de QT tiene una loma alrededor de los 90° tiende a estabilizarse en forma plana con cierta tendencia a aumentar de valor y

el de $(QL \times QT)^{1/2}$ sigue la tendencia de los otros bloques. Lo que permite indicar que el uso de la onda de ultrasonido de 1MHz puede diferenciar la presencia de las fibras desdoblándose en dos ondas QL y QT que viajan en direcciones cuasi perpendiculares, Lo que permite encontrar valores de los coeficientes del tensor de rigidez teniendo en cuenta la influencia de la dirección de las fibras, que fue notado en los estudio sobre la influencia de la dirección de las fibras en la especie *Schizolobium parahyla* por Mascia (2003), Mackenzie (2009) de otro lado, indica también la influencia del cambio de la densidad en la velocidad de propagación en altas frecuencias, como el paso de la albura al duramen o entre los anillos de crecimiento.

FIGURA 49 - BLOQUE 3, *Cedrela odorata*, MODELO ORTOTROPICO DE LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$ PLANO (LT)



FUENTE: EL AUTOR (2019).

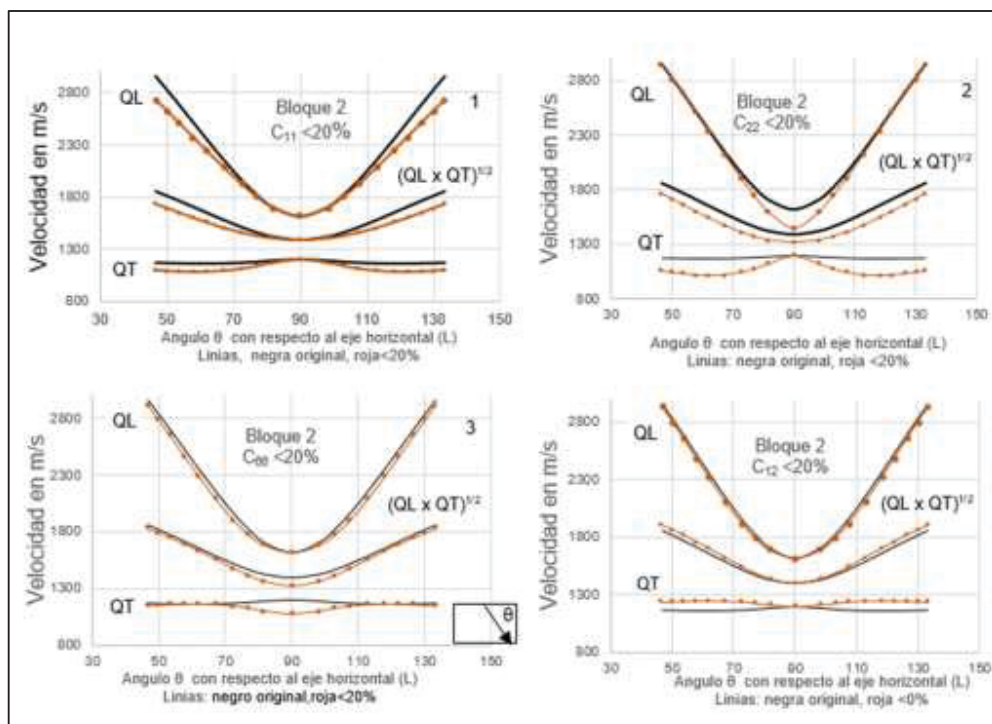
Finamente, para analizar la presencia de cavidades y el deterioro de material en los bloques, se hizo se simulo una disminución del 20% del valor de cada uno de los coeficientes individualmente, como se señala en el item 3.2.6

- Se elaboraron gráficos del comportamiento haciendo variar para el plano LR las constantes C11, C22, C12 y C66 (FIGURA 50) y luego para el plano LT las constantes C11 C33 C55 y C13 (FIGURA 51).

En la FIGURA 50 se muestran los gráficos obtenidos del bloque 2 (plano LR), podemos indicar primeramente que los gráficos no se cruzan entre ellos, notando luego que QL depende fuertemente del valor de C₁₁ en todos los ángulos y que para C₁₂ cae

su valor en casi 170m/s en los 90°. Mientras que QT varia uniformemente con todas las constantes en especial con C_{22} ; el comportamiento de C_{12} es contrario a lo esperado, aumenta su valor en vez de disminuir, debido posiblemente al efecto generado por el coeficiente de Poisson en la ella. El valor de $(QL \times QT)^{1/2}$ varia influenciado principalmente por C_{11} y C_{22} . Lo nos permite concluir que las variaciones de la cuasi velocidad longitudinal QL, no varían notoriamente; pero en la dirección transversal los valores de QT dependen mucho de las constantes del tensor. De otro lado, Hearing, Keunecke y Niemz (2012) en estudios de la especie *Fugus sylvatica* L en pruebas estáticas en compresión en las direcciones principales y de corte con ultrasonido de 1MHz en los módulos de corte, señalan una asimetría del tensor de complianza entre LR/RL y un desacople entre LT/TL; sin embargo, en el presente estudio el tensor utilizado es simétrico, por lo que el desacople debe tener además otros factores como los anatómicos ya mencionados.

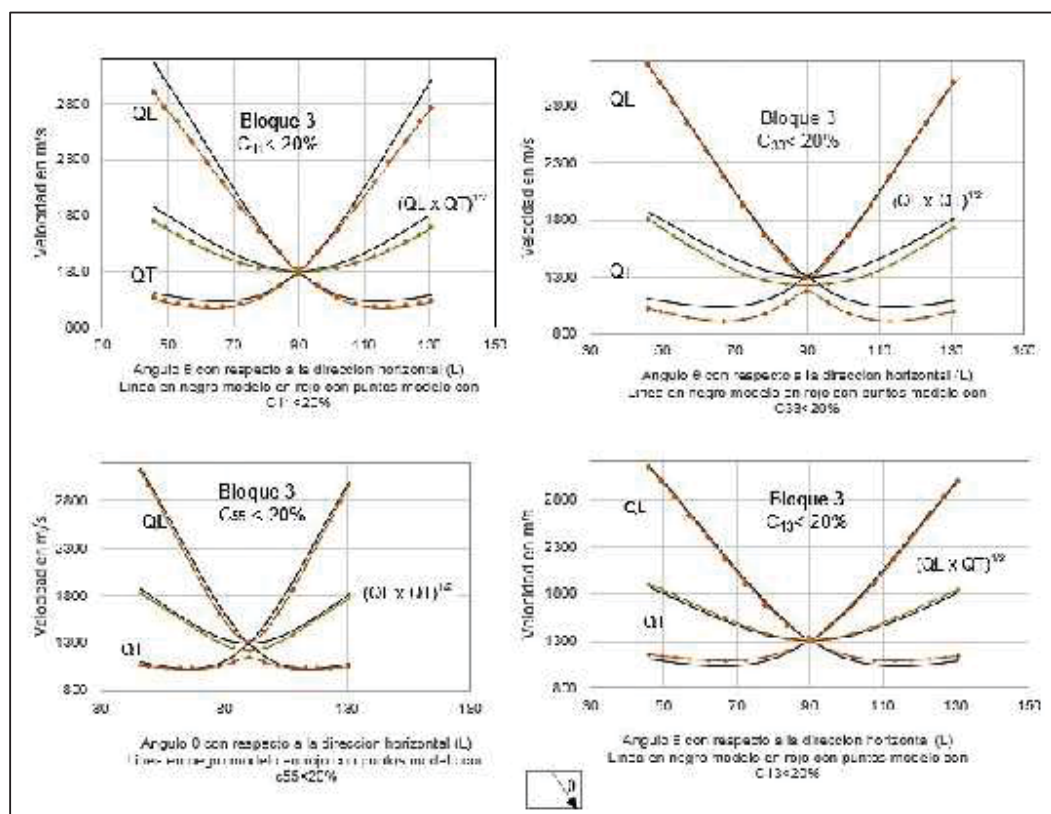
FIGURA 50 - GRAFICOS DEL BLOQUE 2, *Cedrela odorata*, CON COEFICIENTES DE RIGIDEZ INDEPENDIENTE CAMBIADOS MOSTRANDO LOS EFECTOS EN LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 51 se muestran los gráficos obtenidos del bloque 3 (plano LT), podemos notar en primer lugar, que los tres gráficos se unen en el ángulo de 90°; los valores de QL depende fuertemente del valor de C_{11} en todos los ángulos. Mientras que QT varia uniformemente con todas las constantes en especial de C_{33} , y notamos igualmente que para C_{13} su comportamiento es contrario a lo esperado, aumenta su valor en vez de disminuir; el valor de $(QL \times QT)^{1/2}$ varia influenciado principalmente por C_{11} y C_{33} . Lo nos permite concluir que la variación de QL, en la dirección longitudinal no es significativa; pero en la dirección transversal los valores de QT dependen mucho de las constantes del tensor.

FIGURA 51 - GRAFICOS DEL BLOQUE 3, *Cedrela odorata*, CON COEFICIENTES DE RIGIDEZ INDEPENDIENTE CAMBIADOS MOSTRANDO LOS EFECTOS EN LAS CUASI VELOCIDADES QL, QT y $(QL \times QT)^{1/2}$



FUENTE: EL AUTOR (2019).

Finalmente, comparando el comportamiento de las cuasi velocidades en ambos casos, se nota claramente que la diferencia estriba en la unión de los gráficos en el ángulo

de 90° , dependiente principalmente de la diferencia estructural al paso de las ondas de ultrasonido en esos planos, que en el caso del plano LR, se encuentran los anillos de crecimiento, la madera temprana y tardía y otros elementos estructurales, y la frecuencia de la fuente de ultrasonido, provocando que el barrido angular no sea homogéneo y aparezcan además, problema de birrefringencia y otros. Adicionalmente es importante señalar que, la velocidad $(QL \times QT)^{1/2}$ es un valor que combina las dos cuasi velocidades, la cual puede estar relacionada con la intensidad de la onda y que permite comparar el comportamiento de mediciones de velocidades de ultrasonido encontradas con frecuencia menores de ultrasonido y donde los efectos de la birrefringencia no actúan.

4.5 MODELO DE LA DISPERSION DE LAS ONDAS DE ULTRASONIDO POR CAVIDADES EN CONDICIONES DE CAMPO CERCANO, EN LOS BLOQUES 2 y 3

Usando la ecuación (42) desarrollada por Skudrzyk (1971) para la determinación de la presión por cavidades cilíndricas en campo cercano, controlado por el factor adimensional (kr) que indica la distancia del centro del cilindro por la longitud de la onda usada, siendo valor del radio (r) , 10% mayor que el radio de la cavidad, en condiciones de campo cercano, como se muestra en la (FIGURA 29)

Usando las características del bloque 2 y 3 con sus respectivas cavidades de 1,91; 2,54; 3,18; 5,4 y 6,4 cm de diámetro se elaboraron los modelos de las presiones de dispersión para cada uno de ellos usando los valores de (r) fijados anteriormente (10% mayor) y barriendo angularmente las cavidades desde $\theta = 0^\circ$ hasta 360° , los cuales se muestran en el lado izquierdo de las FIGURAS. 51, 52, 53 y 54. Estos gráficos muestran los lóbulos de dispersión estacionaria en respuesta a presión P_s de la onda incidente de ultrasonido de frecuencia de 23 kHz, y de acuerdo a las consideraciones propuestas en la metodología.

Las FIGURAS 51 y 53 muestran los gráficos de la dispersión de las cavidades de 1,91; 2,54 y 3,18 cm de diámetro respectivamente para los bloques 2 y 3. En el lado izquierdo, de las figuras se describe la curva de dispersión de la onda para los parámetros (kr) de 1,22; 1,50 y 1,88 respectivamente, y el derecho muestra, la presión

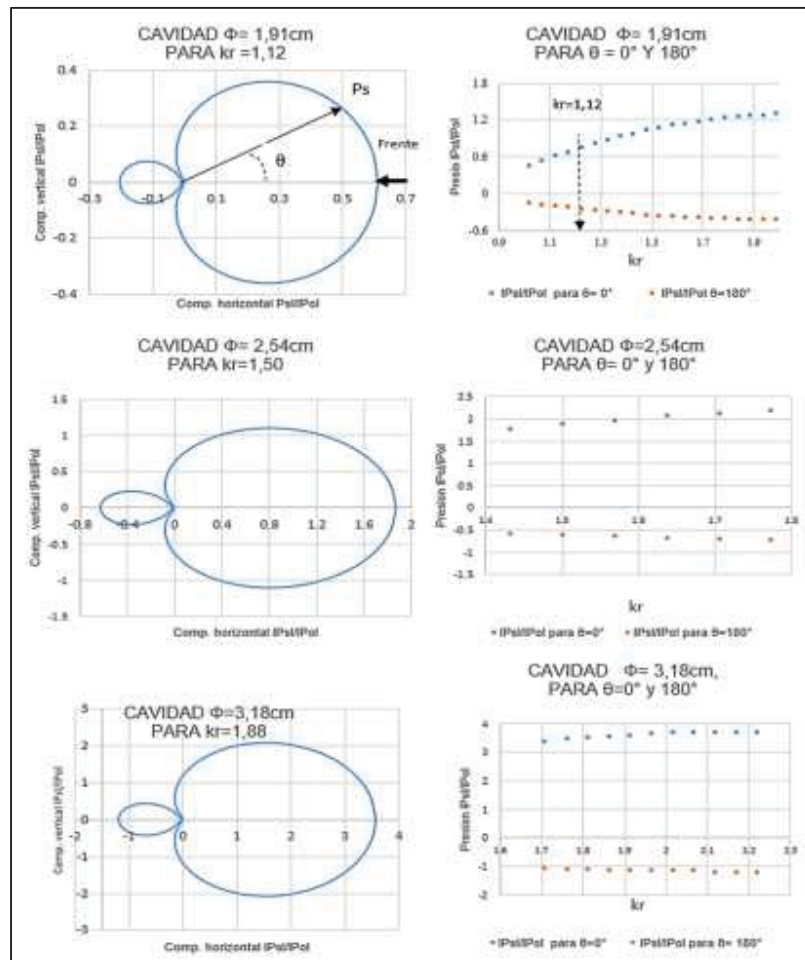
en función del parámetro (kr) para los ángulos de 0° y 180° (lado derecho e izquierdo de la cavidad); como el valor de (k) es el número de onda del equipo y se mantiene constante, portando los gráficos representan el valor de la presión al alejarse de las cavidades para ambas direcciones de 0° (azul, frente de onda) y 180° (rojo), para condición de campo cercano.

Las FIGURAS 52 y 54 muestran los gráficos de dispersión de las cavidades de 5,4 y 6,4 cm de diámetro respectivamente de los bloques 2 y 3. De igual forma en el lado izquierdo se encuentra los lóbulos y en el derecho las presiones en función del parámetro (kr) para el caso de campo cercano. En este caso, los dos diámetros no cumplen las condiciones iniciales especificadas. Sin embargo, en el lado izquierdo podemos notar los lóbulos bien formados, pero en el lado derecho se muestra el comportamiento dispersivo de la presión con la distancia (r) .

En la FIGURA 52 podemos notar a cavidad de 1,91cm tiene una simetría más esférica deformándose para diámetros mayores, tomando la presión de dispersión valores más bajos que en las cavidades con diámetros más grandes, ya que estos dependen del cuadrado del radio de la cavidad, ecuación (42).

El lóbulo pequeño, en la salida curva de dispersión, es la respuesta al pasaje del frente de ondas al rodear la cavidad, habiendo contribuciones negativas entre ellas para formar el lóbulo pequeño. En el lado derecho de la figura, podemos ver los gráficos de la presión de dispersión con la distancia (kr) , los cuales en todos los casos tiende a ser estacionarios, por la tendencia exponencial de la solución encontrada.

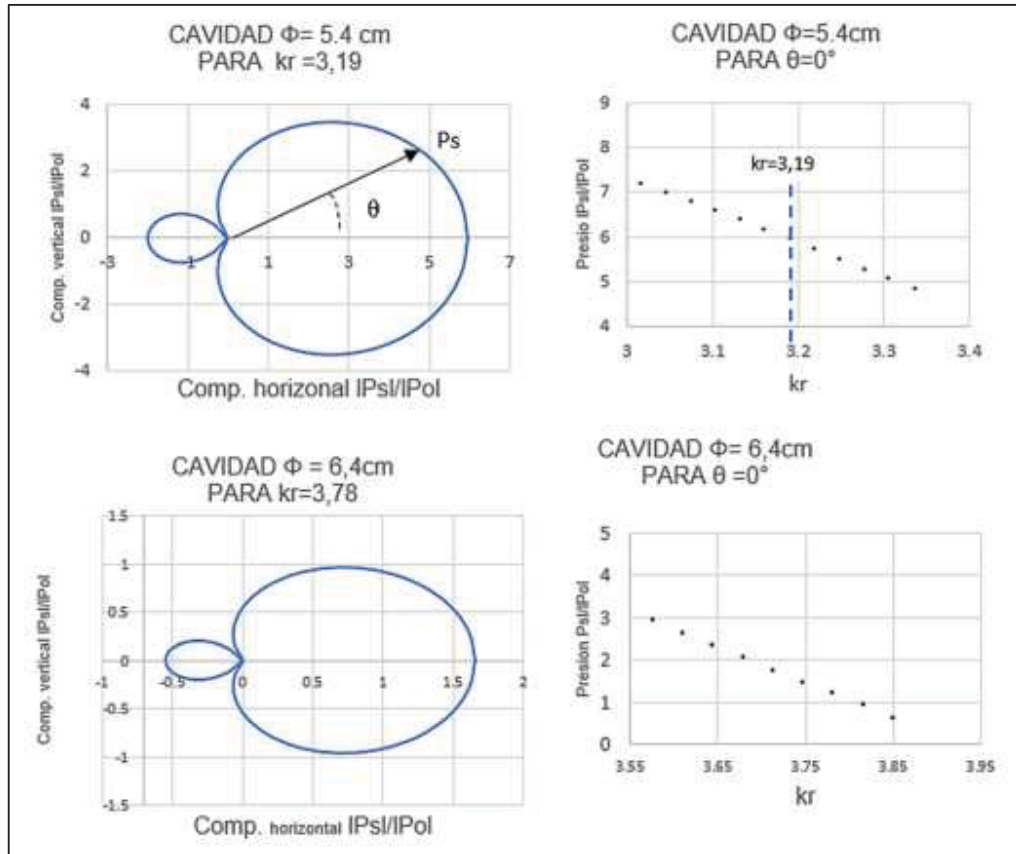
FIGURA 52 - BLOQUE 2, GRAFICOS DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPO CERCANO



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 53 se muestran los modelos de dispersión para las cavidades de 5,4 y 6,4 cm estas dos cavidades están fuera de las condiciones iniciales estipulas, ya que no cumplen con la condición de que el frente de onda les llega en forma plana; sin embargo. Con la finalidad de probar la bondad del modelo, se efectuaron los cálculos que se muestran en la FIGURA 53, lado derecho. Las curvas de dispersión son semejantes a los encontrados para cavidades menores, pero las intensidades promedio de las presiones tienden a caer rápidamente, lo que es notorio en la cavidad de 6,4 cm; encontrándose fuera de la posible solución, de acuerdo a las condiciones iniciales.

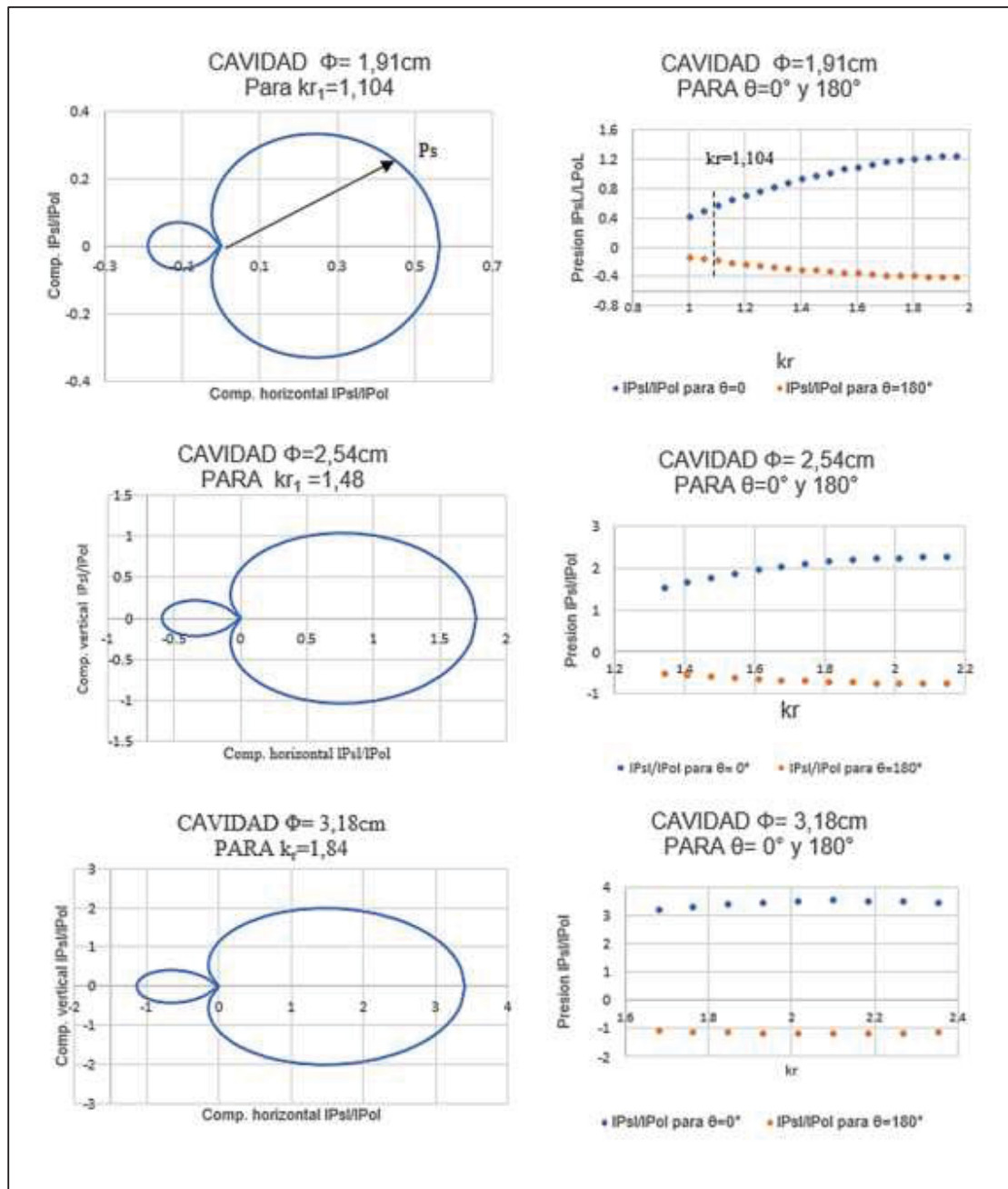
FIGURA 53 - BLOQUE 2, GRAFICOS DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPO CERCANO



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 54 se muestra el comportamiento del proceso de dispersión del bloque 3 (plano LT) el cual es similar al del bloque 2 (plano LR), debido a que el material en el modelo es considerado isotrópico en el área de estudio.

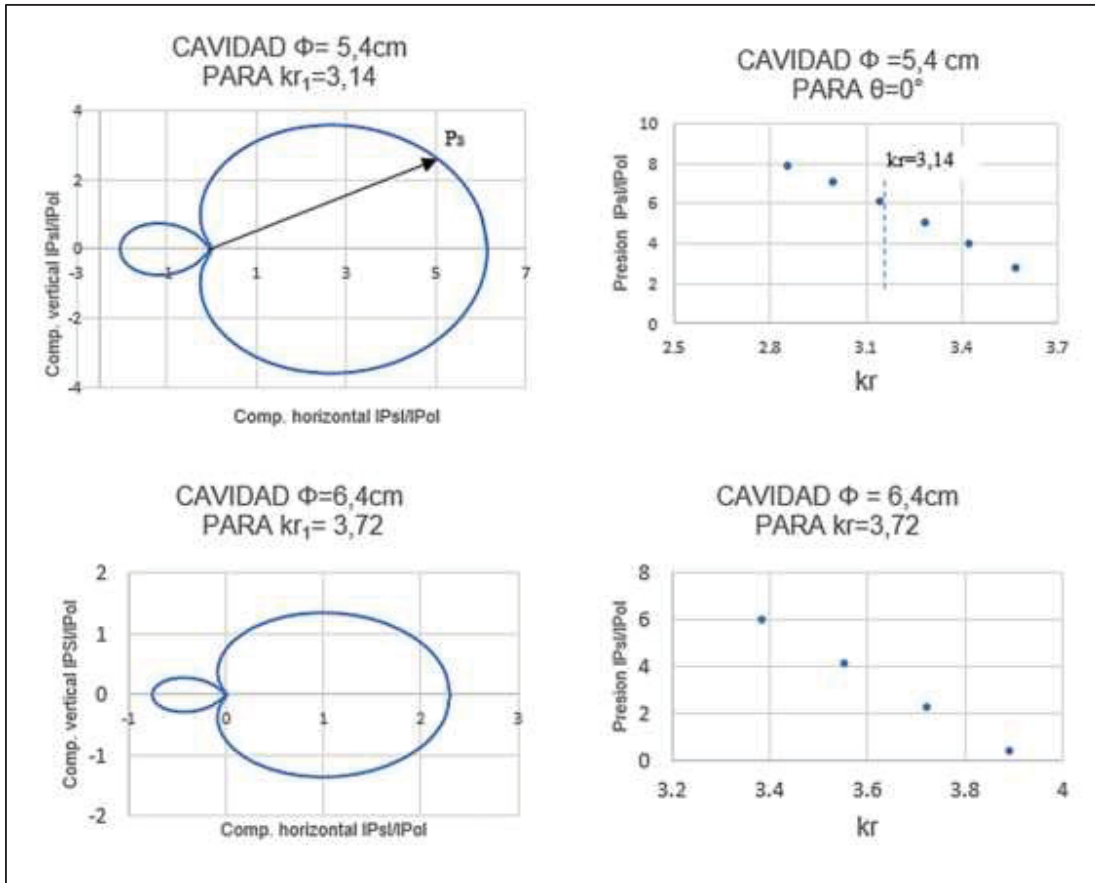
FIGURA 54 - BLOQUE 3, GRAFICO DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPOS CERCANOS



FUENTE: EL AUTOR (2019).

En la FIGURA 55 en forma similar se muestra el comportamiento de las cavidades de 5,4 cm y 6,4 cm y muy similares al de bloque 2, encontrándose la curva de dispersión anómala por no cumplir la condición del frente de onda plana.

FIGURA 55 - BLOQUE 3, GRAFICO DE LA DISPERSION DE ONDAS POR CAVIDADES EN CAMPOS CERCANOS



FUENTE: EL AUTOR (2019).

Cabe señalar que Espinosa (2019b) comparando frentes de onda de compresión en materiales anisotrópicos e isotrópicos muestra una mayor dispersión de los frentes en los primeros; sin embargo, no nota que la influencia de cavidades con diámetros mayores como el de 6cm, en la zona posterior de la cavidad. En el presente estudio se consideró el efecto tanto la onda incidente como la dispersada lo cual muestra el efecto de los diámetros mayores FIGURAS 53 y 55, a pesar de usar un modelo isotrópico del área en estudio.

5 DISCUSION

5.1 PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO ECUACIÓN DE HANKINSON PARA CAVIDADES VERTICALES 1, 2 y 3

De los resultados con el modelo de Hankinson, se puede señalar en el presente estudio, que puede adecuarse a diferentes planos de estudio como LR, LT y RT y se puede ajustarlo variando principalmente el parámetro (n), como se muestra en las FIGURAS 33, 36 y 39; donde se muestra que el modelo se acerca muy bien a los datos experimentales con ajustes promedios de 8,7%, 5,5% y 6,6 % respectivamente, de otro lado, Hearing, Keunecke y Niemz (2012) sobre la influencia del contenido de humedad de la madera en las mediciones y en el cálculo del módulo de Young por lo señala que se debe controlarse muy bien las condiciones de contenido de humedad de las muestras y del medio ambiente del laboratorio y en menor nivel en mediciones en arboles in situ. Además los ajustes encontrados se sustentan con lo indicado por Acuña, Diez y Casado (2006) que al estudiar el comportamiento anisotrópico de las especies ya mencionadas encontró un alto coeficiente de determinación del orden de $\sim 0,9$ para la ecuación polinomial de 2^{do} grado usado. Por lo que podemos señalar que los resultados encontrados con la ecuación de Hankinson se acercan mucho al de materiales reales.

En las FIGURAS 35, 38 y 41 se nota claramente la influencia de los diámetros de las cavidades en las velocidades medidas para el ángulo de 90°; lo cual, permitió para este ángulo encontrar una correlación entre las velocidades y los diámetros de las cavidades con valores de los coeficientes de determinación superiores a 0,89; sin embargo, Balmori, Acuña y Basterra (2016, p. 751) en el estudio de la anisotropía de las especies *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D Don. muestran en sus gráficos una gran dispersión de las velocidades para el ángulo de 90° lo cual estaría en contraposición con los valores encontrados, que puede explicarse, debido a que los valores tomados de las velocidades transversales a distancias de casi 6 m de longitud en las vigas, pero en caso ataques de termitas las distancias de medición son del orden de 10 cm hasta 100 cm y que influyen significativamente. Espinosa et al (2019a) midiendo el tiempo de

propagación de ondas de ultrasonido de 60kHz generadas en un borde exterior del discos de *Fagus sylvatica*, con perforaciones centradas realizadas de 2,9; 5,1 y 7,6 cm de diámetro, encontraron que las velocidades disminuyen significativamente con el diámetro de las cavidades en la zona comprendida entre la dirección radial hasta el ángulo de 40°. Es importante también hacer notar el comportamiento de la dispersión de las ondas en el plano LR de los bloques 1 y 2, FIGURAS 35 y 38 fue mayor que en plano LT del bloque 3, FIGURA 41 debido posiblemente a la presencia de los anillos de crecimiento y radios en el plano LR que influyen en la dispersión, mientras que en el plano LT, donde el material es más homogéneo y la propagación de las ondas se produce a lo largo de capas de madera más uniformes, ya señalado en el punto 2.3.2 (BUCUR 1984, p. 50).

5.2 PRUEBAS DE TRASMISIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN BLOQUES A, B y D DE *Cedrela odorata* CON CILINDROS DE PERFORADOS LONGITUDINALMENTE

Para el bloque A, FIGURA 43 se muestra inicialmente una asimetría con respecto al modelo debido posiblemente a la no uniformidad del material del bloque, En la FIGURA 44 gráfico (44-a) la asimetría va disminuyendo al aumentar el número de cavidades perforadas para ángulos mayores a 90°. De otro lado, en los gráficos desde el (44-d) al (44-g), se muestra la influencia del número de cavidades en las velocidades medidas, donde podemos ver que hay una caída de la velocidad desde los 1455,14 hasta 1323,27 m/s para el ángulo de 90°, desde el bloque limpio hasta el de 7 cavidades, grafico (44-g) de la FIGURA 44 con una diferencia del orden de 131,8 m/s. De los gráficos mostrados podemos concluir que la asimetría inicial con respecto al modelo, para ángulos mayores, se debería a la no homogeneidad inicial del bloque, mientras que al aumentar el número de cavidades la caída de las velocidades debe de estar más relacionada al aumento del camino seguido por la onda de ultrasonido.

En el bloque D se nota el mismo comportamiento asimétrico para el bloque limpio en 3 niveles del bloque, FIGURA 45 Con la perforación de cavidad central y el aumento de su diámetro se genera el aumento de la asimetría de los gráficos. Como se muestra

en la FIGURA 46 cuando el diámetro llega 60mm, donde se puede notar para el de 90° caída desde 1520,91 hasta 1327,82 m/s.

5.3 MODELO ORTOTRÓPICO DE LOS BLOQUES 1, 2 y 3

En el comportamiento de los bloques 1, 2 y 3 podemos notar que los cambios en los coeficientes C_{22} y C_{33} son los más significativos FIGURA 50 y 51 y que tiene que ver con los MOEs, E_R y E_T y que provoca una caída significativa en todas las cuasi velocidades QT de los bloques; que puede relacionarse con lo ocurrido en el modelo de Hankinson con la baja del valor de las velocidades de propagación en la dirección de 90° como se muestra en las FIGURAS 36, 39 y 42. De otro lado, los cambio en los coeficientes C_{11} FIGURA 50 y 51 no crean cambios importantes en las cuasi velocidades de los bloques en los ángulos centrales alrededor de 90°, sin embargo para los coeficientes C_{55} y C_{66} son significativos para ese ángulo. Además, es importante indicar el comportamiento anómalo de los coeficientes C_{12} y C_{13} que indica la importancia del coeficiente de Poisson.

5.4 MODELO DE DISPERSIÓN PARA LOS BLOQUES 2 y 3

En las FIGURAS 52 y 54 se muestran los modelos de dispersión de la onda plana de ultrasonido con las cavidades de diferentes diámetros, considerando el material isotrópico. Se puede notar que la condición de campo cercano muestra el mismo comportamiento que los encontrados por Morse e Ingard (1968), Pao, Mow (1973), Graff (1975), Skudrzyk (1971). Sin embargo, en las FIGURAS 53 y 55 se muestra el comportamiento de la dispersión de ondas de ultrasonido para cavidades de mayor diámetro de 5,4 y 6,4 cm que no permiten una solución de campo cercano.

Finalmente, el desarrollo del presente trabajo de investigación permitirá desarrollar nuevas metodológicas para estudiar los elementos estructurales de los monumentos históricos, mostrando la importancia de las mediciones experimentales usando metodologías no destructivas (NDT), aplicando modelos como el de Hankinson. De otro lado, el resultado del trabajo demuestra la importancia de desarrollar modelos

que utilicen como base, la simetría ortotrópica que permite diferenciar mejor el comportamiento de las simetrías usadas de LR y LT.

5.5 CONSIDERACIONES FINALES DEL USO DE TECNICAS NO DESTRUCTIVAS EN LA EVALUACIÓN DE MONUMENTOS HISTORICOS

En toda evaluación de monumentos históricos se debe de considerarse fundamentalmente que el objeto en estudio, es un patrimonio del país por lo cual debe de cuidarse su conservación.

- Primer criterio, es la utilización de la evaluación visual mediante la cual se inicia la inspección de los elementos estructurales y se establece un procedimiento de acuerdo con el estado de dichos elementos.
- En la inspección propiamente dicha se registra la longitud y profundidad de las galerías visibles en la superficie de la estructura, así como de las grietas o rajaduras descubiertas, se evalúan los apoyos estructurales con las paredes columnas y otros.
- Segundo criterio, es la evaluación de la estructura con la aplicación de equipos no destructivos como los de ultrasonido, tomógrafos acústicos o de impedancia eléctrica y termografía entre otros. Además, de poder usar equipos semi destructivos como el penetrómetro, resistógrafo y extractor de tornillo. El resultado de la aplicación de estos equipos nos brinda información cualitativa y cuantitativa; como el perfil gráfico de la resistencia, que ofrece la madera ante la penetración del taladro en el caso del resistógrafo, o valores de la fuerza de extracción de tornillos, las imágenes térmicas y las velocidades de propagación del sonido, resultados que servirían para la comparación elementos sanos y los obtenidos en las inspecciones. Lo cual permitiría establecer un criterio de clasificación, como el presentado en el cuadro (4). VIZCARRA et al. (2018) quienes elaboraron una clasificación para el elemento en estudio, y que permitirá establecer la decisión del reemplazo o no de ellos.

CUADRO 4 - CLASIFICACIÓN SEGÚN INSPECCIÓN VISUAL E INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA

CLASIFICACIÓN	INSPECCIÓN VISUAL	RESISTÓGRAFO	RESISTENCIA RESIDUAL	DIAGNÓSTICO
C1	deterioro \leq 25% del área	pérdida de resistencia \leq 25%	resistencia residual \leq 25%	BUENO
C2	25% del área < deterioro < 50% del área	25% < pérdida de resistencia < 50%	25% < resistencia residual < 50%	REGULAR
C3	deterioro \geq 50% del área	pérdida de resistencia \geq 50%	resistencia residual \geq 50%	MALO

FUENTE: Vizcarra et al. 2018

En el cuadro 4 se propone una clasificación de las estructuras de madera antiguas en base a la inspección visual y no destructiva, la cual considera que la pérdida del 50% del área en caso de la inspección visual o del 50% de la resistencia evaluada de los gráficos obtenidos con el resistografo o del 50% de la resistencia residual calculada de los datos obtenidos con el ultrasonidos y extractor de tornillo, diagnostica un estado de grave deterioro de la estructura (malo). VIZCARRA et al (2018).

6 CONCLUSIONES

MODELO DE HANKINSON:

- Existe una buena correlación entre las velocidades de ultrasonido medidas en cada bloque y los valores del modelo de Hankinson.
- Se encontró una buena correlación lineal entre los diámetros de las cavidades y las velocidades de ultrasonido para este ángulo.
- En el modelo de Hankinson, en los bloques A, B y D con cavidades longitudinales, se encontró un comportamiento asimétrico de las velocidades con respecto a eje central del emisor de ultrasonido presumiblemente debido a características internas de los anillos de crecimiento, radios y posición de los bloques en el fuste del árbol.
- Igualmente, en el bloque D con cavidades longitudinales concéntricas, igualmente se encontró la asimetría mencionada y la disminución de la velocidad de propagación con el mayor diámetro de las cavidades; sin embargo, la asimetría tiende a disminuir a medida que aumenta el diámetro de la cavidad.

MODELO ORTOTRÓPICO:

- El modelo ortotrópico permite caracterizar las diferencias entre propagación de las ondas de ultrasonido en planos LR y LT, en base a los coeficientes de rigidez medidos experimentalmente.
- El modelo ortotrópico permite notar, que los cambios en los valores de los coeficientes de rigidez están relacionados con los cambios en las cuasi velocidades, siendo la zona más sensible la dirección transversal de 90° para la cuasi velocidad QT, y se encuentra relacionada con la información obtenida con el modelo de Hankinson.
- Asimismo, el cambio en el valor de los coeficientes C_{12} y C_{13} produce efecto contrario en la cuasi velocidad QT debido al efecto desfase que provoca el coeficiente de Poisson respectivo.

MODELO DE DISPERSION DE ONDAS PLANAS

- El modelo de dispersión usando la ecuación para el campo cercano permite relacionar los diámetros de las cavidades y en especial caracterizar el lóbulo de dispersión en las partes posteriores de las cavidades.

REFERENCIAS

ACUÑA, L.; DIEZ, M.; CASADO, M. Los ultrasonidos y la calidad de las maderas estructurales, Aplicación a *Pinus pinaster* Ait. **Boletín de CIDEU** 2-7-26. 2006.

ARMSTRONG, J.; PATTERSON, D.; SNECKENBERGER, J. Comparison of Three Equations for Predicting Stress Wave Velocity As A Function Of Grain Angle. **Wood and Fiber Science** 23(1):32-43.1991.

ARTIGAS, J. N. **Entomología económica: Insectos de interés agrícola, forestal, médico y veterinario (nativos, introducidos y susceptibles de ser introducidos)**. Dos volúmenes (1128 + 948 pp.), Ediciones Universidad de Concepción. 1994.

BALMORI, J.; ACUÑA, L.; BASTERRA, L. Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (FAKOPP) en madera estructural de *Pinus sylvestris* l. y *Pinus radiata* d. Don. **Rehabend** May 24-27. Burgos, España. 2016.

BUCUR, V. Ondes Ultrasonores dans le Bois Caracterisation Mecanique et Qualite de Certaines Essences de Bois.These de Docteur Ingenieur. Institut Superieur des Materiaux et de la Construction Mecanique. France 1984.

BUCUR, V. **Acoustic of Wood**. Springer Series in Wood Sciences. 2nd Edition. 2006.

CENTRO DE DOCUMENTACION DE LA UNESCO (ICOMOS). **Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio**, Arquitectónico.2007.

COSME, L.; HARPO, M.; GUEDES, N.; SELLA, T.; GUEDES, R. Tropical wood resistance to the West Indian drywood termite *Cryptotermes brevis*: If termites can't chew. wileyonlinelibrary.com DOI 10.1002/ps.4785, 2017

CHÁCARA, C. **Evaluación Estructural De Construcciones Históricas En La Costa Peruana Utilizando Tecnologías Modernas: El Caso Del Hotel “El Comercio” En Lima**. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, (2013).

DADSWELL, H.. The anatomy of eucalypt woods. CSIRO, **Division of Applied Chemistry. Technical** Paper N° 66, 1972

DIAZ, A. Sistema Constructivo “**Quincha Prefabricada**”, Informes de la Construcción, vol 36, N° 361, 1984.

ESPINOSA, L.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L.; LASAYGUES, P. Effect of Wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: Array tracing approach. **Ultrasonic** 91, 242-251, 2019a.

ESPINOSA, L. Ultrasound imaging for sustainable and rational management of standing trees in urban areas, tesis doctoral en Mécanique et Génie Civil, **Université de Montpellier**, 2019b

FERREIRA, T.; BORGES, P.; NUNES, L.; MYLES, T. **Termites (Isoptera) in the Azores: an overview of the four invasive species currently present in the archipelago**. Universidade dos Açores. 2013

FONTES, L. R. y MILANO, S. B. Termites as an urban problem in South America. **Sociobiology** Vol. 40, No. 1, 2002.

FOREST PRODUCT LABORATORY. Wood handbook: **Wood as an engineering material. Agric. Handbook No. 72**. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. 1987.

GRAFF, K. **Wave Motion in Elastic Solids**, Dover Publication, New York ,1975

GUITARD, D. **Mecanique du Materiau Bois et Composites**. Colection Nabla, Cepadues Editions. 1987.

HEARING, S.; KEUNECKE, D.; NIEMZ, P. Moistere-dependment orthotropic elasticity of beech **Wood, Wood Sci. Technol** 46:927-938, 2012

HERNANDEZ, S.; SOTOMAYOR, J. Comportamiento elástico de la madera *Acer rubrum* y *Abies balsamea*, Madera bosques vol 20, n. 3 Xalapa sep/nov. 2014

HURTADO, P. Estructuras antisísmicas: las bóvedas encamionadas en el virreinato del Perú, Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Burgos, 7-9 junio 2007, eds. M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, **SEdHC, CICC, CEHOPU**, 2007.

IAWA (International Association of Wood Anatomy). List of microscopic feature for hardwood identification. **Iawa Bulletin**, Leiden, v. 25, n.1, p.219-332. 1989.

IBAMA. **Normas de procedimientos en estudios de anatomía de la madera: I. Angiospermae, II. Gimnospermae**. Brasilia, 19p. 1991.

JOHANSEN, D. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill; 523 p. 1940.

KAZEMI-NAJAFI, S.; SHALBAFAN, A. Internal decay assessment in standing beech trees using ultrasonic velocity measurement, **Eur Forest Res**. 128. 245-350. 2009

MACKENZIE, R. The non-destructive evaluation of Sitka spruce mechanical properties using acoustic methods, **Thesis Edinburgh Napier University** 2009

MASCIA, N. ;ROCCO,F. **Remarks on orthotropic elastic models applied to Wood.** Mat. Res. vol 9, n° 3. San Carlos july/sep, 2006.

MASCIA, T. Concerning the elastic orthotropic model applied to wood elastic properties. **Maderas, Cienc. tecnol.** [online]., vol.5, n.1, pp.03-19. 2003

MASON, J. W. R.; HUBER, T. y FERNÁNDEZ, F. **Introducción a los Hymenoptera de la Región Neotropical. Sociedad Colombiana de Entomología y Universidad Nacional de Colombia**, 851p. 2006.

MENDES, A. S. y ALVES, V. S. **Degradação da Madeira e sua Preservação. Ministério de Agricultura. Instituto Brasileiro de desenvolvimento Florestal.** Departamento de Pesquisa. Laboratório de Produtos Florestais. 1988.

MORSE, P. y UNO INGARD, K. **Theoretical acoustic**, Princeton University Press, 1986.

NORMA TÉCNICA PERUANA. NTP 251.010:2014. **Madera. Método para determinar la humedad.**

NORMA TÉCNICA PERUANA. NTP 251.011:2014. **Madera. Método para determinar la densidad.**

ORKIN, Empresa para el control de las termitas en los EE.UU. Disponible en: <http://www.termites.com/privacy-policy/> 2016.

PAO, Y.; MOW, C. **Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations**, Crane, Russak & Company INC, New York, (1973).

RIPA, S. R.; LUPPICHINI, B. P. Cómo reconocer las termitas. **Revista Tierra Adentro. Sección plagas y enfermedades.** Noviembre – Diciembre, 2004.

RODRIGUEZ, C.; RUBIO DE HITTA, P. Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonido y obtención de parámetros resistentes. **Informes de Construcción.** Vol 47, N° 440 (1995).

SANTOS, A. B. Termitofauna (*Blattodea: Termitidae*) Asociada a Espécies Arbóreas em Área de Reserva da Ilha do Catalão da UFRJ, RJ. **Dissertação.** 2015

SASS, J. **Elements of botanical microtechnique.** Ed. 3. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, London. 1958.

SCHEFFRAHN, R. Colony in Wood, Elemento de madera estructural (*Pinus sp* 391): 30-31. Disponible en: <https://www.cabi.org/isc/help>

SKUDRZYK, E. **The Foundations of Acoustic**, Springer Verlag, 1971.

SOTOMAYOR, J.; VILLASEÑOR, J. Ultrasonido y anisotropía en madera de Thuja plicata y Acer saccharum. **Maderas, Cienc. tecnol.** vol.18 no.3 Concepción jul. p 467 – 476. 2016.

SPAVENTO,E.y KEIL, G. Curso De Xilotecología Departamento **de Ingeniería Agrícola y Forestal Facultad De Ciencias Agrarias Y Forestales Universidad Nacional De La Plata**,2008

VIZCARRA, D.; CANO, J.; YOZA, L.; ACEVEDO, M. Propuesta metodológica para la evaluación de estructuras de madera en monumentos históricos – caso Hotel El Comercio. **Revista Forestal del Perú**, 33 (2): 117 - 132, Julio-Dic. 2018.

WIE, X.; SUN, L.; SUN, Q.; XU, S.; ZHOU, H.; DU, C. Wood stress wave evaluation. **BioResources** 14(4) 8904-8922 2019

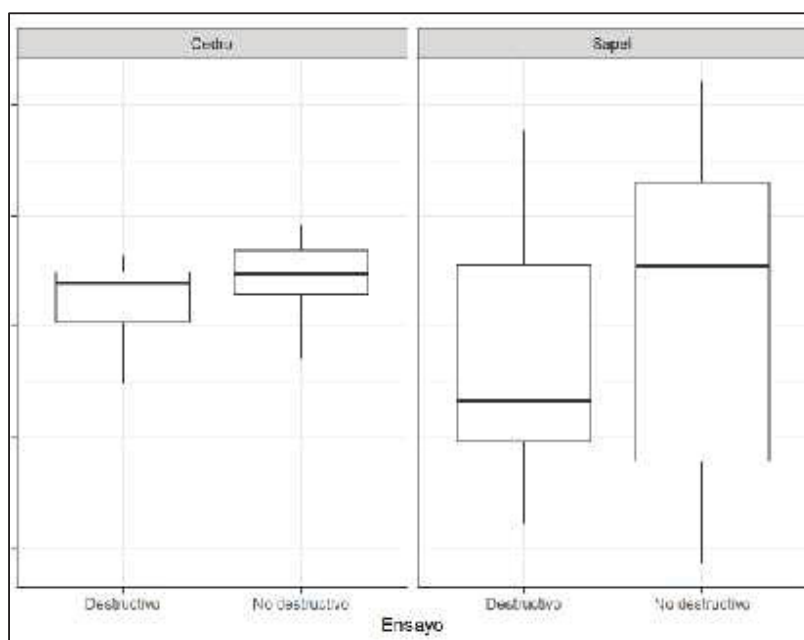
ANEXOS

ANEXO 1

Destructivo Vs No Destructivo

1. Análisis exploratorio

En primer lugar, es importante observar cómo se comportan los datos. Para ello se empleó el diagrama de cajas y bigotes. Como se puede observar, los datos del Sapeli son muy variables, comparados con los del Cedro. En cuanto a los promedios, son bastante similares, entre tipos de ensayos, en ambos casos.



2. Comparaciones estadísticas

2.1 MOE destructivo vs MOE No Destructivo por especie

Entandrophragma sp antiguo (Sapeli)

Con un nivel de confianza de 95%, no se puede rechazar la hipótesis que el MOE destructivo y el MOE No destructivo sean iguales. Previo al análisis se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuos ($W = 0.955$, p -valor = 0.115) y homocedasticidad (chisquare = 0.78, p -valor = 0.38). (Es decir que son iguales).

Previo al análisis se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuos ($W = 0.955$, p -valor = 0.115) y homocedasticidad (chisquare = 0.78, p -valor = 0.38), los cuales se cumplieron. Luego se realizó una prueba T, con un nivel de confianza de 95%, con la cual se llegó a la conclusión de que el MOE destructivo y el MOE No destructivo no presentan diferencias significativas.

##

```
## Two Sample t-test
##
## data:  sapeli$MOE by sapeli$Ensayo
## t = -0.95322, df = 38, p-value = 0.3465
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  -12448.021    4478.106
## sample estimates:
##      mean in group Destructivo mean in group No destructivo
##                78159.71                82144.67
```

Cedrela odorata (Cedro)

Para el caso del cedro, el análisis de residuales mostró que los datos no cumplían el supuesto de normalidad ($W = 0.896$, p -valor = 0.001). La homocedasticidad no presentó problemas (chisquare = 0.01, p -valor = 0.91). Por ello se realizó la prueba no paramétrica U de Mann Whitney y se concluye que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis de igualdad entre el MOE destructivo y el MOE no destructivo. (Es decir que son iguales).

```
##
## Wilcoxon rank sum exact test
##
## data:  cedro$MOE by cedro$Ensayo
## W = 135, p-value = 0.08098
## alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```


2.2 MOE Sapeli vs MOE Cedro por ensayo

Ensayos destructivos

En la comparación del MOE de Sapeli vs el MOE del Cedro, el análisis de residuales mostró el cumplimiento del supuesto de normalidad ($W = 0.946$, $p\text{-valor} = 0.057$) mas no del supuesto de homocedasticidad ($\text{chisquare} = 13.27$, $p\text{-valor} = 0$). Por ello se realizó la prueba no paramétrica U de Mann Whitney y se concluye que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis de igualdad entre el MOE de Cedro y el MOE del Sapeli. (Es decir que son iguales).

```
##
## Wilcoxon rank sum exact test
##
## data:  destructivo$MOE by destructivo$Sp
## W = 259, p-value = 0.1143
## alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

Ensayos no destructivos

En la comparación de los valores de MOE no destructivo de Sapeli vs Cedro, el análisis de residuales mostró el incumplimiento tanto del supuesto de normalidad ($W = 0.931$, $p\text{-valor} = 0.018$) como del supuesto de homocedasticidad ($\text{chisquare} = 15.41$, $p\text{-valor} = 0$). Por ello se realizó la prueba no paramétrica U de Mann Whitney y se concluye que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis de igualdad entre el MOE no destructivo del Cedro y el Sapeli. (Es decir que son iguales).

```
##
## Wilcoxon rank sum exact test
##
## data:  nodestructivo$MOE by nodestructivo$Sp
## W = 187, p-value = 0.7381
## alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

ANEXO 2

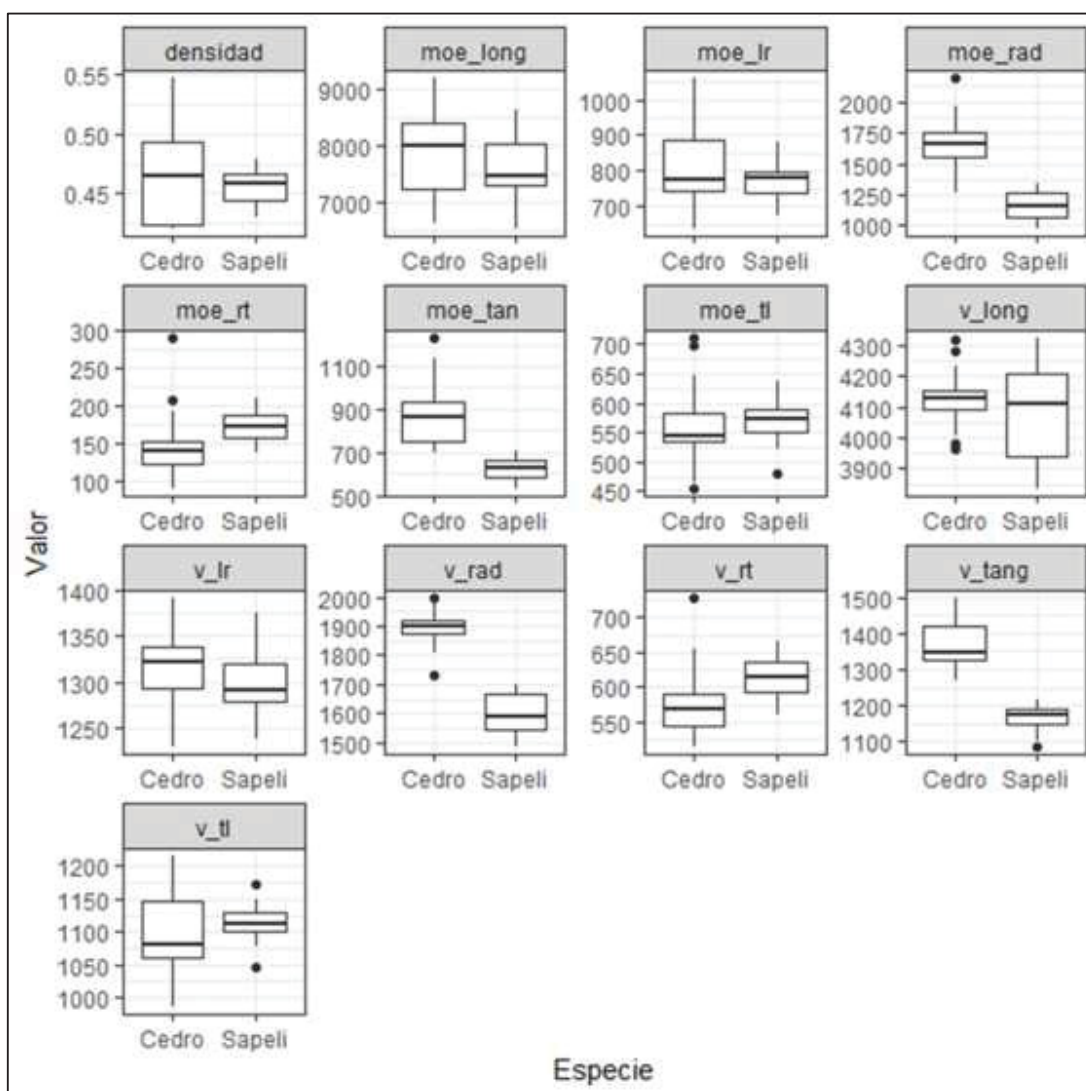
1.-Comparación velocidades y MOES: Sapeli vs Cedro

1.1 Análisis exploratorio

De forma exploratoria se realiza una prueba t-Student. De manera preliminar se observa que las siguientes variables no presentan diferencias significativas entre el Cedro y el Sapeli: Densidad, velocidad longitudinal, VLr, VTI, MOE-Longitudinal, MOE-Lr y MOE-Tl.

Variable	t	p-valor	df	LI	LS
densidad	0.7763148	4.413718e-01	48	-9.793454e-03	0.02211247
v_long	1.6789234	9.966632e-02	48	-1.140486e+01	126.85394541
v_rad	15.7245616	1.447858e-20	48	2.636041e+02	340.89948187
v_tang	14.2240329	7.744876e-19	48	1.773367e+02	235.72490376
v_lr	1.9562487	5.626821e-02	48	-5.608059e-01	40.90482513
v_tl	-1.1115650	2.718620e-01	48	-3.954377e+01	11.38703819
v_rt	-2.8909037	5.753988e-03	48	-5.591714e+01	-10.04217824
moe_long	1.4230304	1.611946e-01	48	-1.164182e+02	680.28962579
moe_rad	10.7513422	2.241188e-14	48	4.036847e+02	589.40482988
moe_tan	8.8334518	1.248520e-11	48	1.929074e+02	306.60416581
moe_lr	1.62	1.12e-1	48	-9.03e+0	84.2
moe_tl	-0.598	5.53e-1	48	-3.80e+1	20.6
moe_rt	-3.10	3.20e-3	48	-4,87e+1	-10.4

Así mismo, se presenta un análisis gráfico del comportamiento de las variables.



1.2 Análisis de supuestos

Se procede a realizar el análisis del supuesto de normalidad de los residuos y homocedasticidad.

Normalidad

Como se observa, sólo la velocidad_{rt} presenta problemas de normalidad. Este problema es fácilmente corregible, por lo que se procede a realizar la prueba de homogeneidad de variancias.

##	W	p_valor
## densidad.W	0.960	0.09
## v_long.W	0.977	0.42
## v_rad.W	0.963	0.12
## v_tang.W	0.981	0.59

```
## v_lr.W      0.992      0.98
## v_tl.W      0.992      0.98
## v_rt.W      0.936      0.01
## moe_long.W  0.972      0.27
## moe_rad.W   0.967      0.18
## moe_tang.W  0.921      0.00
## moe_lr.W    0.977      0.45
## moe_tl.W    0.953      0.05
## moe_rt.W    0.870      0.00
```

Homocedasticidad

Al analizar la homocedasticidad, se da el caso contrario. Se observa que sólo la Velocidad radial, velocidad lr y el moe longitudinal cumplen con este supuesto. Debido a esto, se sugiere trabajar con pruebas no paramétricas.

```
##          Chisquare      p_valor
## densidad 13.6545861      0.00
## v_long   6.9559961      0.01
## v_rad    0.2105511      0.65
## v_tang   7.7602316      0.01
## v_lr     0.3181780      0.57
## v_tl     8.5138518      0.00
## v_rt     5.1590991      0.02
## moe_long 1.2932999      0.26
## moe_rad  5.4887379      0.02
## moe_tan  15.0489665     0.00
## moe_lr   7.7074189      0.01
## moe_rl   7.7319785      0.01
## moe_rt  10.3961740     0.00
```

Prueba de Mann Whitney

Con esta prueba se observa que la densidad, la v_long, la v_tl y el moe_lg no presentan diferencias entre el cedro y el sapeli.

var	statistic	p.value	method	alternative
densidad	333	7.004574e-01	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
v_long	376	2.237137e-01	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
v_rad	625	1.414379e-09	Wilcoxon rank sum test with continuity correction	two.sided
v_tang	625	1.582146e-14	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
v_lr	425	2.888127e-02	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
v_tl	264	3.548285e-01	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
v_rt	151	1.393379e-03	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
moe_long	382	1.822687e-01	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided

var	statistic	p.value	method	alternative
moe_rad	618	7.119656e-13	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
moe_tan	624	3.164291e-14	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
moe_lr	365	3.16e- 1	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
moe_tl	249	2.24e- 1	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided
moe_rt	124	1.55e- 4	Wilcoxon rank sum exact test	two.sided