

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ESPECIES MADERABLES PARA
LA FABRICACIÓN DE CORDÓFONOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL**

JORGE OMAR LIVIA CALDERÓN

LIMA – PERÚ

2022

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente
investigación (Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	TESIS ACUSTICA MADERAS.pdf (D145657189)
Submitted	10/5/2022 8:49:00 PM
Submitted by	Victor Cornejo
Submitter email	investigacionfcf@lamolina.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	investigacionfcf.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis LysPamela Rev. FINAL CORREGIDO 2022-investigación (4).pdf

SA

Document Tesis LysPamela Rev. FINAL CORREGIDO 2022-investigación (4).pdf (D142088078)
Submitted by: investigacionfcf@lamolina.edu.pe
Receiver: investigacionfcf.unalm@analysis.arkund.com

 3

UNU_FORESTAL_2019_T_FRANCINIHUAYNALAYA_V1.pdf

SA

Document UNU_FORESTAL_2019_T_FRANCINIHUAYNALAYA_V1.pdf (D46779827)

 1

Entire Document

48%

MATCHING BLOCK 1/4

SA

Tesis LysPamela Rev. FINAL CORREGIDO 2022-inve ...
(D142088078)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES "PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ESPECIES MADERABLES PARA LA FABRICACIÓN DE CORDÓFONOS" TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL JORGE OMAR LIVIA CALDERÓN LIMA – PERÚ 2022 La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual) ii UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES "PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ESPECIES MADERABLES PARA LA FABRICACIÓN DE CORDÓFONOS. TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL JORGE OMAR LIVIA CALDERÓN Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado: _____

Ing. Manuel Chavesta Custodio, Dr. Presidente _____

_____ Ing. Miguel Ángel Meléndez Cárdenas, Dr. Ing. Rolando Antonio Montenegro Muro, Mg. Sc. Miembro Miembro _____

_____ Mg.Sc. Luis Yoza Yoza, Dr. Ing. Moisés Pascual Acevedo Mallque, Mg.Sc. Asesor Co Asesor

iii

iv DEDICATORIA A mi madre Norma Elena A Janet A Dhasia Elena

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ESPECIES MADERABLES PARA
LA FABRICACIÓN DE CORDÓFONOS.**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL

JORGE OMAR LIVIA CALDERÓN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Manuel Chavesta Custodio, Dr.

Presidente

Ing. Miguel Ángel Meléndez Cárdenas, Dr.

Miembro

Ing. Rolando Antonio Montenegro Muro, Mg. Sc.

Miembro

Mg.Sc. Luis Yoza Yoza, Dr.

Asesor

Ing. Moisés Pascual Acevedo Mallque, Mg.Sc.

Co Asesor

DEDICATORIA

A mi madre Norma Elena
A Janet
A Dhasia Elena

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores por toda la dedicación y por ayudarme con las dificultades; Dr. Luis Yoza Yoza, Ing. Moisés Pascual Acevedo Mallque.

Al Sr. Jorge Guiulfo Gastelu, gerente de la empresa Industrial Maderera Zapote S.A.(IMAZA), por el respaldo durante la fase de campo en su concesión y proporcionar las muestras de madera.

A los luthiers por brindarme su atención, interés y confianza, y por abrir las puertas de sus talleres y de su conocimiento; Antonio Huamaní Granados, Abraham Falcón Pisconte, Marcos Falcón Rodríguez y Julio Falcón Pisconte.

Al Sr. Oscar Cavero Aróstegui por poner a nuestra disposición su talento para poder establecer las conclusiones.

A quienes han acompañado esta etapa y cuyo aporte permitió llegar al final; Dr. Augusto Espejo Santa Maria, Roger Falcón Quicaño, Denis Falcón Quicaño, Wilbert Huarcaya Cornejo, Juan Ruiz y Luis López.

En memoria de quienes empezaron conmigo a gestar este sueño y partieron dejándome el impulso que necesitaba; Germán Falcón Rodríguez †, José Falcón Salcedo † y Hesione Catalina †.

Gracias.

INDICE

I	INTRODUCCIÓN	1
II	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	LA MADERA.....	3
2.2	TRATAMIENTO DE LA MADERA CON APTITUDES ACÚSTICAS.....	6
2.2.1	<i>Corte</i>	6
2.2.2	<i>Estabilidad Dimensional</i>	6
2.2.3	<i>Trabajabilidad</i>	6
2.3	PARÁMETROS ACÚSTICOS RELACIONADOS CON LA MADERA	7
2.3.1	<i>Densidad de la Madera</i>	8
2.3.2	<i>Velocidad de Sonido</i>	8
a.	Amortiguación de la Radiación del Sonido.	9
b.	Resistencia de la Onda Acústica	9
2.3.3	<i>Modos de Vibración</i>	11
2.3.4	<i>Frecuencia Natural</i>	11
2.3.5	<i>Decaimiento Logarítmico</i>	12
2.3.6	<i>Absorción de Sonido</i>	13
2.4	CONSTRUCCIÓN DE CORDÓFONOS DE MADERA	14
III	MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1	LUGAR DE EJECUCIÓN	16
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS	16
3.2.1	<i>Materiales</i>	16
3.2.2	<i>Equipos y Accesorios</i>	17
3.3	METODOLOGÍA	18
3.3.1	<i>Determinaciones Preliminares</i>	18
3.3.2	<i>Parámetros Acústicos</i>	19
a.	Muestras de Maderas para los Ensayos.	19
a.1	<i>Selección de árboles y corte de las muestras</i>	19
a.2	<i>Selección desde Madera Aserrada</i>	21
a.3	<i>Tamaño de Probetas para las Determinaciones Experimentales</i>	22
b.	Ensayos Experimentales	23
b.1	<i>Contenido de Humedad y Densidad</i>	23
b.2	<i>Velocidad de Sonido y Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación y Resistencia de la Onda Acústica</i>	24
b.2.1	<i>Tamaño de Probetas</i>	24
b.2.2	<i>Medición y Cálculo de la Velocidad de Sonido</i>	25
b.2.3	<i>Cálculo del amortiguamiento de la radiación y resistencia de la onda acústica</i>	27
-	Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación.	27

-	Calculo de la resistencia de la onda acústica.....	27
b.3	<i>Modos de Vibración.....</i>	28
b.3.1	<i>Tamaño de Probetas.....</i>	28
b.3.2	<i>Medición de Modos de Vibración.....</i>	31
b.4	<i>Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.</i>	34
b.4.1	<i>Tamaño de Probetas.....</i>	34
b.4.2	<i>Medición de Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.</i>	34
-	Frecuencia Fundamental.	36
-	Decaimiento Logarítmico.....	37
b.5	<i>Coefficiente de Absorción.</i>	40
b.5.1	<i>Tamaño de Probetas.....</i>	40
b.5.2	<i>Procedimiento de Medición de Coeficiente de Absorción.....</i>	42
-	Descripción del Patrón de Onda Estacionaria	42
□	Atenuación.....	43
b.5.3	<i>Calculos del Coeficiente de Absorción.....</i>	44
-	Relación de la Onda Estacionaria en la Superficie de la Muestra Swr (0)	44
-	Coeficiente de Reflexión de la Presión de Sonido	44
-	Coeficiente de Absorción de Sonido.....	45
3.3.3	<i>Estadística</i>	45
3.3.4	<i>Prueba De Sonido.....</i>	45
a.	Diseño y Asignación de Maderas en los Cordófonos Construidos.	45
b.	Fabricación de Cordófonos.....	47
c.	Evaluación de los Cordófonos	47
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1	SELECCIÓN DE ESPECIES	49
4.2	DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	52
4.2.1	<i>Contenido de Humedad y Densidad</i>	52
4.2.2	<i>Velocidad de Sonido y Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación y Resistencia de la Onda Acústica.....</i>	53
a.	<i>Velocidad de Sonido.</i>	53
b.	<i>Amortiguación de la Radiación y Resistencia de la Onda acústica.</i>	55
b.1	<i>Muestras Longitudinales.....</i>	55
b.2	<i>Muestras Radiales.....</i>	58
4.2.3	<i>Modos de Vibración.....</i>	61
4.2.4	<i>Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico</i>	69
a.	Frecuencia Fundamental	69
b.	Clasificación de Rangos de Frecuencias para Maderas en la Fabricación de Cordófonos.	70
c.	Módulo de Elasticidad Dinámico.	70
d.	Decaimiento Logarítmico.	72
e.	Relación entre Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.	74

<i>e.1 Muestras Longitudinales</i>	74
<i>e.2 Muestras Radiales</i>	75
4.2.5 <i>Coefficiente de Absorción</i>	81
4.3 PRUEBA DE SONIDO	86
4.3.1 <i>Evaluación del Cordófono I</i>	87
4.3.2 <i>Evaluación del Cordófono II</i>	89
V. CONCLUSIONES	91
VI. RECOMENDACIONES	92
VII. BIBLIOGRAFIA	93
VIII. ANEXOS	98

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: VALORES ANATÓMICOS Y ACÚSTICOS DE TRES ESPECIES DE ANGIOSPERMAS	4
TABLA 2: PROPIEDADES ACÚSTICAS DE ESPECIES UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTOS MUSICALES DE CUERDA. (SEGÚN RABELO, LPF, BRASÍLIA)	12
TABLA 3: CONSTANTES DE AMORTIGUAMIENTO (DECREMENTO LOGARÍTMICO), CONSTANTES ELÁSTICAS Y VELOCIDADES DE SONIDO.....	15
TABLA 4: EQUIPOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS	17
TABLA 5: CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE TABLEROS DE RESONANCIA	18
TABLA 6. EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD NO DESTRUCTIVO POR EL MÉTODO DE VIBRACIONES TRANSVERSALES EN LA HOJA DE CÁLCULO	39
TABLA 7. CONFORMACIÓN DE ESPECIES DE MADERAS Y ACCESORIOS DE LOS CORDÓFONOS CONSTRUIDOS.....	46
TABLA 8: CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES CONSTRUIDOS.....	48
TABLA 9: ESPECIES NO APTAS PARA LUTHERÍA	49
TABLA 10: ESPECIES POTENCIALES PARA LUTHERÍA: 5 ^{TA} CATEGORÍA.....	50
TABLA 11: ESPECIES POTENCIALES PARA LUTHERÍA: 4 ^{TA} CATEGORÍA.....	50
TABLA 12: ESPECIES POTENCIALES PARA LUTHERÍA: 3 ^{RA} CATEGORÍA	51
TABLA 13: ESPECIES POTENCIALES PARA LUTHERÍA: 2 ^{DA} CATEGORÍA	51
TABLA 14: ESPECIES POTENCIALES PARA LUTHERÍA: 1 ^{RA} CATEGORÍA	51
TABLA 15. CONTENIDO DE HUMEDAD GRAVIMÉTRICO Y POR DETECTOR DE HUMEDAD Y DENSIDAD ANHIDRA	52
TABLA 16: VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE SONIDO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES	54
TABLA 17: VALORES PROMEDIOS DE LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN Y RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA EN MUESTRAS LONGITUDINALES (UNIDADES RELATIVAS).....	55
TABLA 18: VALORES PROMEDIOS DE LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN Y LA RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA EN MUESTRAS RADIALES (UNIDADES RELATIVAS).....	58
TABLA 19: MODOS DE VIBRACIÓN SEGÚN LA FORMA DE LA PLACA Y RANGOS DE FRECUENCIAS	68
TABLA 20: FRECUENCIAS DE RESONANCIA EXPERIMENTALES PROMEDIO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO.	69
TABLA 21: CLASIFICACIÓN DE FRECUENCIAS EN TABLEROS DE RESONANCIA.	70
TABLA 22: MÓDULOS DE ELASTICIDAD LONGITUDINALES EXPERIMENTALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO). 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO.	71
TABLA 23: MÓDULOS DE ELASTICIDAD RADIALES EXPERIMENTALES Y REFERENCIALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO). 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO.	72
TABLA 24: DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EN MUESTRAS LONGITUDINALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO.	73
TABLA 25: DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EN MUESTRAS RADIALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO.	73
TABLA 26: RESUMEN DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN Y RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA.	82
TABLA 27: COEFICIENTES DE ABSORCIÓN Y RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>).....	83

TABLA 28: COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>)	84
TABLA 29. COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DEL PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>).....	85
TABLA 30: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SONIDO DEL CORDÓFONO I.....	87
TABLA 31: RESUMEN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>).....	88
TABLA 32: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SONIDO DEL CORDÓFONO II.....	89
TABLA 33: RESUMEN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>).....	90

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: RELACIÓN DE LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN SONORA Y LA RESISTENCIA DE LAS ONDAS SONORAS PARA DIFERENTES ESPECIES DE MADERA Y OTROS MATERIALES. DE HÓRIG (1929).	10
FIGURA 2: PROCEDIMIENTO DE CORTE DE LAS MUESTRAS DE MADERA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS.	20
FIGURA 3: A: VISTA TRANSVERSAL DE LA TROZA INDICANDO EL CORTE RADIAL DE CUARTONES. B: ESQUEMA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS TABLILLAS CON CORTE RADIAL A PARTIR DE LA TROZA.	20
FIGURA 4: LUTHIERS EN PROCESO FINAL DE HABILITACIÓN DE LA MADERA.	21
FIGURA 5: A: JUEGO DE TAPAS ARMÓNICAS DE SPRUCE (<i>PICEA ENGELMANII</i>). B: JUEGO DE FONDOS DE RESONANCIA DE PALISANDRO (<i>DALBERGIA LATIFOLIA</i>). C: DIMENSIONES DE LA TABLILLA PATRÓN.	22
FIGURA 6: DIMENSIONES DE LA TABLILLA PATRÓN Y PROBETAS PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.	23
FIGURA 7: OBTENCIÓN DE MUESTRAS ACORDES A LA DIRECCIÓN DE LAS FIBRAS EN LATIFOLIADAS. A: MUESTRAS LONGITUDINALES. B: MUESTRAS RADIALES.	24
FIGURA 8: A: LISTÓN DE MADERA PARA CALIBRACIÓN. B: EQUIPO DE CALIBRACIÓN INSTALADO.	25
FIGURA 9: DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE SONIDO. B: EQUIPO INSTALADO EN FUNCIONAMIENTO.	26
FIGURA 10: PROBETAS PARA MODOS DE VIBRACIÓN.	28
FIGURA 11: PLACAS DE VIBRACIÓN TIPO I.	29
FIGURA 12: PLACAS DE VIBRACIÓN TIPO II.	30
FIGURA 13: PATRÓN DE LADOS Y DIRECCIÓN DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO EN UNA PLACA DE VIBRACIÓN.	31
FIGURA 14: A: DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN PARA MODOS DE VIBRACIÓN. B: EQUIPO INSTALADO EN FUNCIONAMIENTO.	33
FIGURA 15: A: DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO PARA REALIZAR MEDICIONES DE ATENUACIÓN Y FRECUENCIA FUNDAMENTAL. B: EQUIPO INSTALADO.	35
FIGURA 16: VENTANA DE APLICACIÓN DEL ANALIZADOR DE FRECUENCIAS FAKOPP INDICANDO EL VALOR DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y SU UBICACIÓN.	36
FIGURA 17: VENTANA DE APLICACIÓN DEL ANALIZADOR DE FRECUENCIAS FAKOPP INDICANDO LOS VALORES DEL DECAIMIENTO LOGARÍTMICO Y LA UBICACIÓN DE LOS ESPECTROS DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL.	37
FIGURA 18: UBICACIÓN DE NODOS DE VIBRACIÓN EN CONDICIONES DE SOPORTE LIBRE Y DISTANCIAS ENTRE NODOS SEGÚN LA CONDICIÓN DE SOPORTE. FAKOPP (2005).	39
FIGURA 19: A: DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DE DISCOS. B: CORTE DE DISCOS DE MADERA.	40
FIGURA 20: APARATO DE ONDA ESTACIONARIA. A: DIAGRAMA DE INSTALACIÓN. B: EQUIPO DE ABSORCIÓN INSTALADO.	41
FIGURA 21: DIAGRAMA DEL PATRÓN DE ONDA ESTACIONARIA.	42
FIGURA 22: DIAGRAMA DE PATRÓN DE ONDA ESTACIONARIA A: CON ATENUACIÓN Y B: SIN ATENUACIÓN.	43
FIGURA 23: INTERPOLACIÓN DEL RECORRIDO DE LA PULSACIÓN CON SONDAS TIPO ESPIGAS DE 19 KHZ.	53
FIGURA 24: RELACIÓN ENTRE LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN Y LA RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA EN MUESTRAS LONGITUDINALES.	56

FIGURA 25: RELACIÓN ENTRE LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN Y LA RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA EN MUESTRAS RADIALES.....	58
FIGURA 26: MODOS DE VIBRACIÓN EN PLACAS CUADRADAS TIPO I DE 20 X 20 CM (GRUPO A).	64
FIGURA 27: MODOS DE VIBRACIÓN EN PLACAS CUADRADAS TIPO I DE 12 X 12 CM. – (GRUPO B).....	65
FIGURA 28: MODOS DE VIBRACIÓN EN PLACAS TIPO II (TAPAY FONDOS DE RESONANCIAD E INSTRUMENTOS MUSICALES).....	66
FIGURA 29: RANGOS DE FRECUENCIAS MODALES EN PLACAS TIPO I - GRUPO “A” (PLACAS CUADRADAS DE 20 X 20 CM.).	67
FIGURA 30: RANGOS DE FRECUENCIAS MODALES EN PLACAS TIPO I - GRUPO “B” (PLACAS CUADRADAS DE 12 X 12 CM.).....	67
FIGURA 31: RANGOS DE FRECUENCIAS MODALES EN PLACAS TIPO II (TAPA Y FONDOS DE RESONANCIA DE INSTRUMENTOS MUSICALES).	67
FIGURA 32: A: RELACIÓN ENTRE FRECUENCIAS DE RESONANCIA Y DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS EN MUESTRAS LONGITUDINALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO. B: TENDENCIAS.....	75
FIGURA 33: A: RELACIÓN ENTRE FRECUENCIAS DE RESONANCIA Y DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS EN MUESTRAS RADIALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO. B: TENDENCIAS.....	76
FIGURA 34: REACCIÓN ENTRE DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS Y FRECUENCIAS DE RESONANCIA: FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO, EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES DE CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>). .	77
FIGURA 35: RELACIÓN ENTRE DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS Y FRECUENCIAS DE RESONANCIA: FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO, EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES DE PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>) Y CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>).....	78
FIGURA 36: RELACIÓN ENTRE DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS Y FRECUENCIAS DE RESONANCIA: FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO, EN MUESTRAS LONGITUDINALES DE PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>) Y EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES DE CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>).	79
FIGURA 37: COEFICIENTES DE ABSORCIÓN PROMEDIO EN MADERAS DE RESONANCIA.	81
FIGURA 38: CURVA DE ABSORCIÓN DE LA CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>) EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA: 600,2 – 1953 Hz.	83
FIGURA 39: CURVA DE ABSORCIÓN DEL PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>) EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA 590,7– 1970 Hz. Y CURVA DE ABSORCIÓN DE CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>) EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA: 600 – 1953 Hz.	84
FIGURA 40: CURVA DE ABSORCIÓN DEL PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>) EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA 604– 1970 Hz. Y CURVA DE ABSORCIÓN DE CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>) EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA: 600 – 1953 Hz.	85
FIGURA 41: MÚSICO PROFESIONAL EL SR. OSCAR CAVERO EJECUTANDO LA PRUEBA DE SONIDO DE LOS CORDÓFONOS 1 Y 2 (GUITARRAS).....	86
FIGURA 42: CORDÓFONO FABRICADO N° 1 (GUITARRA 1) A: VISTA FRONTAL. B: VISTA DEL FONDO DE RESONANCIA. C: VISTA LATERAL (AROS DE RESONANCIA).....	87
FIGURA 43: CORDÓFONO FABRICADO N° 2 (GUITARRA 2) A: VISTA FRONTAL. B: FONDO DE RESONANCIA. C: VISTA LATERAL (AROS DE RESONANCIA).	89

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE ESPECIES EVALUADAS.....	98
ANEXO 2: CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LOS LUTHIERS.....	101
ANEXO 3: COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LA VELOCIDAD DE SONIDO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES.....	103
ANEXO 4: COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LA RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA Y LA AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES.....	104
ANEXO 5: COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO. A) MUESTRAS LONGITUDINALES. B) MUESTRAS RADIALES.....	105
ANEXO 6: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICOS.....	106
ANEXO 7: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES.....	107
ANEXO 8: RELACIONES ENTRE DECAIMIENTOS LOGARÍTMICOS Y FRECUENCIAS DE RESONANCIA: FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{ER} ARMÓNICO), 2 ^{DO} Y 3 ^{ER} ARMÓNICO EN MUESTRAS LONGITUDINALES Y RADIALES: 1. CEDRO (<i>CEDRELA ODORATA</i>), 2. DIABLO FUERTE (<i>PRUMNOPITYS HARMISIANA</i>), 3. DIALIUM (<i>DIALIUM GUIANENSE</i>), 4. ESTORAQUE (<i>MYROXYLON BALSAMUM</i>), 5. PALISANDRO (<i>DALBERGIA LATIFOLIA</i>), 6. SHIHUAHUACO (<i>DIPTERYX ODORATA</i>), 7. SPRUCE (<i>PICEA ENGELMANII</i>) Y 8. ULCUMANO (<i>RETROPHYLLUM ROSPIGLIOSII</i>).....	108
ANEXO 9: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA: A. ARCE (<i>ACER SACCHARUM</i>), B. CAOBA (<i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i>), C. CEDRO (<i>CEDRELA ODORATA</i>), D. DIABLO FUERTE (<i>PRUMNOPITYS HARMISIANA</i>), E. DIALIUM (<i>DIALIUM GUIANENSE</i>), F. ESTORAQUE (<i>MYROXYLON BALSAMUM</i>), G. NOGAL (<i>JUGLANS SP.</i>), H. PALISANDRO (<i>DALBERGIA LATIFOLIA</i>), I. PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>), J. PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>), K. SHIHUAHUACO (<i>DIPTERYX ODORATA</i>), L. SPRUCE (<i>PICEA ENGELMANII</i>), M. ULCUMANO (<i>RETROPHYLLUM ROSPIGLIOSII</i>).....	113
ANEXO 10: CURVAS DE ABSORCIÓN DE SONIDO DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS COMPARADAS CON LA CAOBA: A. ARCE (<i>ACER SACCHARUM</i>), B. CEDRO (<i>CEDRELA ODORATA</i>), C. DIABLO FUERTE (<i>PRUMNOPITYS HARMISIANA</i>), D. DIALIUM (<i>DIALIUM GUIANENSE</i>), E. ESTORAQUE (<i>MYROXYLON BALSAMUM</i>), F. NOGAL (<i>JUGLANS SP.</i>), G. PALISANDRO (<i>DALBERGIA LATIFOLIA</i>), H. PALISANGRE (<i>BROSIMUN RUBESCENS</i>), I. PALO AZUFRE (<i>SYMPHONIA GLOBULIFERA</i>), J. SHIHUAHUACO (<i>DIPTERYX ODORATA</i>), K. SPRUCE (<i>PICEA ENGELMANII</i>), L. ULCUMANO (<i>RETROPHYLLUM ROSPIGLIOSII</i>).....	126

RESUMEN

El presente trabajo está orientado a la evaluación de las propiedades acústicas de la madera de 68 especies tropicales para la fabricación de cordófonos de madera interpretando teóricamente y reproduciendo en el laboratorio las técnicas utilizadas por los luthiers para la selección de la materia prima, tales como el percutir las maderas con los dedos y percibir el sonido muy cerca mediante el oído adiestrado, seleccionar minuciosamente incluso al reflejo de la luz, palpando la dureza o rasgándola utilizando la uña, percibiendo el olor, sabor o lo agradable que sea a la vista. Estos fueron algunos de los indicadores para interpretar estas técnicas mediante métodos físicos explicándolos mediante la velocidad del sonido, los modos de vibración, la frecuencia fundamental, el decaimiento logarítmico y la absorción de sonido, convergiendo en la fabricación de instrumentos musicales con maderas alternativas en combinación con maderas de uso tradicional, para ser evaluados finalmente por un músico profesional; resultando seleccionada la madera de *Symphonia globulifera* para la producción de fondos y aros de resonancia en cordófonos de madera.

Palabras clave: Maderas de resonancia, propiedades acústicas, luthier, cordófonos de madera.

ABSTRACT

*The present work is oriented to the evaluation of the acoustic properties of the wood of 68 tropical species for the manufacture of wooden chordophones, interpreting theoretically and reproducing in the laboratory the techniques used by the luthiers for the selection of the raw material, such as the strike the wood with your fingers and perceive the sound very closely through the trained ear, carefully select even the reflection of light, feeling the hardness or scratching it using your fingernail, perceiving the smell, taste or how pleasant it is to the eye; These were some of the indicators to interpret these techniques through physical methods, explaining them through the speed of sound, vibration modes, fundamental frequency, logarithmic decay and sound absorption, converging in the manufacture of musical instruments with alternative woods in combination. with woods of traditional use, to be finally evaluated by a professional musician; resulting selected the wood of *Symphonia globulifera* for the production of bottoms and resonance rings in wooden chordophones.*

Keywords: Resonance woods, acoustic properties, luthier, wooden chordophones.

I INTRODUCCIÓN

La madera como material de ingeniería posee propiedades físicas, mecánicas, químicas, entre otras; algunas de estas son más conocidas por su uso tradicional y poco difundidas en investigaciones, como el caso de las propiedades acústicas. Así, nuevas especies maderables se introducen según se mejoran los métodos de extracción y se generan nuevos mercados al aumentar su valor; constituyendo en el conocimiento de las propiedades acústicas una alternativa para dar valor agregado a la madera pues entre los productos de madera de mayor valor y calidad están los instrumentos musicales, que aprovechan al máximo el recurso natural optimizando los cortes al milímetro.

Sin embargo, la falta de información acerca de las propiedades acústicas de las maderas nacionales es una de las limitantes para el desarrollo de la industria de la construcción de instrumentos musicales, actividad que se está realizando de forma artesanal cuyas técnicas constructivas se basan en el conocimiento transmitido o la experiencia de los constructores.

Respecto a la información existente, esta se orienta a maderas de uso tradicional en luthería y otros materiales más homogéneos como metales. Asimismo, en el campo de la arquitectura e ingeniería de la construcción, la acústica de la madera ha sido estudiada en forma poco específica para las diferentes especies.

En cuanto a los instrumentos científicos de medición especializados, éstos son de difícil acceso, y los laboratorios existentes son escasos, por esto es necesario generar la metodología que permita futuras investigaciones. Es importante precisar que no todas las especies maderables tienen propiedades acústicas deseables, ni toda la madera de un árbol es aprovechable en términos acústicos, sobre todo si provienen de bosques naturales, por ello un exhaustivo proceso de selección empieza en el bosque y termina durante el ensamblaje del instrumento musical.

En esta investigación la selección de las muestras de madera se realizó según los métodos tradicionales cualitativos utilizados por los artesanos en la fabricación de cordófonos,

contrastando la evaluación de maderas extranjeras de uso tradicional y maderas alternativas tropicales a través de ensayos cuantitativos, como la velocidad de sonido, modos de vibración, coeficiente de absorción, determinación de frecuencias fundamentales y decaimiento logarítmico. Finalmente se fabricaron los instrumentos musicales para la prueba de sonido a cargo de un músico experto que confirma la aptitud acústica de la madera para fondos y aros de resonancia de las especies tropicales estudiadas.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La Madera

La caoba (*Swietenia macrophylla*) y el cedro (*Cedrella odorata*) son algunas especies tropicales que han sido evaluadas para la manufactura de instrumentos de cuerda (Van Der Slooten *et al.*, 1993).

El estudio de la calidad acústica de la madera para instrumentos musicales explica también su procedencia, Así sucedió con el caso de los violines, pues la ubicación de las fuentes de madera ha determinado la localización de los centros principales del oficio; es el caso de los bosques de abetos de crecimiento lento de Brescia y Cremona, que producen una madera de gran calidad, los antiguos constructores de violines usaron las cualidades sonoras de esta madera (Zurdo, 2007).

En maderas tropicales latifoliadas algunas características anatómicas se relacionan con sus propiedades acústicas; En la Tabla 1 se presentan valores comparativos anatómicos y acústicos (Quintanar, 2011).

Se han ubicado las zonas de mayores propiedades acústicas en el tallo o tronco, demostrando que las partes externas del tallo, cerca de la corteza que contienen anillos de crecimiento más estrechos, presentan menor amortiguación debido a la fricción interna y una mayor radiación sonora (Roohnia 2011).

Tabla 1: Valores anatómicos y acústicos de tres especies de angiospermas

VALORES ANATÓMICOS	ESPECIE		
	<i>Prunus brachybotrya</i>	<i>Cleyera sp</i>	<i>Clethra mexicana</i>
Número de poros / mm ²	31	42	56
Diámetro de vasos*	53	56	51
Longitud de vasos*	377	956	622
Anchura poliseriados*	82	19	32
Altura poliseriados*	641	1174	562
Número de rayos poliseriados / mm	2	12	8
Número de rayos uniseriados / mm	8	-	-
Altura de rayos uniseriados*	280	-	-
Anchura de rayos uniseriados*	17	-	-
Longitud de fibras*	410	-	-
Longitud de fibrotraqueidas*	-	1030	748
Grosor de pared celular*	6,6	8	4,4
Diámetro de fibra o fibrotraqueida*	20	14	28
Densidad (Kg/m ³)	692	683	567
VALORES ACÚSTICOS			
Velocidad axial (VLA) m/s	4790	4680	4384
Velocidad radial (VLR) m/s	2167	2401	1443
Velocidad tangencial (VLT) m/s	1293	1654	1069
Y – axial (x 10 ⁸ N/m ²)	160	150	109
Y – radial (x 10 ⁸ N/m ²)	32	40	13
Y – tangencial (x 10 ⁸ N/m ²)	12	19	6
VLA / VLR	2,2	1,9	3
VLA / VLT	3,7	2,8	4,1

Nota: *Valores dados en Micras, Y: Módulo de Young, VLA/VLR y VLA/VLT Cocientes de características anisotrópicas valor cercano a uno, de cualquier cociente, significa que el material es más homogéneo, y entre más grande es su valor, el material es por más anisotrópico ó heterogéneo.

FUENTE: Quintanar *et al.*, 1998.

Cuando la madera se utiliza como resonador en instrumentos musicales de cuerda son importantes el módulo de elasticidad y la densidad, y otras cualidades como grano recto, corte radial, estructura homogénea, diámetros de tronco de 400 milímetros o más, y la ausencia de madera de compresión (Tsoumis 1991 y Bucur 2006, como se citó en Roohnia *et al.*, 2011).

Para seleccionar una madera se busca reducir la variabilidad de la madera debido a su heterogeneidad, la inspección visual no es una metodología fiable y eficiente para seleccionar una pieza de madera adecuada para proporcionar prestaciones acústicas (Roohnia *et al.*, 2011).

En la fabricación de instrumentos musicales se utilizan diversos materiales, y la calidad de la madera puede superar a la mayoría de los materiales utilizados, esto debido a su capacidad para transmitir, ampliar y modificar el sonido; siendo muy importante las habilidades y el talento del constructor. Asimismo, otras características deseadas en las maderas para instrumentos musicales son la durabilidad, belleza estética (matiz, grano, color, dibujos de registros, la apariencia y la textura), resistencia, dureza y ligereza (Foelkel, 2014).

Foelkel (2014) señala que el tradicionalismo y la falta de difusión de investigaciones han restringido el uso de maderas alternativas y esto lleva a encarecer los instrumentos musicales. Actualmente existen cuatro fuentes de madera para instrumentos musicales: reforestación, demolición, maderas nobles y certificadas, y nuevas especies forestales.

Entre otras aplicaciones que valoran la madera como materia prima relacionadas con su caracterización acústica esta la elaboración de muebles como amplificadores de sonido y cajas de resonancia musicales (Bucur 1995, como se citó en Sotomayor *et al.*, 2015).

Se ha investigado la velocidad del sonido en madera de angiospermas templadas y algunas tropicales, concluyendo que decrece en la dirección tangencial entre más anchos sean los radios y se incrementa en dirección radial entre más altos sean. Asimismo, la velocidad de sonido en dirección axial en paredes gruesas con alta cantidad de extractivos es mayor, siendo la porosidad difusa y poca proporción de madera tardía características que destacan la velocidad del sonido (Bucur, 1995).

En cuanto a la velocidad del sonido en especies gimnospermas, en madera de reacción es siempre mayor en madera tardía que en madera temprana, en madera de compresión es ligeramente más baja en las tres direcciones en comparación con la madera normal, atribuyendo esto a que las traqueidas son más cortas y contienen más lignina. Mientras que, en madera de tensión, los valores son mayores, esto se atribuye a sus fibras largas y contienen más celulosa, hemicelulosa y sustancias pépticas. En madera juvenil las velocidades acústicas se van incrementado gradualmente. Mientras que el aumento del porcentaje de lignina disminuye la variabilidad de las velocidades acústicas en las diferentes direcciones (Bucur *et al.*, 1995 como se citó en Quintanar *et al.*, 1998).

En maderas australianas y europeas se ha investigado las propiedades acústicas a partir de las velocidades del sonido, encontrando que los valores altos de las velocidades de sonido en sentido axial parecen estar relacionados con las longitudes de las traqueidas, y en comparación con las velocidades radiales y tangenciales, los valores de las velocidades axiales son más altos y llegan a ser aproximadamente del doble que los valores en las direcciones radiales y un poco más que en las tangenciales, y sus variaciones dependerán de los métodos empleados para determinarlos. Por ejemplo, para *Acer pseudoplatanus*, Bucur (1995) registra una velocidad de 4350 m/s y Schelleng de 3500 m/s. (Bucur 1995, Schelleng, 1982, Bucur y Chivers 1991, como se citó en Quintanar *et al.*, 1988).

2.2 Tratamiento de la Madera con Aptitudes Acústicas

2.2.1 Corte

La selección de madera en corte radial para hacer una tablilla de resonancia para cualquier resonador es un proceso delicado y difícil, incluso para un luthier profesional experimentado (Roohnia *et al.*, 2011).

2.2.2 Estabilidad Dimensional

El desempeño idóneo del instrumento musical está relacionado con la estabilidad dimensional de las maderas que generalmente se fabrican bajo diferentes condiciones climáticas del lugar donde se va a utilizar; en cuanto al secado de madera aserrada para instrumentos de cuerda existen tres tipos: (1) Secado al aire libre, (2) secado artificial convencional; y (3) secado a baja temperatura (deshumidificación). Asimismo, la calidad del sonido depende de las alteraciones dimensionales, contenido de humedad, la estructura y la densidad de la madera (Van der Slooten *et al.*, 1993).

2.2.3 Trabajabilidad

La Trabajabilidad de la madera es importante como parte del proceso de selección de una madera alternativa, y tiene que ver directamente con el acceso del fabricante a la tecnología, la calidad de las propiedades de maquinabilidad de la madera influyen en la calidad del acabado superficial del instrumento musical y es importante para los estándares industriales, pero no son el criterio principal pues lleva mucho trabajo manual y otros requisitos (Van der Slooten *et al.*, 1993).

2.3 Parámetros Acústicos Relacionados con la Madera

En un proceso de selección apropiada para hacer un tablero de resonancia, el corte de la madera debe ser radial, y puede ser asistida utilizando una descripción acústica que incluya el módulo específico de elasticidad, el coeficiente acústico, la amortiguación y la eficiencia de conversión acústica; ayudando al luthier a identificar la variación de las propiedades acústicas de la médula a la corteza, utilizando un procedimiento no destructivo (Roohnia *et al.*, 2011).

Las principales propiedades que hay que estudiar en las maderas para instrumentos musicales son la durabilidad, estabilidad dimensional, uniformidad (homogeneidad), dureza, rigidez, densidad, elasticidad, trabajabilidad, ausencia de defectos (deformación, nudos, grietas, rajaduras, etc.), resistencia a la compresión, cizallamiento (esfuerzo cortante y contracción), la belleza estética, capacidad de transmisión de ondas sonoras (ondas efecto modificador de velocidad, etc.), velocidad de propagación del sonido y capacidad de aislamiento de sonido (Foelkel., 2014).

Entre los factores que pueden afectar la magnitud de los coeficientes acústicos están la densidad de la madera, módulo de elasticidad, el contenido de humedad y la temperatura; por ello deben mantenerse constantes durante los experimentos (Tsoumis 1991, como se citó en Roohnia *et al.*, 2011).

Para evaluar la calidad de la madera de un instrumento musical, Spycher *et al.*, (2008) emplea la densidad, el módulo de elasticidad, la velocidad del sonido, el coeficiente acústico (coeficiente de radiación), la eficiencia de conversión acústica y el índice de sonoridad; además Wegst (2006), describió el coeficiente de amortiguación por fricción interna (Roohnia *et al.*, 2011).

El módulo específico de elasticidad, el amortiguamiento y la eficiencia de conversión acústica se tienen en cuenta como importantes propiedades acústicas de la madera para instrumentos musicales (Sedik *et al.*, 2010 como se citó en Roohnia *et al.*, 2011).

2.3.1 Densidad de la Madera

La densidad de la madera, es un buen descriptor de sus características acústicas. (Aramaki, citado por Sotomayor *et al.*, 2015).

La densidad es importante para la sonoridad de la madera porque la hace menos porosa, y la porosidad de la madera amortigua su sonido, así al disminuir la porosidad, aumenta la resonancia produciendo un sonido más brillante (Zurdo, 2007).

En la fabricación de instrumentos musicales es aconsejable una cuidadosa selección de la madera según su densidad y elasticidad (Hansen 1934, como se citó en Kollman *et all.*, 1968).

2.3.2 Velocidad de Sonido

La técnica de ultrasonido y la caracterización mecánica de la madera permiten comprender cómo las ondas acústicas se transmiten a través de la madera; y a partir del cálculo de su velocidad puede ser caracterizada respecto a su anisotropía y a sus propiedades mecánicas. Asimismo, el uso de pruebas por ultrasonido puede determinar el módulo de elasticidad de la madera (Kawamoto y Williams 2002, Pellerin y Ross 2002, como se citó en Sotomayor *et al.*, 2015).

Existen pruebas para la selección de árboles vivos, relacionados con la transmisión y la velocidad de las ondas y vibraciones a lo largo del tronco (Foelkel 2014).

El principio de utilización de los métodos no destructivos está fundamentado en la medición de la velocidad de las ondas mecánicas a través de la estructura celular de la madera, si una alteración existe en la madera, por ejemplo, deterioro del tejido leñoso o colapso del material, la velocidad de ultrasonido variará; ocasionando probablemente un cambio en la estructura del material, el cual resulta en una disminución de sus propiedades elásticas, en este caso, en el módulo de elasticidad calculado a partir de la velocidad y de la densidad del material (Sotomayor *et al.*, (2015).

Aún no se han desarrollado procedimientos normalizados para pruebas dinámicas empleando métodos de evaluación no destructivos (Sotomayor *et al.*, 2015).

a. Amortiguación de la Radiación del Sonido.

El coeficiente de amortiguamiento de la madera, es un buen descriptor de sus características acústicas (Aramaki 2007, citado por Sotomayor *et al.*, 2015).

En instrumentos musicales, es deseable un amortiguamiento relativamente menor debido a la fricción interna de la madera y un coeficiente de radiación sonora absolutamente superior (Roohnia *et al.*, 2011).

Las ondas sonoras absorbidas por la madera están sujetas a un amortiguamiento gradual debido a un fenómeno llamado decaimiento por vibración, otra parte de la energía acústica es disipada por la radiación a la atmósfera o por la fricción interna de la madera (Roohnia *et al.*, 2011).

Las especies de madera, el contenido de humedad, la dirección de la vibración (longitudinal, transversal, torsional) y el modo de vibración inician las variaciones en el amortiguamiento (Tsoumis 1991, como se citó en Roohnia *et al.*, 2011).

La amortiguación debido a la radiación del sonido depende principalmente de la relación entre la velocidad del sonido y la densidad de un material. Asimismo, es responsable de la disminución de las vibraciones libres de cualquier placa (Kollman *et al.*, 1968).

b. Resistencia de la Onda Acústica.

Es una relación entre la velocidad del sonido y la densidad, es importante para la propagación del sonido y especialmente para el reflejo del sonido en el límite entre dos medios, y es bastante diferente para las maderas y los metales (Kollmann *et al.*, 1968) (Figura 1).

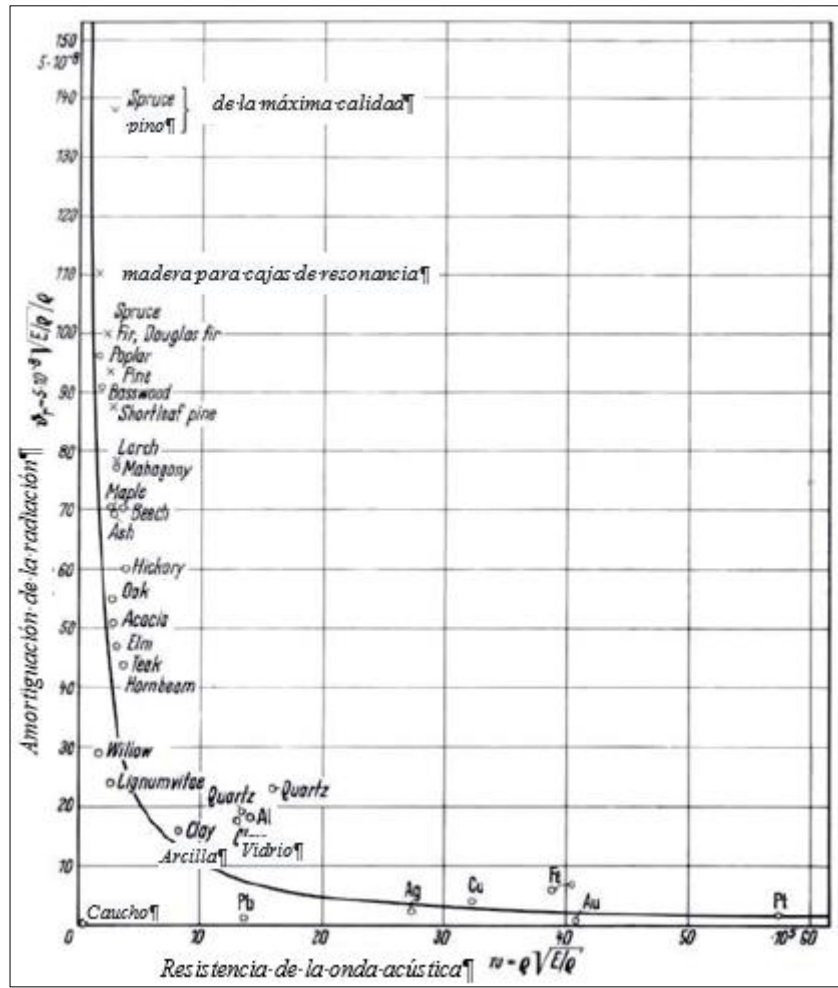


Figura 1: Relación de la amortiguación de la radiación sonora y la resistencia de las ondas sonoras para diferentes especies de madera y otros materiales. de Hórig (1929).

Donde:

Amortiguación de la radiación dependiente de V/ρ (unidades relativas)

Resistencia de la onda acústica dependiente de $V\sqrt{\rho}$ (unidades relativas)

V : velocidad de sonido

ρ : Densidad

FUENTE: Kollman et al., 1968.

2.3.3 Modos de Vibración

En acústica se denomina “modos de vibración” a lo que representan las líneas de Chladni, cada distinta frecuencia de vibración en la cuerda de un violín se corresponde con una serie de “nodos de vibración”, puntos cuya amplitud de vibración es nula. Extendiendo este concepto a la vibración de una placa, los puntos nodales se transforman en líneas nodales: las líneas de la placa de Chladni (Zurdo, 2007).

Elejabarrieta (1997) indica que los modos y las frecuencias propias de vibración determinarían las características del sonido emitido, al respecto refiere a Savart (1791 – 1841) quien comprueba que en violines existe una relación de afinación entre la tapa y el fondo.

En otros campos de investigación relacionados con la madera, Cheng (2017) estudia tableros de partículas y propone la importancia de las propiedades elásticas tales como el módulo de elasticidad y el módulo de corte relacionado al estudio de las formas modales como parte del conocimiento necesario con fines de seguridad y capacidad de servicio

2.3.4 Frecuencia Natural

Las pruebas de vibraciones transversales han confirmado su utilidad para medir la frecuencia natural de una pieza de madera, pues son buenos descriptores de sus características acústicas. (Aramaki 2007, como se citó en Sotomayor *et al.*, 2015).

Ponderando la frecuencia natural con la densidad y otros parámetros derivados de sus dimensiones, es posible predecir el módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de amortiguamiento de la madera (Kawamoto y Williams 2002, como se citó en Sotomayor *et al.*, 2015).

2.3.5 Decaimiento Logarítmico

Es posible interpretar en el campo de la física al decaimiento logarítmico como una caracterización de la capacidad de amortiguación del material o sistema probado, y es influenciado por la fricción interna en el material, la radiación de sonido y la absorción, como soporte. Su definición es según la Fórmula (1) de Fakopp (2005).

$$DL = \beta \times T \quad (1)$$

Donde:

β : Parámetro de decaimiento exponencial ($e^{-\beta T}$)

T: Período de tiempo, inverso de la frecuencia.

Van Der Slooten (1993) utilizó el método de vibración para determinar la frecuencia natural de vibración y el decaimiento logarítmico de maderas para la fabricación de instrumentos de cuerda (Tabla 2).

Tabla 2: Propiedades acústicas de especies utilizadas en la construcción de instrumentos musicales de cuerda. (según Rabelo, LPF, Brasilia)

ESPECIES	f_r Hz	f_r 1° Hz	f_r 2° Hz	DL m/sec	C m/sec	Peso específico a base de 12% CH. g/cm ²
Especies adecuadas para la fabricación de tapas de resonancia						
European spruce (<i>Picea abies</i>)	187	514	1014	0,021	4977	0,33 – 0.47, 0.68, 0.47
envira preta (<i>Onychopatum amazonium</i>)	186	504	992	0,019	4945	0,62
freijó (<i>Cordia goeldiana</i>)	195	535	1044	0,014	5173	0,51
marupá (<i>Simarouba amara</i>)	170	466	921	0,021	4519	0,43
morototó (<i>Schefflera morototoni</i>)	202	549	1064	0,020	5361	0,52
munguba (<i>Pachira spp</i>)	178	478	934	0,021	4733	0,57
pará – pará (<i>Jacaranada copaia</i>)	187	480	938	0,022	4978	0,44
urucú - da mata (<i>Bixa arborea</i>)	172	485	950	0,020	4572	0,34
Especies adecuadas para la fabricación de fondos y aros de resonancia						
European maple (<i>Acer platanoides</i>)	148	404	784	0.026	3928	0.53, 0.63, 0.79*, 0.56, 0.66, 0.61**
amapá doce (<i>Brosimum parinaroides</i>)	186	575	998	0,023	4959	0.69
cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	142	406	800	0,025	3770	0,44
faveira folha fina (<i>Piptadenia suaveolens</i>)	170	469	912	0,020	4526	0,82

continúa...

...continuación

Jacarandá (<i>Dalbergia spruceana</i>)	170	496	962	0,017	4599	1,02
macacaúba (<i>Platymiscium ulei</i>)	176	518	1014	0,017	4675	0,75
mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	166	446	871	0,019	4422	0,53
muiracatiara (<i>Astronium lecointei</i>)	180	488	952	0,020	4804	0,76
tachi - prato	176	484	942	0,020	4687	0,72
tahuarí (<i>Couratari oblongifolia</i>)	172	472	926	0,027	4571	0,52
ucuúba (<i>Virola michelli</i>)	189	508	1012	0,023	4955	0,64

*Bergahorm

*Spitzahorm

Parámetros:

Fr = Frecuencia de resonancia

Fr 1° = Frecuencia de resonancia (1er armónico)

Fr 2° = Frecuencia de resonancia (2do armónico)

DL = Decaimiento logarítmico

C= Velocidad de propagación de sonido

FUENTE: Van Der Slooten, 1993.

2.3.6 Absorción de Sonido

Lancón (2012) indica que la absorción acústica ha sido abordada desde tiempos antiguos en temas de diseño de habitáculos principalmente por el estudio de la reverberación, y que el fenómeno del sonido dentro de los espacios, ha sido un elemento importante para los arquitectos desde hace 2 500 años; el mismo autor en este contexto refiere a Addis (2009), quien especifica estos espacios como teatros, salas de concierto, entre otros.

En un procedimiento acústico, cuando una onda sonora llega a la madera, parte de su energía acústica se refleja, y la otra parte penetra en la masa de madera y a medida que la madera vibra el sonido inicial se intensifica o se absorbe total o parcialmente, lo mismo ocurre cuando se usa madera en cualquier resonador (Tsoumis 1991, citado por Roohnia *et al.*, 2011).

Los coeficientes de absorción de sonido de incidencia normal son más útiles que los coeficientes de incidencia aleatorios en ciertas situaciones; se utilizan por ejemplo para predecir el efecto de colocar material en un espacio cerrado pequeño, como dentro de una máquina (ASTM internacional C 384 – 04).

2.4 Construcción de Cordófonos de Madera

El arte de la luthería se inició en el renacimiento, y se desarrolló específicamente en el norte de Italia durante todo el siglo XVII y el comienzo del XVIII, así durante cientos de años se han mantenido los métodos tradicionales de trabajo empleados por los antiguos constructores, con el tiempo se da el nombre de luthier al fabricante de instrumentos de cuerda, luthería al arte de hacer instrumentos de cuerda y finalmente al oficio del luthier (Foelkel, 2014).

Los instrumentos musicales se van creando y recreando a través de las generaciones llegando a perfeccionarse o a desaparecer, esto va a depender de la aceptación del mismo lo cual se refleja en las creaciones musicales que produzca, como es el caso del violín, al cual el luthier Amati llegó a establecer la forma y dimensiones, las cuales se mantienen. (Zurdo, 2007).

Respecto a la sistematización en la construcción de cordófonos, en la investigación de tapas de resonancia de violines son importantes las medidas de frecuencias naturales, velocidad de sonido y módulo de Young (Tabla 3) (Quintanar *et al.*, 1998).

Una madera adecuada para la fabricación de tableros sonoros presenta anillos de crecimiento muy estrechos pues presentan menor amortiguación, mayor módulo de elasticidad y mayor velocidad de sonido (Roohnia *et al.*, 2011).

El trabajo del luthier debe adaptarse a sacarle el mayor provecho posible de las características propias de cada pieza de madera, pues incluso si son extraídas del mismo tronco no son iguales porque la forma en que ha crecido no es idéntica; al respecto, el buen sonido de un instrumento es, en primer lugar, una cualidad física (Zurdo, 2007).

Tabla 2: Constantes de amortiguamiento (decremento logarítmico), constantes elásticas y velocidades de sonido

Especies	Densidad (Kg/m ³)	Baja frecuencia		Alta frecuencia				Velocidad de sonido (m/s)				Módulo de Young 10 ² N/m ²			
		$2 \pi \tan \delta_L$	f_{rL} (Hz)	$2 \pi \tan \delta_R$	f_{rR} (Hz)	$2 \pi \tan \delta_L$	f_{rL} (Hz)	$2 \pi \tan \delta_R$	f_{rR} (Hz)	V_{LL}	V_{RR}	V_{TL}	V_{TR}	E_L	E_R
Spruce	480	0,022	642	0,069	1,046	0,084	16,587	0,098	13,133	5,600	1,200	1,307	359	150	7,4
	440	0,021	779	0,058	753	0,075	13,025	0,077	12,008	6,000	1,100	1,215	316	160	5,0
Sitka Spruce	180	0,030	245	0,063	190	0,049	14,551	0,071	11,311	5,200	1,700	1,581	309	130	13
	160	0,032	552	0,059	1,156	0,081	11,332	0,070	12,042	5,200	1,500	1,062	242	130	11
Red Spruce	480	0,022	873	0,074	553	0,052	9,931	0,120	8,074	6,300	950	1,060	277	90	4,8
	450	0,022	797	0,063	696	0,052	9,613	0,072	8,718	5,700	1,300	1,192	305	150	7,9
White Spruce	480	0,023	547	0,063	445	---	---	---	---	5,200	1,600	1,241	306	130	12
Spruce	460	0,022	591	0,066	437	0,061	12,817	0,082	14,527	5,700	1,600	1,224	339	150	12

Nota: V_{LL} , V_{RR} , V_{TL} y V_{TR} : Velocidades de ondas longitudinales en los ejes L, R y T; E_L : Módulo de Young Longitudinal; E_R : Módulo de Young radial.

FUENTE: Bucur 1995.

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de Ejecución

Las pruebas fueron realizadas en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina, la determinación de la densidad y humedad se realizaron en el Laboratorio de Propiedades Físico Mecánicas de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales y los parámetros acústicos en el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física y Meteorología de la Facultad de Ciencias.

3.2 Materiales y Equipos

3.2.1 *Materiales*

La madera proviene de la Empresa Industrial Amazónica Zapote S.A – IMAZA (Anexo 1) con la finalidad de seleccionar las especies más apropiadas para la construcción de cordófonos. Asimismo, se incluyeron maderas de uso tradicional: nacionales: caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro (*Cedrela odorata*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), palisangre (*Brosimum rubescens*), diablo fuerte (*Prumnopitys harmsiana*), ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), nogal (*Juglans sp.*) y dialium (*Dialium guianense*); y exóticas: spruce, (*Picea engelmannii*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), y arce (*Acer saccharum*).

3.2.2 Equipos y Accesorios

Se presentan en la tabla 4, indicando el uso según las actividades realizadas.

Tabla 3: Equipos y accesorios utilizados en los experimentos

ACTIVIDAD REALIZADA	EQUIPO/ ACCESORIO
Corte radial	Motosierra, sierra cinta, Cepilladora.
Secado	Horno de secado para madera, Medidor de humedad de contacto.
Contenido de Humedad	Estufa eléctrica, Desecador de laboratorio con silicagel.
Densidad	Vaso de precipitado graduado (beaker), Soporte universal.
Velocidad de sonido	Temporizador ultrasónico FAKKOP, Gel conductor, Prensas, Listón de madera de medidas 0,3 x 1,5 x 100 cm (espesor x ancho x largo), flexómetro.
Modos de vibración	Amplificador potenciado, Parlante para frecuencia medias a altas 10" x 8 Ohm, Cableado con conector de audio analógico, Bicarbonato de sodio, Brochas.
Frecuencia fundamental y decaimiento logarítmico.	Micrófono de prueba, Preamplificador de micrófono, Analizador de espectros de audio en tiempo real de PC, Caucho goma, Esponja de alta densidad, Lijas agua # 1000, Martillos de percusión
Coefficiente de Absorción	Osciloscopio Digital, Parlante 4" x 50 watts, Cableado con conector de audio analógico TRS (Jack) y BNC, Cableado con conector XLR macho y XLR hembra, Micrófono de medición con preamplificador, Tubo de 4" de material liso, Sierra copa de 4", Taladro de banco, Equipo de aire acondicionado, Tubo de acero: Espesor: 1mm x 5mm. Diámetro exterior, 3 mm. de diámetro interior x. 1 m Longitud, Termómetros graduados 1/1. °C, Ducto de ventilación de 4", 2 Poleas de demostración con gancho de 1 canal de 3" de diámetro, Nivel de burbuja, Conexión a tierra.
(2), (3), (4)	Balanza de precisión de 0,1 g.
(4), (5), (7)	Sierra caladora de banco y sierra circular de banco
(6), (8)	Generador de frecuencias
(5), (8)	Consola de mezclas de audio

3.3 Metodología

3.3.1 Determinaciones Preliminares

La evaluación preliminar fue realizada por cinco luthiers, a 68 especies de maderas (anexo 2), con medidas: 2.5 cm x 8.5 cm x 61 cm ó 1” x 3.5” x 24” (Espesor x Ancho x Largo), con dirección de corte: R x T x L. Esto permitió elaborar criterios para el establecimiento de grupos potenciales o el rechazo de algunas especies. Además, se agregaron las especies de uso tradicional en luthería. Los criterios de evaluación utilizados se detallan en la Tabla 5, con estos criterios se seleccionaron especies para las cuales los evaluadores encontraron al menos una posibilidad de uso en la fabricación de cordófonos de madera, siendo elegidas aquellas que hayan sido aprobadas por todos los evaluadores.

Tabla 4: Criterios de evaluación de tableros de resonancia

CRITERIOS DE EVALUACIÓN		LUTHIER				
		“A”	“B”	“C”	“D”	“E”
APROBACIONES (✓)	Sonido			✓		
	Color (tema estético)	✓		✓		
	Secado al natural		✓			
	Textura		✓			
	Calidad de hebra		✓			
	Porosidad		✓			
	Peso (masa)	✓				
	Olor	✓				
	Uso	✓				
	Comparación con maderas tradicionales				✓	✓
	OBSERVACIONES PARTICULARES	Nota/ escala musical			✓	
Recomienda alguna parte específica de cordófono		✓	✓			✓
No recomienda tapa armónica			✓	✓	✓	
Es necesario doblar la madera					✓	

3.3.2 Parámetros Acústicos

Las técnicas utilizadas por los luthiers para la selección de las maderas, tales como la percusión con los nudillos de los dedos y el percibir el sonido muy cerca mediante el oído adiestrado, seleccionar minuciosamente incluso reflejando la luz sobre sus diferentes secciones, palpando la dureza o rasgándolas utilizando la uña, percibiendo el olor, sabor o lo agradable que sea a la vista; son algunos de los indicadores cualitativos observados para reproducir en el laboratorio e interpretar en forma teórica estas técnicas mediante métodos existentes y obtener los parámetros acústicos principalmente relacionados como son:

- Velocidad del sonido
- Modos de vibración
- Frecuencia fundamental y decaimiento logarítmico y
- Absorción de sonido

Y convergiendo en la fabricación de instrumentos musicales con maderas alternativas para ser evaluados finalmente por un músico profesional. Además, se incluyó la determinación de la densidad y contenido de humedad necesarios en la caracterización de la madera como material acústico.

a. Muestras de Maderas para los Ensayos.

a.1 Selección de árboles y corte de las muestras.

En el caso de las especies palo azufre (*Symphonia globulifera*) y dialium (*Dialium guianense*), se seleccionó un árbol maduro con el mayor diámetro de fuste basal en el rodal, se extrajo un tuco de un metro de la parte basal libre de defectos, los cuales se cortaron cuartones y/o cuñas para corte radial esto con la finalidad de evitar rajaduras de la madera verde durante su transporte. La Figura 2 ilustra la secuencia y la figura 3 indica el procedimiento para la obtención de la muestra de madera con orientación radial.

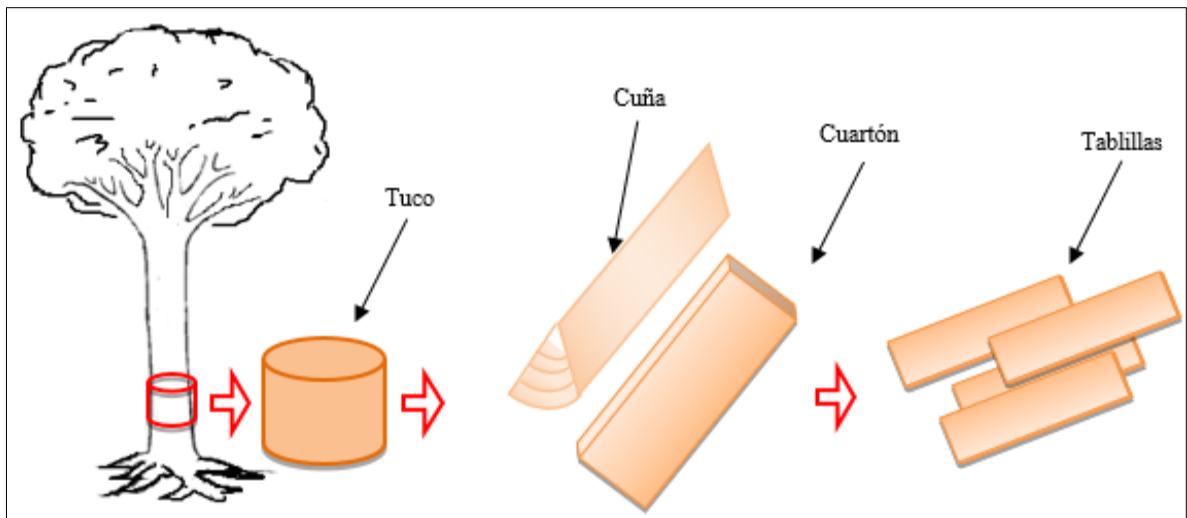


Figura 2: Procedimiento de corte de las muestras de madera para la obtención de las probetas.

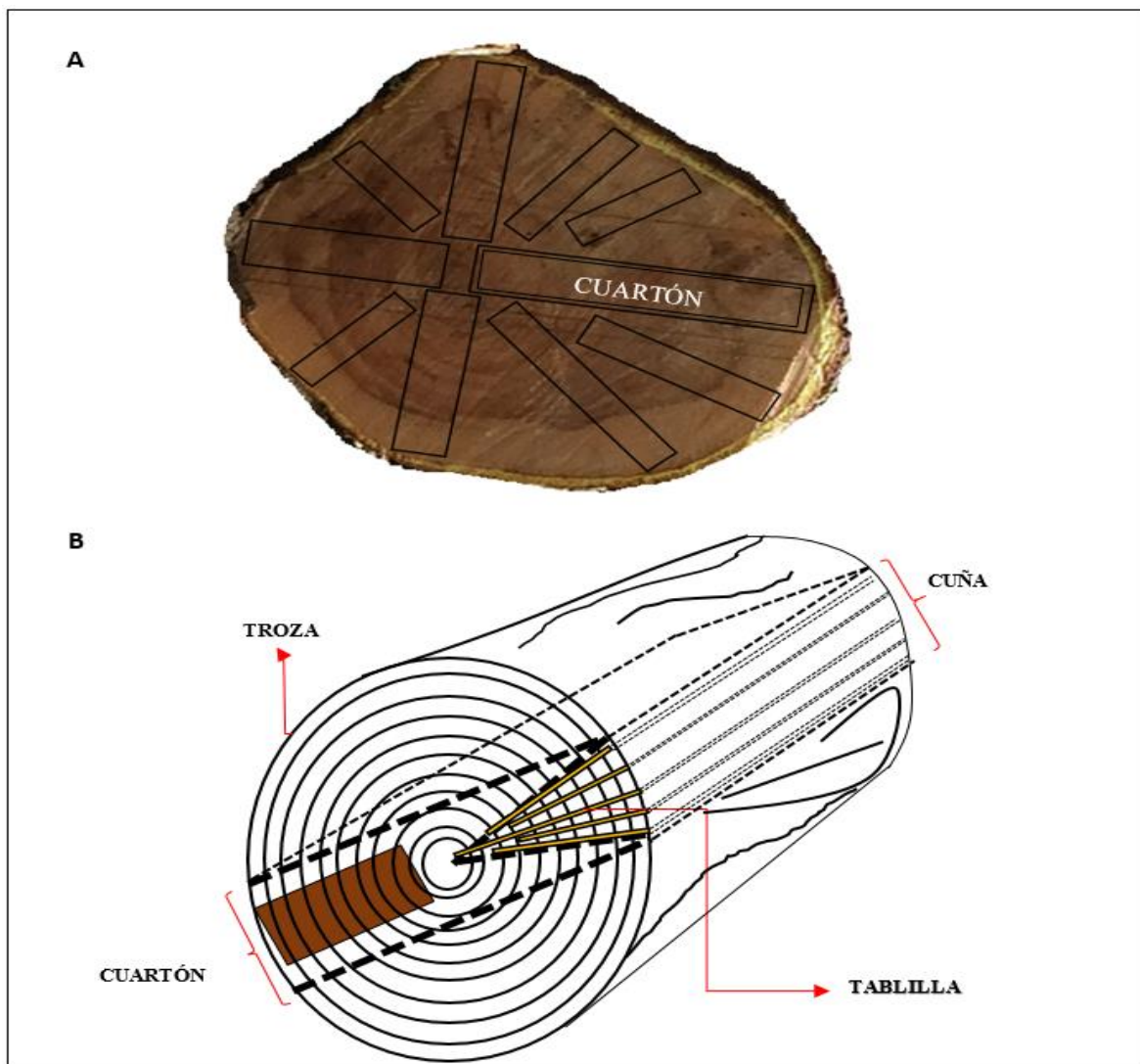


Figura 3: A: Vista transversal de la troza indicando el corte radial de cuartones. B: Esquema para la obtención de las tablillas con corte radial a partir de la troza.

a.2 Selección desde Madera Aserrada

En el caso de las especies ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), diablo fuerte (*Prumnopitys harmsiana*), palisangre (*Brosimum rubescens*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), cedro (*Cedrela odorata*), caoba (*Swietenia macrophylla*), se consideró sólo aquellas libre de defectos y con orientación radial, cuya habilitación final fue realizada en los talleres de los luthiers (Figura 4); mientras que el spruce (*Picea engelmannii*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), nogal (*Juglans sp.*) y arce (*Acer saccharum*) se adquirieron por importación directa en tablillas pre dimensionadas.



Figura 4: Luthiers en proceso final de habilitación de la madera.

a.3 Tamaño de Probetas para las Determinaciones Experimentales

Aún no se ha establecido una norma técnica acerca del tamaño de las probetas para ensayos acústicos en madera para la construcción de cordófonos, por ello se realizó el estudio en probetas que se puedan extraer optimizando las medidas de las secciones que están estandarizadas para los kits ó juegos de tapas armónicas y fondos de resonancia seleccionados para guitarras (Figura 5), cuyas medidas son 0,3 cm x 22,8 cm x 60,5 cm. (espesor x ancho x Longitud); se utilizó un juego de tablillas por especie (dos piezas). A estas piezas las denominamos “*tablillas patrón*”; posteriormente se obtuvieron a partir de ellas las diferentes probetas para los diferentes ensayos acústicos (Figura 6).

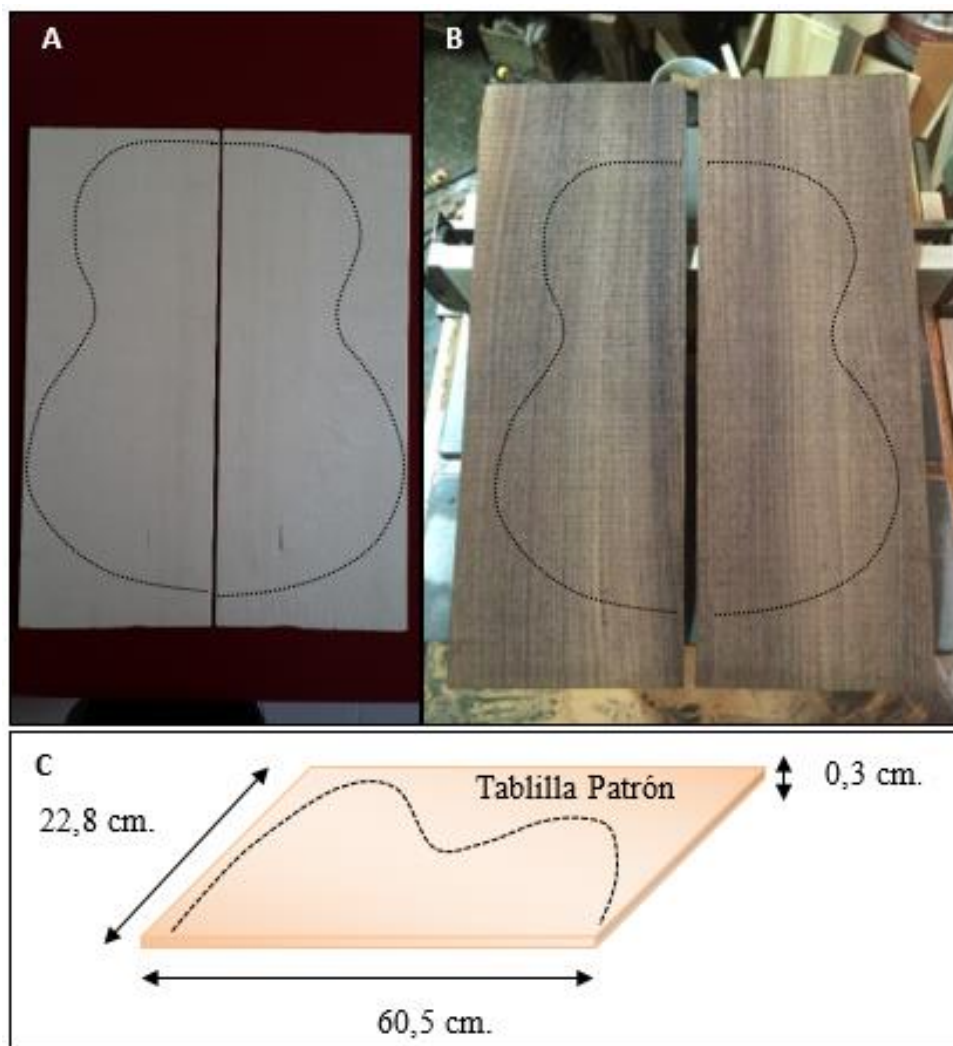


Figura 5: A: Juego de tapas armónicas de spruce (*Picea engelmannii*). B: Juego de fondos de resonancia de palisandro (*Dalbergia latifolia*). C: Dimensiones de la tablilla patrón.

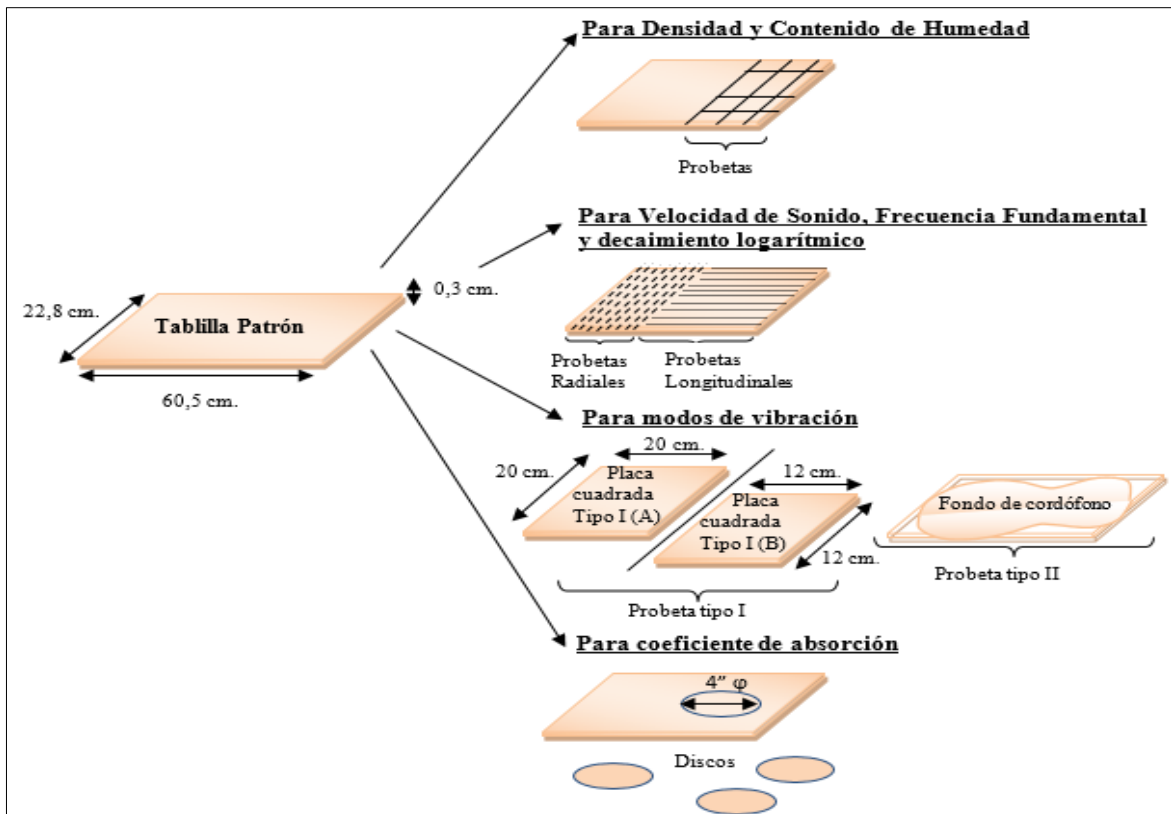


Figura 6: Dimensiones de la Tablilla patrón y probetas para los ensayos experimentales.

b. Ensayos Experimentales

b.1 Contenido de Humedad y Densidad

Los ensayos se ejecutaron de acuerdo al procedimiento estipulado en las Normas Técnicas Peruanas (NTP) 251.010 “MADERA. Método para determinar el contenido de Humedad” y NTP 251.011. “MADERA. Método para determinar la densidad”; con excepción del tamaño de las probetas cuyas dimensiones se indican en el ítem anterior. Se utilizó el detector de humedad eléctrico con las maderas disponibles en la ciudad de Lima: ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), nogal (*Juglans sp.*), arce (*Acer saccharum*), caoba, (*Swietenia macrophylla*) y cedro (*Cedrela odorata*).

En relación a la densidad, Spavento (2008), indica que la densidad aparente anhidra y normal son las de mayor uso en investigación y en la industria, respectivamente. Para este estudio se determinó la densidad anhidra con el fin de calcular la Amortiguación de la radiación sonora y la resistencia de la onda acústica.

b.2 Velocidad de Sonido y Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación y Resistencia de la Onda Acústica.

b.2.1 Tamaño de Probetas.

El tamaño de las probetas para medir la velocidad del sonido en sentido longitudinal y radial se definió teniendo en consideración: (a) La mínima superficie de contacto que necesitan los sensores o sondas de medición; (b) La distancia mínima de alcance necesaria entre las sondas de medición; (c) La relación ancho y longitud mínimos considerada por los fabricantes del equipo de medición para garantizar la medición de una onda plana (Fakkop 2005); (d) Las dimensiones estándar de las tapas armónicas y fondos de resonancia (tablillas patrón) y (e) La orientación de las fibras y su uniformidad.

En base a estas consideraciones se pudo obtener de una pieza de tapa o fondo de resonancia, diez (10) probetas radiales de 0,3 cm x 1,5 cm x 30 cm y diez (10) probetas longitudinales de 0,3 cm x 1,5 cm x 20 cm. (espesor x ancho x longitud), considerando las pérdidas de madera por líneas de corte y posibles descartes de muestras.

Para el caso las coníferas no se encontró mayor dificultad de corte debido a su homogeneidad, para el caso de muestras obtenidas de especies latifoliadas procedentes de bosques naturales se seleccionaron muestras con veteados uniformes y se realizaron cortes siguiendo la dirección de las fibras. (Figura 7).



Figura 7: Obtención de muestras acordes a la dirección de las fibras en latifoliadas. A: muestras longitudinales. B: muestras radiales.

b.2.2 Medición y Cálculo de la Velocidad de Sonido.

La velocidad de transmisión del sonido entre dos puntos en sentido longitudinal y transversal a las fibras se midió con el temporizador ultrasónico Fakopp. Se realizó la calibración para estimar el error por instrumentación, mediante la medición consecutiva de la velocidad de sonido entre puntos a lo largo de una tablilla del mismo espesor y ancho de las probetas, pero de longitud 1 m (Figura 8 A y B). Luego en una gráfica de dispersión de distancia y tiempo, se definió la ecuación y se encontró la constante que representa al error debido al recorrido de la onda ultrasónica a través del cable transductor. Se registraron 10 puntos de medición con un distanciamiento de 10 cm. entre ellos, la determinación correcta de la velocidad ultrasónica se da descontando el tiempo de tránsito del impulso eléctrico a través del transductor. Se controló la temperatura del entorno en ± 19 °C.



Figura 8: A: Listón de madera para calibración. B: Equipo de calibración instalado.

El cálculo de la velocidad de sonido se determina mediante la Fórmula (2) de Fakopp (2005).

$$V = \frac{1000 \cdot d}{(t - \tau)} \quad (2)$$

Donde:

V: Velocidad de sonido en m/s

d: Distancia entre sondas (mm)

t: Tiempo (μ s)

τ : Corrección de tiempo (μ s)

La figura 9 A y B ilustran los equipos y accesorios para la medición de las velocidades de sonido

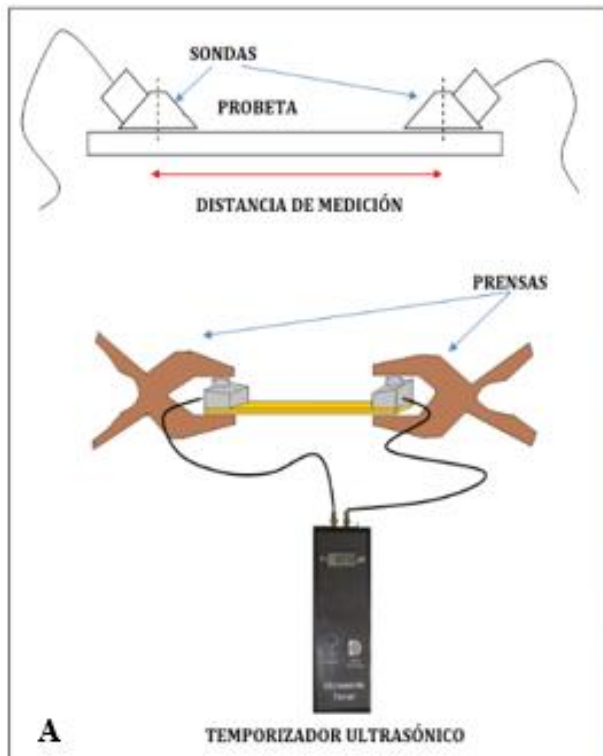


Figura 9: Diagrama de instalación del equipo de medición de velocidad de sonido. B: Equipo instalado en funcionamiento.

b.2.3 Cálculo del amortiguamiento de la radiación y resistencia de la onda acústica.

Los promedios de resistencia de la onda acústica y amortiguación de la radiación definen un comportamiento logarítmico, para el modelamiento de la gráfica se están utilizando unidades CGS (Sistema cegesimal de unidades), pues al utilizar unidades SI. (Sistema internacional de medidas) en el eje X se obtienen valores elevados con muchos dígitos y en el eje Y unidades muy cortas, lo que haría de las curvas poco explicativas. Se están utilizando unidades mixtas: para resistencia $\text{g/cm}^2\text{s}$ y para amortiguamiento $\text{cm}^4/\text{g s}$.

- Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación.

También es llamado amortiguación de la radiación sonora, está en función de la velocidad de sonido y la densidad y se calcula según Kollman (1968) mediante la Fórmula (3).

$$\mathbf{Amortiguamiento\ de\ la\ vibración = \frac{V}{D_o}} \quad (3)$$

Donde:

V: Velocidad de sonido (m/s) longitudinal (Lg) o radial (Rd)

Do: Densidad anhidra (g/cm^3)

- Calculo de la resistencia de la onda acústica.

También llamado resistencia acústica, está en función a la velocidad de sonido y la densidad y se define según Kollman (1968) mediante la siguiente Fórmula (4).

$$\mathbf{Resistencia\ acústica = D_o * V} \quad (4)$$

Donde:

V: Velocidad de sonido (m/s) longitudinal (Lg) o transversal (Tr)

Do: Densidad anhidra (g/cm^3)

b.3 Modos de Vibración.

Esta prueba consistió en excitar la madera generando ondas de diferentes frecuencias con la finalidad de detectar mediante la resonancia los “nodos” y “modos” de vibración que la madera pueda reproducir. El contenido de humedad de la madera fue de 10% y la temperatura ambiente se controló artificialmente en 19 °C.

b.3.1 Tamaño de Probetas.

Se ensayó en dos tipos de probetas: Probeta Tipo I (A y B) y Probeta Tipo II, de acuerdo a la disposición del material disponible (Figura 10).

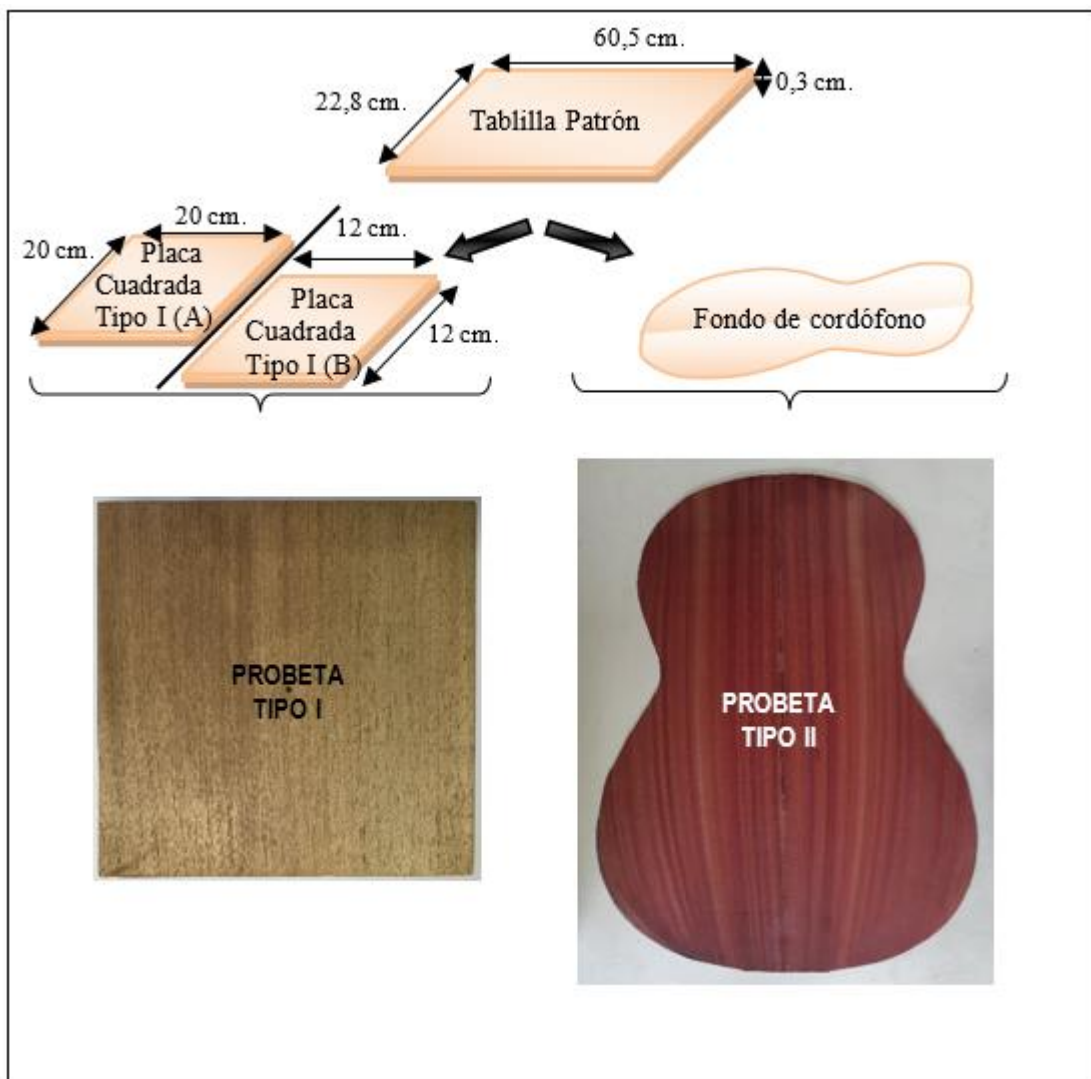


Figura 10: Probetas para modos de vibración.

Así en las probetas tipo I (Figura 11) se optimizó la superficie de las muestras; el primer grupo (A) están conformados por probetas que cubren la circunferencia que define el cono del parlante y son las de mayor superficie (400 cm²) aquí tenemos al spruce (*Picea engelmannii*), palisangre (*Brosimum rubescens*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), nogal (*Juglans sp.*), arce (*Acer saccharum*), ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), caoba (*Swietenia macrophylla*), y cedro (*Cedrela odorata*). El segundo grupo (B) conformados por probetas de superficie circunscrita en la circunferencia que define el cono del parlante (150 cm²), aquí están el diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), palo azufre (*Symphonia globulifera*), palisangre (*Brosimum rubescens*), dialium (*Dialium guianense*) y shihuahuaco (*Dipteryx odorata*).

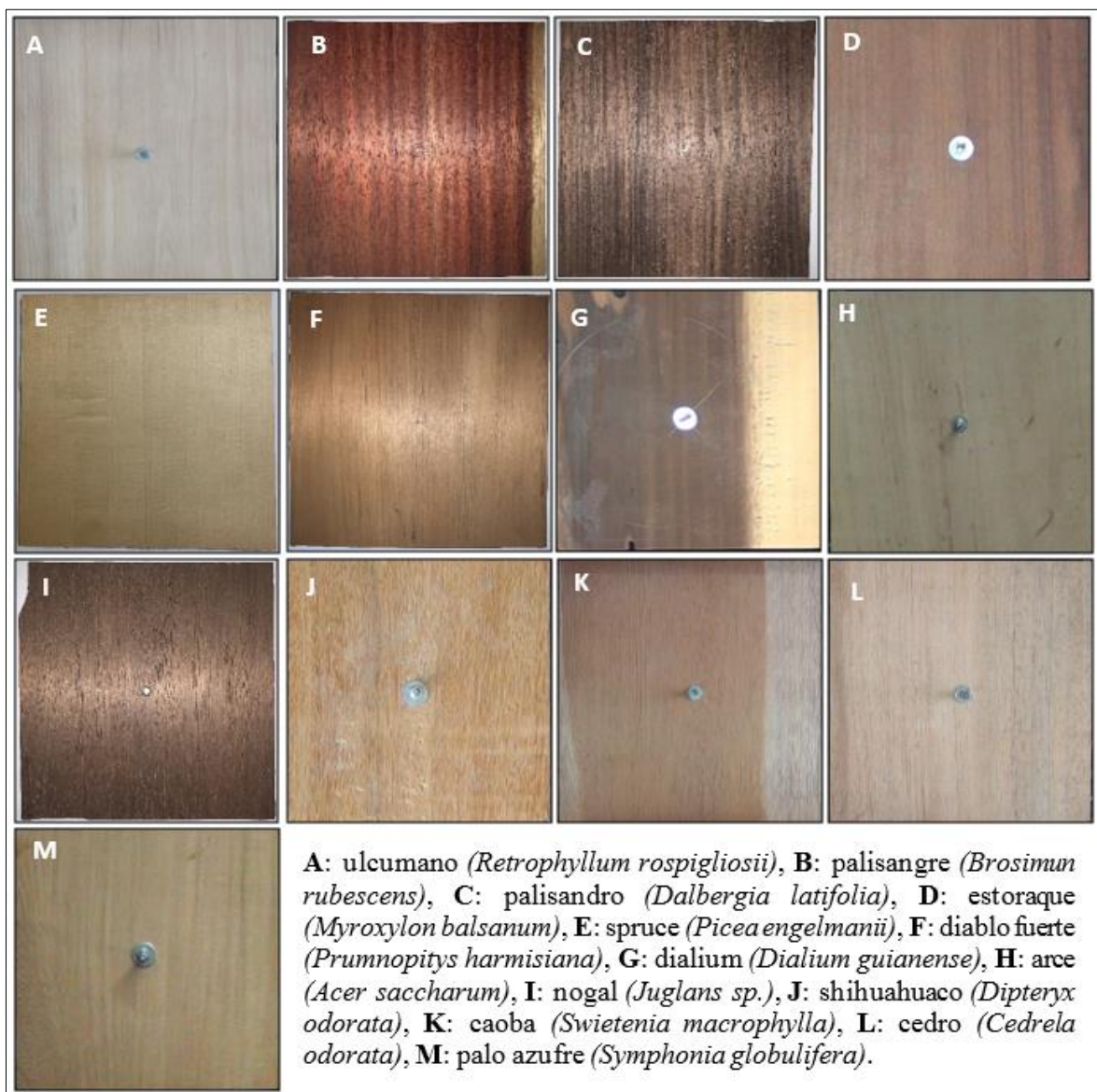
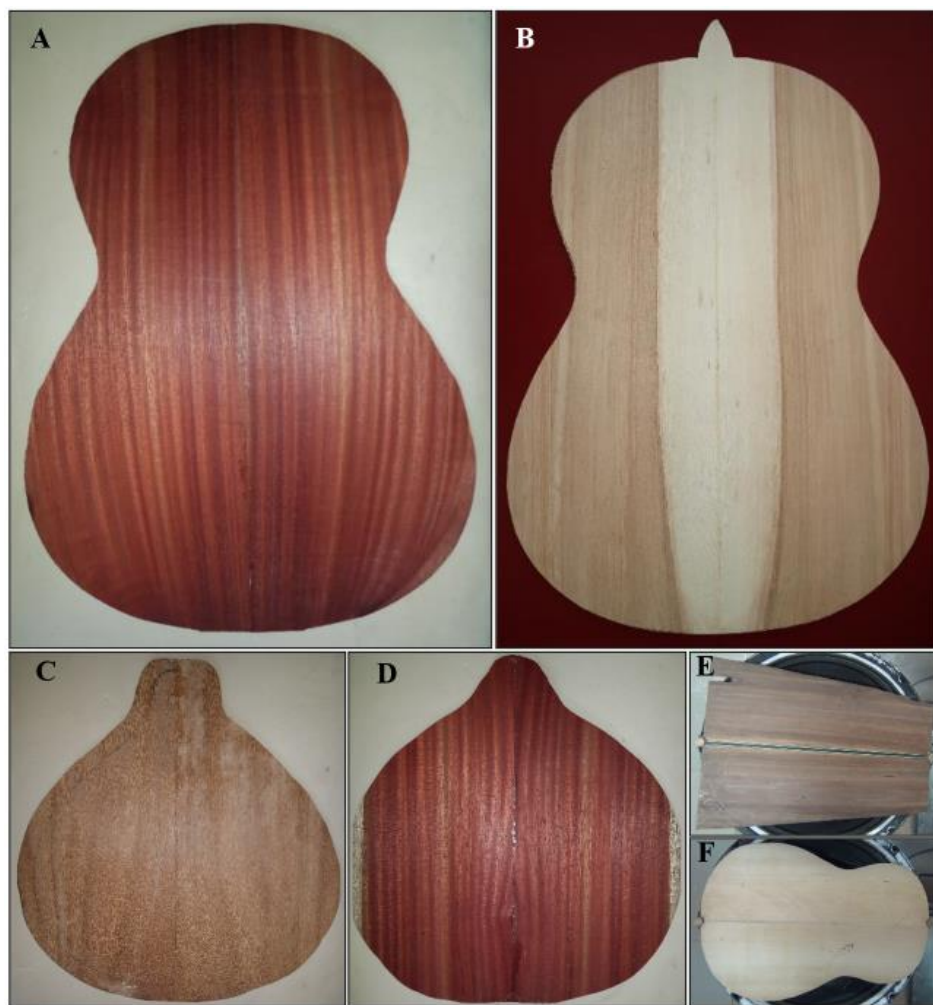


Figura 11: Placas de vibración tipo I.

Las probetas tipo II fueron los fondos pre – ensamblados de los cordófonos de prueba en su forma preliminar, los cuales varían en superficie de acuerdo al cordófono fabricado, pero conservan formas simétricas; esto con el fin de realizar ensayos directos sobre la madera pre dimensionada que se utilizó en la construcción de cordófonos. Estas especies fueron: spruce (*Picea engelmannii*) como tapa de resonancia y aros para un charango, shihuahuaco (*Dipteryx odorata*) como fondo de resonancia aros para una mandolina, dialium (*Dialium guianense*) como fondo de resonancia y aros de un charango, palisangre (*Brosimum rubescens*) como fondo de resonancia y aros de una guitarra y de una mandolina, y palo azufre (*Symphonia globulifera*) como fondo de resonancia y aros de una guitarra (Figura 12).



A: Fondo guitarra de palisangre (*Brosimum rubescens*). **B:** Fondo guitarra de palo azufre (*Symphonia globulifera*). **C:** Fondo mandolina de shihuahuaco. (*Dipteryx odorata*) **D:** Fondo bandurria de palisangre (*Brosimum rubescens*). **E:** Fondo charango de dialium (*Dialium guianense*). **F:** Tapa charango de spruce (*Picea engelmannii*).

Figura 12: Placas de vibración tipo II.

b.3.2 Medición de Modos de Vibración

La visualización de los modos de vibración en las fotografías sigue un patrón de orientación, manteniendo los anillos de crecimiento paralelos al lado superior e inferior de la placa, la albura o zonas cercanas a ella corresponden al lado superior y el duramen o zonas cercanas a él corresponden el lado inferior según la imagen de la placa que se presenta en la Figura 13. Las muestras que están conformadas en su totalidad por sólo una zona de crecimiento (duramen ó albura) siguen la misma orientación manteniendo las zonas con anillos más anchos hacia el lado inferior y zonas con anillos más delgados hacia el lado superior de la placa.

El rango de frecuencias de evaluación fue el permitido por el equipo generador de frecuencias, logrando ubicar las reproducciones de los modos de vibración de las maderas principalmente en el rango audible por el ser humano (20 Hz – 2000 KHz).

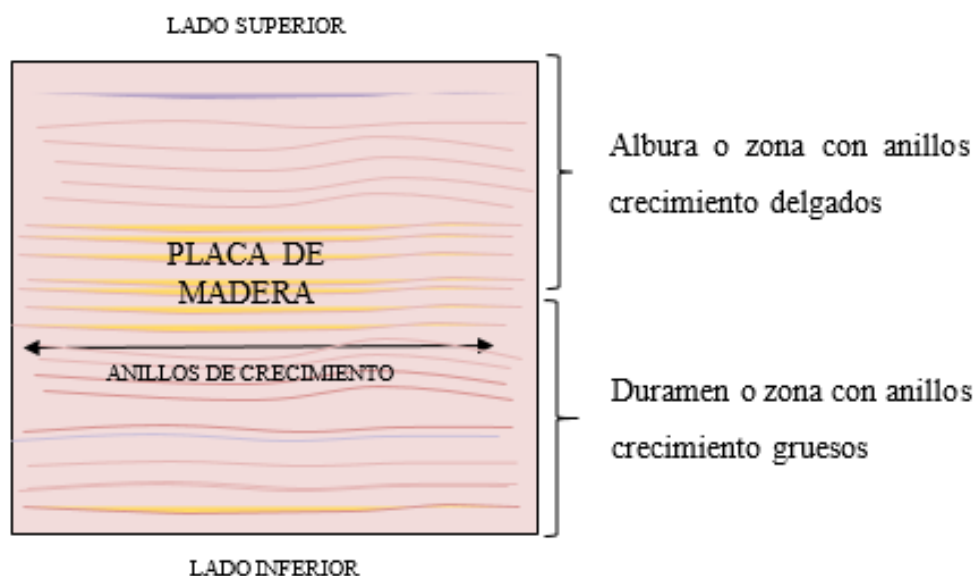


Figura 13: Patrón de lados y dirección de los anillos de crecimiento en una Placa de vibración.

Para el análisis de los modos de vibración la superficie de la madera se cubrió con partículas de bicarbonato de sodio, las que al ser sometidas a vibración demarcaron superficies que vibran o permanecen estáticas delineando figuras, así se formaron patrones con fines comparación.

Se utilizó el generador de frecuencias (Motech FG 500), que emite la señal para ser procesada por la mesa de mezclas (Behringer Xenyx 1202) y es aumentada mediante un amplificador potenciado (Phonic Max 860 PLUS) para ser recibida por el parlante (RCF L10-750YK) el cual hace vibrar a la probeta de madera generando los patrones de vibración.

La figura 14 ilustra la instrumentación utilizada para su determinación. El análisis se realizó observando la superficie de las muestras e identificando el modo de vibración formado teniendo en cuenta el tamaño de superficie, el espesor de la muestra y la forma de la placa de vibración.



Figura 14: A: Diagrama de instalación del equipo de medición para modos de vibración. B: Equipo instalado en funcionamiento.

b.4 Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.

De modo similar como un luthier percute la madera con los nudillos de los dedos para oír el timbre, se percutieron las muestras de prueba a fin de obtener su frecuencia fundamental, la cual fue procesada y graficada mediante un programa informático para visualizar la atenuación de la onda, calcular su decremento logarítmico y registrar su frecuencia fundamental.

b.4.1 Tamaño de Probetas

Se utilizaron las mismas probetas ensayadas para determinar la velocidad de sonido, fueron diez (10) probetas longitudinales de 0,3 cm x 1,5 cm x 30 cm. y diez (10) probetas radiales de 0,3 cm x 1,5 cm x 20 cm. (espesor x ancho x longitud). Las probetas fueron escuadradas, despuntadas y lijadas, eliminando toda imperfección (ver Anexo 3 y 4).

El fabricante del equipo de medición (Fakopp®) recomienda en relación al tamaño de las probetas y la superficie necesaria para obtener una onda plana, que es necesaria la proporción de veinte veces el ancho para la longitud, esto fue aplicado tanto en las probetas radiales como longitudinales.

b.4.2 Medición de Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.

La figura 15 A y B ilustra la disposición del equipo de medición y la probeta, cuya frecuencia fundamental y decaimiento logarítmico se visualiza en la ventana de aplicación del analizador de frecuencias Fakopp.

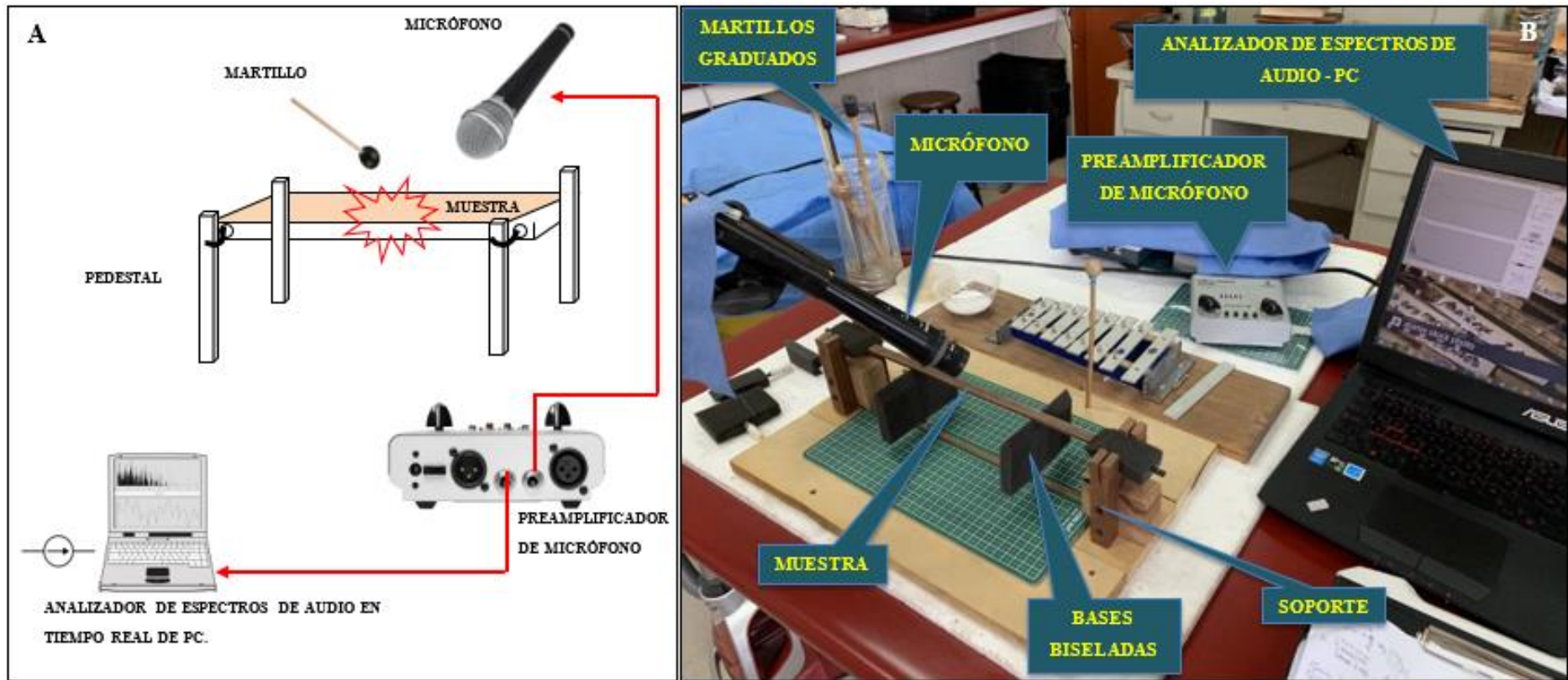


Figura 15: A: Diagrama de instalación del equipo para realizar mediciones de atenuación y frecuencia fundamental. B: Equipo instalado.

- Frecuencia Fundamental.

La probeta se sujeta a la altura de la marca de los nodos con los apoyos biselados según la condición del modo de vibración (1^{er}, 2^{do} o 3^{er} armónico) y se percute con el martillo graduado; La fuerza del golpe de percusión debe ser rápida para poder obtener la formación de la onda de la frecuencia fundamental sin interferencias en la pantalla mediante el analizador de frecuencias. El valor de la frecuencia fundamental debe coincidir en el cuadro de datos de la muestra de sonido y en el cuadro de datos del espectro de la muestra de sonido al indicar con el cursor en el pico principal de la curva (Figura 16). Se registraron para cada muestra diez (10) repeticiones de la medición para cada frecuencia fundamental y se promediaron.

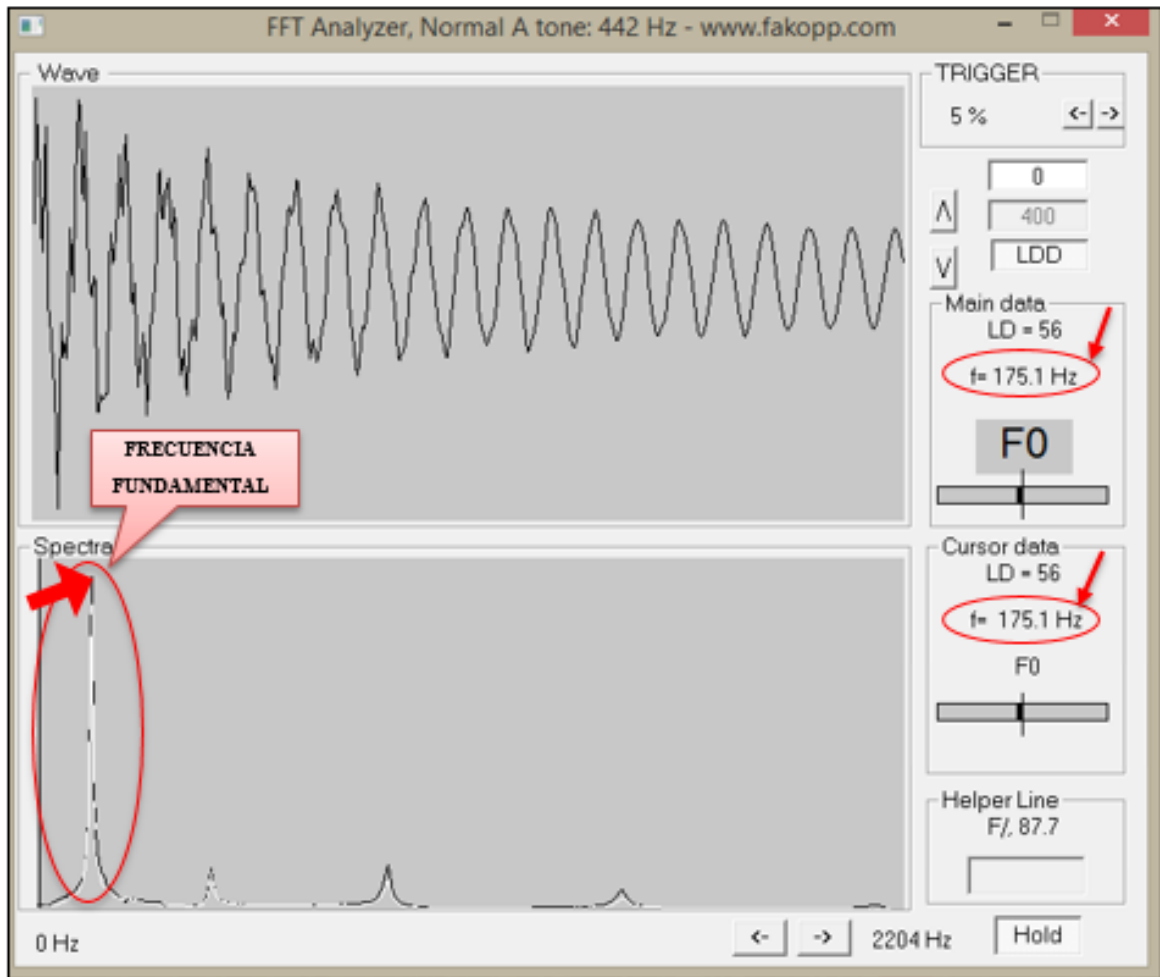


Figura 16: Ventana de aplicación del analizador de frecuencias Fakopp indicando el valor de la frecuencia fundamental y su ubicación.

- *Decaimiento Logarítmico.*

El analizador de frecuencias calculó el decaimiento logarítmico de vibración de la madera para cada armónico basado en dos análisis FFT (Analizador rápido de Fourier), la entrada de la segunda FFT se retrasa en el tiempo y aparece graficado como un espectro blanco (retardado), es decir la señal está disminuyendo la amplitud por tiempo y es siempre más bajo que el espectro negro (no retardado). El valor del decaimiento logarítmico debe coincidir en el cuadro de datos de la muestra de sonido y en el cuadro de datos del espectro de la muestra de sonido, indicando en el último el pico principal con el cursor (Figura 17). Al igual que para el caso de las frecuencias se registraron diez (10) repeticiones de valores de decaimiento logarítmico para cada frecuencia fundamental y se promediaron. Los valores del decremento logarítmico obtenidos mediante el analizador están multiplicados por 1000, por ello se dividieron los valores entre el mismo valor para presentar los resultados reales.

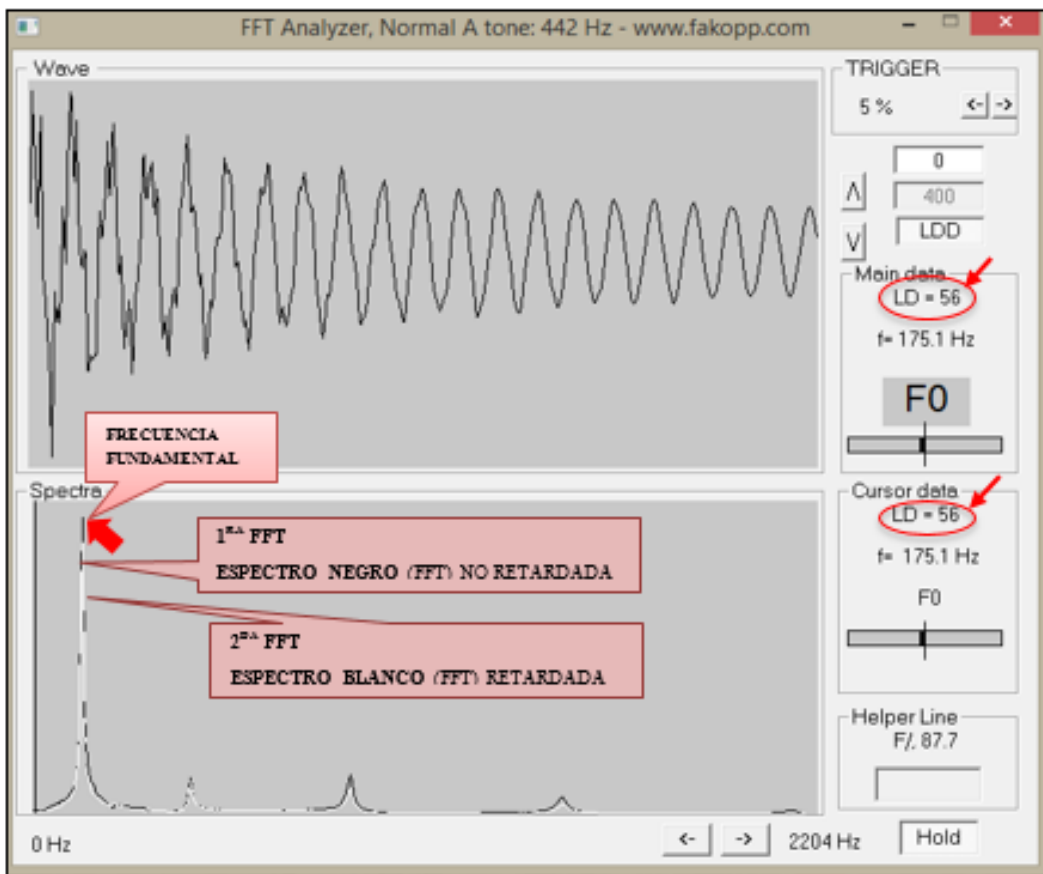


Figura 17: Ventana de aplicación del analizador de frecuencias Fakopp indicando los valores del decaimiento logarítmico y la ubicación de los espectros de frecuencia fundamental.

Para verificar la consistencia de los valores determinados se estimó los módulos de elasticidad dinámicos para los tres primeros armónicos mediante la ecuación de vibraciones radiales a fin de obtener que, entre los tres modos, el módulo de elasticidad de la muestra mantenga un comportamiento constante. A modo de ejemplo, en la tabla 6 se muestran los cálculos realizados por aplicación de la Fórmula (5) de Fakopp (2005) y la Figura 18.

$$E = \frac{2fn}{\gamma_n * \pi} * \frac{m * L^3}{I} \quad (5)$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad dinámico en vibración transversal (N/m² o Kgf/cm²)

f_n: Frecuencia de vibración promedio

n: Modo de vibración en condición extremos libres dependiendo de la condición de soporte. (n=1, 2, 3...).

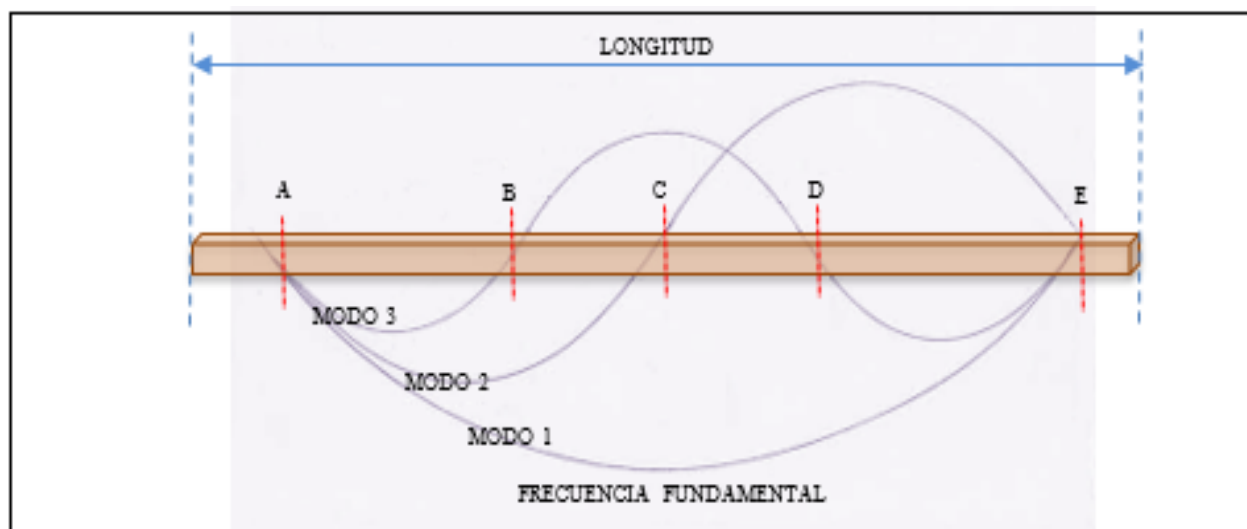
m: masa de la probeta (Kg)

L: longitud de la probeta (m).

I: momento de inercia, $I = ab^3/12$ donde “a” es el ancho y “b” el espesor.

γ_n : Constante de condición del modo de vibración, $\gamma_n = \left(\frac{P_n}{\pi}\right)^2$, $\gamma_n = (n + 0,5)^2$

*y la ecuación para el modo normal enésimo: $P_n = (n + 0,5) * \pi$, obteniendo las constantes: 2,25 para n=1, 2.25 para n=2 y 12,25 para n=3.*



MODO	DISTANCIA	A	B	C	D	E
1 ^{er} modo	n=1	0,224 L	-	-	-	0,776 L
2 ^{do} modo	n=2	0,132 L	-	0,5 L	-	0,868 L
3 ^{er} modo	n=3	0,094 L	0,356 L	-	0,644 L	0,906 L

Figura 18: Ubicación de nodos de vibración en condiciones de soporte libre y distancias entre nodos según la condición de soporte. Fakopp (2005).

Tabla 6. Ejemplo del cálculo del módulo de elasticidad no destructivo por el método de vibraciones transversales en la hoja de cálculo

Palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)										
Muestra 1	N° mediciones de frecuencia fundamental(Hz.)			promedio	Masa (m) (kg)	Longitud (l) (m)	Constante (γ)	Ancho (a) (m)	Espesor (b) (m)	Moe dinámico (Kg/cm ²)
	1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}							
1 ^{er} armónico	154,9	154,5	155	154,80	0,0085	0,3	2,25	0,01492	0,00305	128 072,17
2 ^{do} armónico	418,1	417,4	418	417,83	0,0085	0,3	6,25	0,01492	0,00305	120 927,21
3 ^{er} armónico	817,6	814,4	818	816,67	0,0085	0,3	12,25	0,01492	0,00305	120 252,85

b.5 Coeficiente de Absorción.

El coeficiente de absorción de sonido de una superficie es una magnitud adimensional y se refiere a la fracción de la potencia acústica incidente y absorbida o no reflejada; se obtiene en un proceso de incidencia normal, a una frecuencia específica, y nos permite predecir el efecto sobre el sonido al colocar la madera en un espacio cerrado.

b.5.1 Tamaño de Probetas.

Debido a la heterogeneidad de la madera se ensayaron tres (3) muestras por especie, las probetas serán discos de 4" de diámetro y serán extraídas de distintas tablillas patrón (Figura 19 A y B). La madera no es un material uniforme y aunque la tablilla patrón utilizada para obtener las muestras es producto de una selección muy exigente es muy probable que las muestras difieran en su conformación.

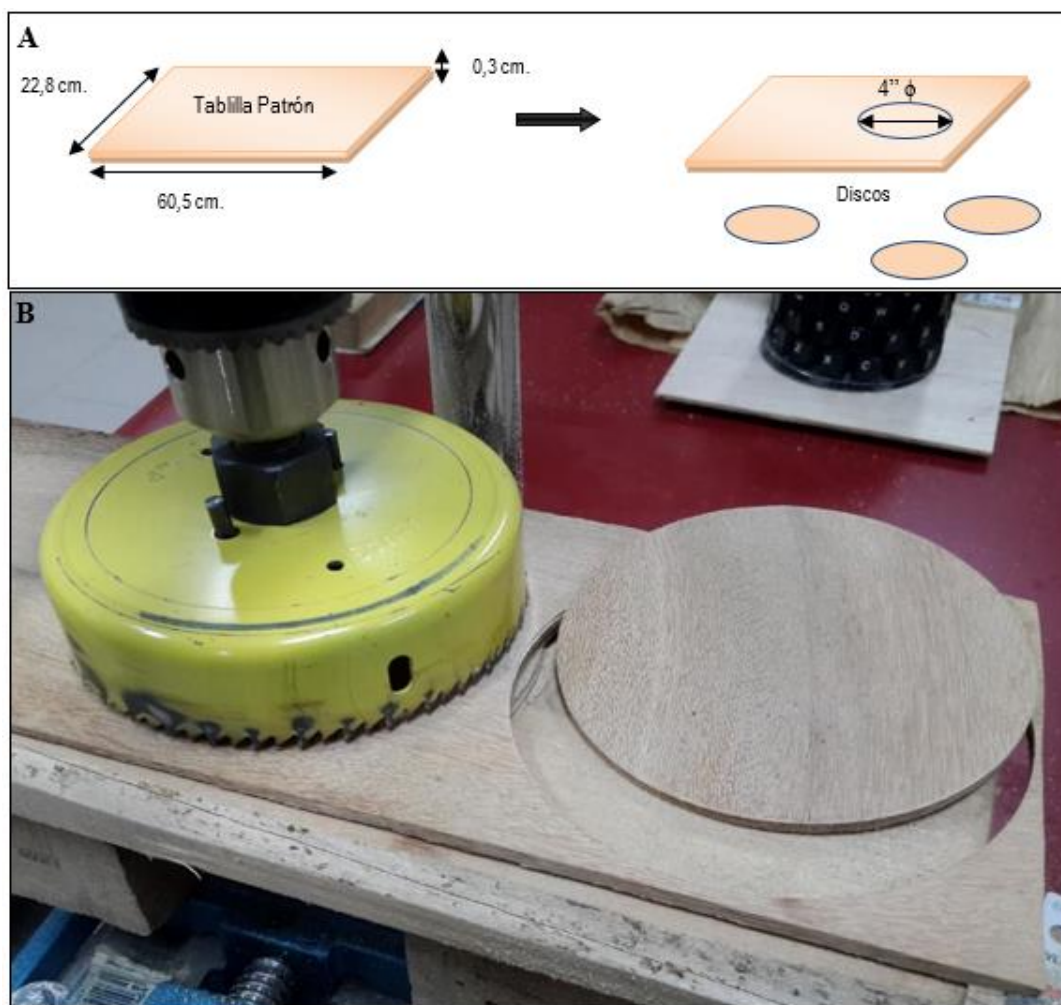


Figura 19: A: Diagrama de obtención de discos. B: corte de discos de madera.

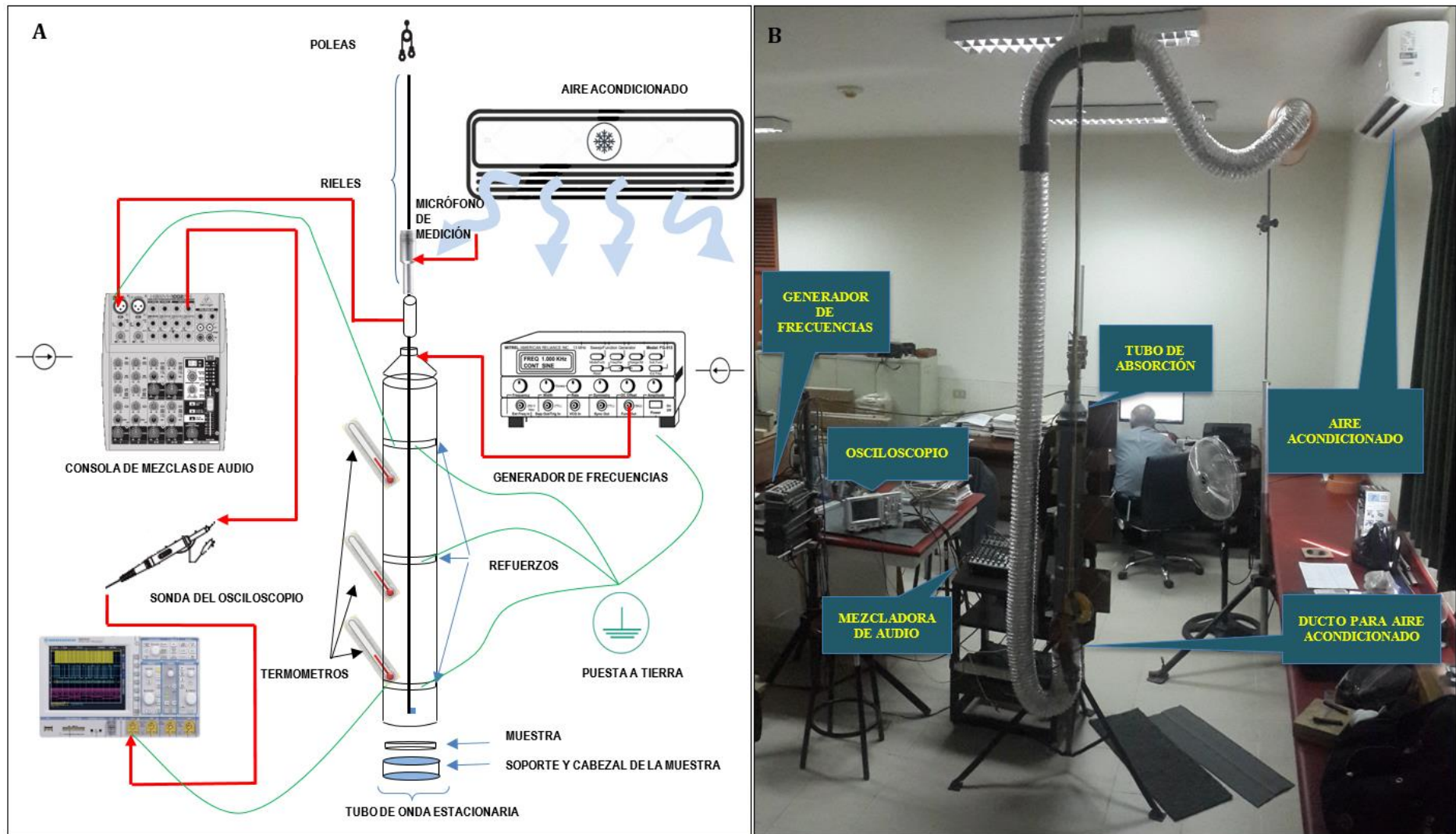


Figura 20: Aparato de onda estacionaria. A: Diagrama de instalación. B: Equipo de absorción instalado.

b.5.2 Procedimiento de Medición de Coeficiente de Absorción.

El experimento se realizó ajustándose a lo estipulado en la norma ASTM E384: Método de prueba estándar para la impedancia y absorción de materiales acústicos mediante el método de tubo de impedancia (2004), y consistió en emitir una onda acústica por un altavoz pequeño ubicado a un extremo de un tubo hasta obtener una frecuencia de resonancia y poder diferenciar puntos de presión de sonido máximos ($V_{\text{máx}}$) y mínimos (V_{min}), ésta onda es reflejada por la muestra de prueba que está ubicada al otro extremo del tubo, produciendo una onda estacionaria que pudo ser explorada con un micrófono y visualizada en un osciloscopio. Las mediciones se realizaron con tonos puros de una serie de frecuencias elegidas según norma de acuerdo al diámetro y longitud del tubo. El Coeficiente de absorción de sonido que es una función de frecuencia, se determinó a partir de la relación entre puntos de medición en la onda estacionaria y la superficie de la muestra de prueba (Figura 20).

- Descripción del Patrón de Onda Estacionaria

Presentamos un diagrama del Patrón de Onda Estacionaria (Figura 21), se puede observar la coincidencia entre la onda estacionaria y las concentraciones de partículas, nodos y antinodos, definiendo la ubicación de los mínimos en relación a la superficie de la muestra. Los voltajes registrados por la sonda del micrófono y sus distancias respectivas a la superficie de la muestra determinan el “Patrón de Onda Estacionaria”.

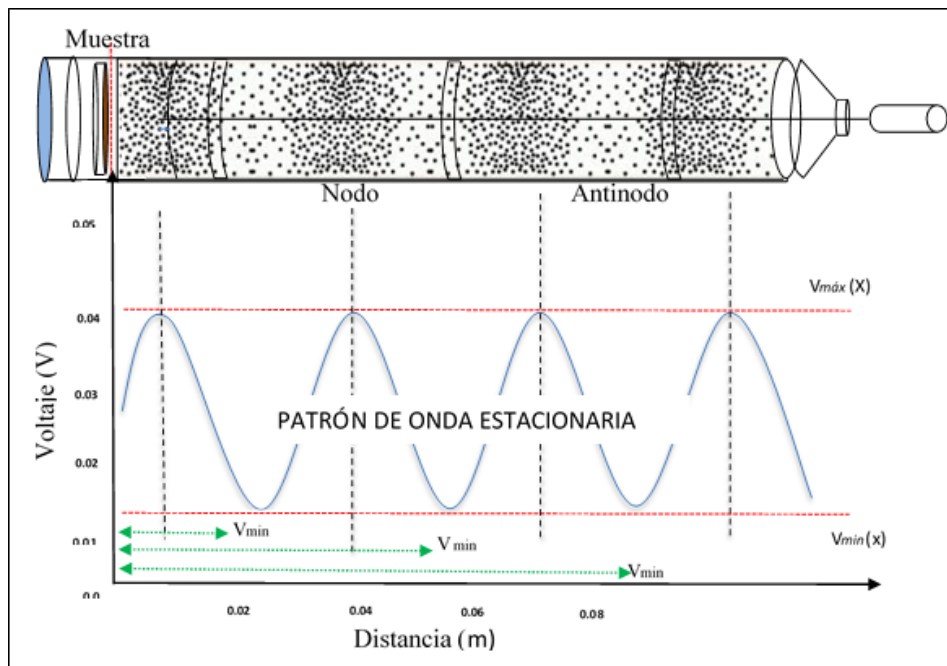


Figura 21: Diagrama del Patrón de Onda estacionaria.

- *Atenuación.*

Las ondas se propagan hacia ambos lados del tubo, es decir se forman ondas incidentes y reflejadas, y éstas se atenúan (Figura 22 A), es importante no confundir esto con el proceso de absorción. Si no existiera atenuación, los máximos individuales $V_{m\acute{a}x}(X)$ y los mínimos individuales $V_{min}(x)$ podrían representarse como líneas horizontales (Figura 22 B) y la Relación de onda estacionaria (SWR(x)) sería la misma a lo largo del tubo.

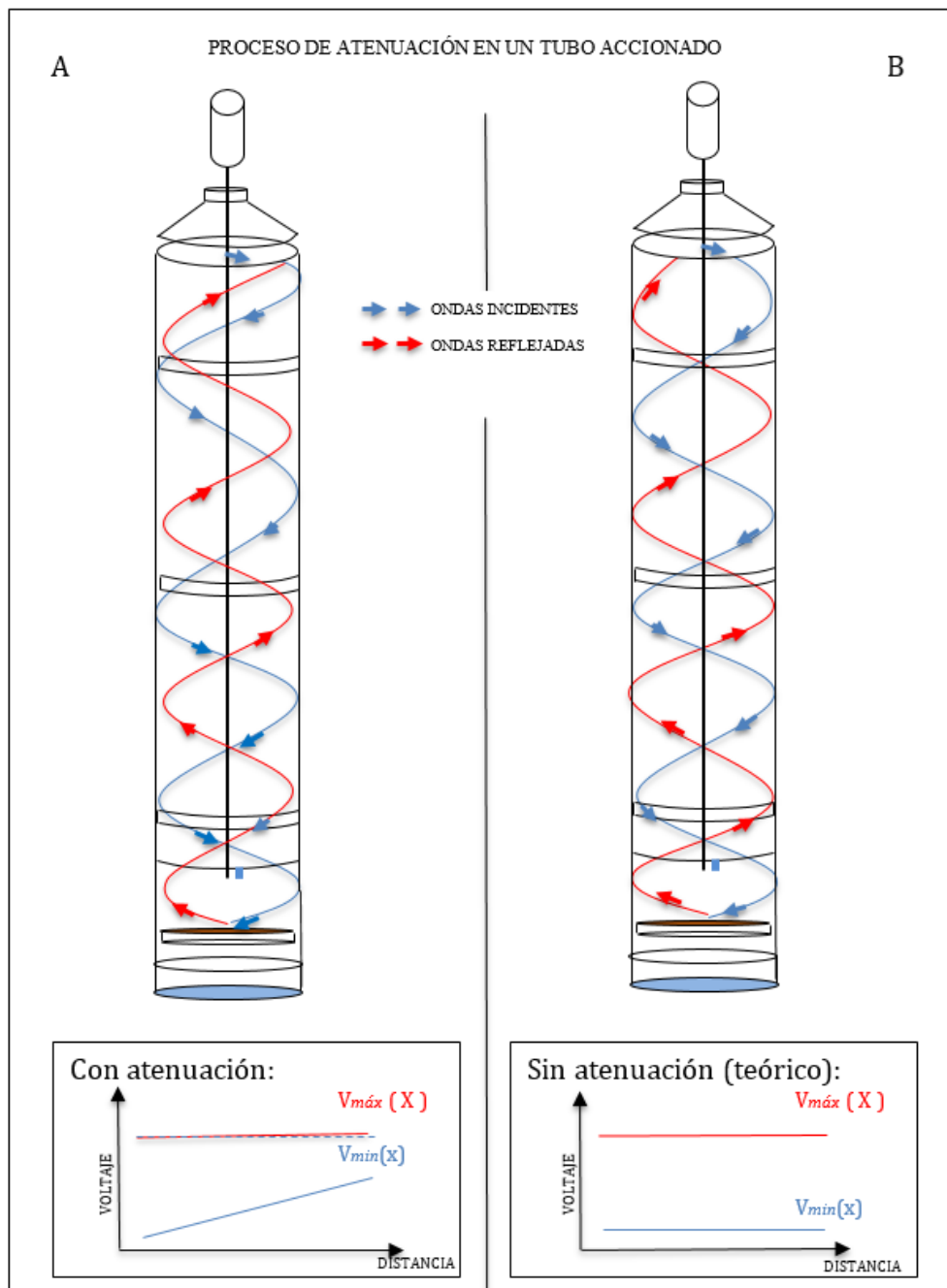


Figura 22: Diagrama de Patrón de Onda estacionaria A: Con atenuación y B: Sin atenuación.

b.5.3 Cálculos del Coeficiente de Absorción.

El propósito principal fue encontrar el coeficiente de absorción de sonido para cada muestra, para ello fue necesario encontrar los siguientes puntos:

- *Relación de la Onda Estacionaria en la Superficie de la Muestra Swr (0)*

Se obtuvo de la extrapolación lineal de los mínimos de voltaje a la superficie de la muestra, el método para realizar la extrapolación o la técnica de estimación fue según la norma técnica ASTM C: 384, para el caso de la existencia de dos (2) o más mínimos y uno (1) o más máximos presentes según la Fórmula (6).

$$SWR(0) = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} \quad (6)$$

Donde:

SWR: Relación de onda estacionaria en la superficie de la muestra, adimensional, positivo, real, igual o mayor que 1.

V máx: Voltaje máximo (V).

V mín: Voltaje mínimo (V).

- *Coeficiente de Reflexión de la Presión de Sonido*

Se obtuvo de la relación entre la presión reflejada y la presión incidente en la cara de la muestra según la norma técnica ASTM C: 384 siguiendo la Fórmula (7)

$$C R = \frac{\left(\frac{Mv}{V_{m\acute{a}x}} - 1\right)}{\left(\frac{Mv}{V_{m\acute{a}x}} + 1\right)} \quad (7)$$

Donde:

C R: Coeficiente de reflexión, adimensional, positivo, real, igual o mayor que 1.

M v: Mínimo verdadero (V).

V máx: Voltaje máximo (V)

- *Coefficiente de Absorción de Sonido.*

Se obtuvo como contraparte de la reflexión de la onda producida por incidencia normal a la muestra siguiendo la Fórmula (8).

$$\text{Coeficiente de absorción} = 1 - \text{Coeficiente de reflexión}^2 \quad (8)$$

3.3.3 Estadística

En las determinaciones cuantitativas se calcularon sus promedios, desviación estándar y coeficiente de variación. Asimismo, para la calibración del temporizador ultrasónico y el cálculo de la relación de la onda estacionaria en la superficie de la muestra se realizó mediante análisis de regresión lineal.

3.3.4 Prueba De Sonido

Luego de las evaluaciones por los luthiers y los ensayos técnicos, fue necesaria la evaluación del comportamiento de la madera puesta en uso, para lo cual se fabricaron cinco cordófonos de tipo estándar o de estudio, utilizando las maderas tradicionales y las de propuesta alternativa. En esta fase la madera pasa por su último proceso de selección por parte de los luthiers. La prueba de sonido la realizó un músico profesional.

a. Diseño y Asignación de Maderas en los Cordófonos Construidos.

El tipo de los cordófonos que se construyeron son de cuerda pulsada y rasgada, para el diseño de los instrumentos musicales se consideró que los cordófonos están contruidos de dos partes fundamentales que se fabrican en madera: la caja de resonancia y el mástil, y que además incorporan aditivos y accesorios en materiales diferentes a la madera como plásticos acrílicos, metales y nácar. El objetivo fue construir cordófonos de prueba con cada madera seleccionada para el fondo y los aros, manteniendo el resto de la configuración de los instrumentos iguales. La asignación de maderas para la fabricación de los instrumentos musicales establecida inicialmente se modificó en uno de los instrumentos (Guitarra 1), esto debido al arraigo de las técnicas utilizadas por los luthiers en cuanto a las especies que habitualmente trabajan y sus acabados característicos. La configuración final de los instrumentos musicales contruidos se presenta en el Tabla 7.

Tabla 7. Conformación de especies de maderas y accesorios de los cordófonos construidos

PARTES DEL CORDÓFONO		CORDÓFONO FABRICADO	CORDÓFONO I GUITARRA*	CORDÓFONO II GUITARRA**	CORDÓFONO III CHARANGO***	CORDÓFONO IV BANDURRIA**	CORDÓFONO V MANDOLINA**
CAJA DE RESONANCIA	PARTES EXTERIORES	Tapa armónica	spruce	spruce	spruce	spruce	spruce
		Aros	acero caspi	palisangre	dialium	palisangre	shihuahuaco
		Boca	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar
		Roseta	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar
		Ribete	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Cejilla inferior	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar
		Puente	moradillo	ébano	ébano	ébano	ébano
	Fondo	acero caspi	palisangre	dialium	palisangre	shihuahuaco	
	PARTES INTERIORES	Crucetas,	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Refuerzos	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Tirantes laterales	---	---	---	---	---
		Tira de revestimiento,	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Bloques de enlace	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Taco superior e inferior	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
Cordal		---	---	---	estándar	estándar	
MÁSTIL	Pala	Clavijero	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro
		Clavijas	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar
	Mángo	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro	
	Diapasón	moradillo	ébano	ébano	ébano	ébano	
	Apoyo de diapazón	---	---	---	---	---	
	Trastes	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar	
	Tacón o quilla	caoba	cedro	cedro	cedro	cedro	
	Cejilla superior	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar	
	Alma	---	---	--	--	--	
Cuerdas	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar		
ACCESORIOS	Botón de sujección	---	---	---	---	---	
	Marcas de trastes	---	---	---	---	---	
ADITIVOS	Cola	estándar	estándar	estándar	estándar	estándar	
	Acabado	mate	barniz	barniz	barniz	barniz	

Nota: *Luthier Antonio Huamaní, **Luthier Abraham Falcón, ***Luthier Marcos Falcón.

b. Fabricación de Cordófonos.

Para la construcción de cordófonos se utilizaron las maderas tradicionales como el Palisangre (*Brosimum rubescens*) en el fondo y aros de una guitarra y una bandurria con fines comparativos para la prueba de sonido; con las maderas alternativas seleccionadas como de primera categoría se construyeron una mandolina de Shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), una guitarra de acero caspi (*Symphonia globulifera*), incluyéndose además un charango de Dialium (*Dialium guianense*), todas como fondo y aros de resonancia, de acuerdo al diseño de los instrumentos.

La participación en la investigación por parte de los fabricantes de instrumentos musicales fue de acuerdo a su predisposición, sólo algunos de los constructores trabajaron en la construcción de los instrumentos con maderas alternativas, todas las maderas evaluadas fueron repartidas a los luthiers para que seleccionen por afinidad a la Trabajabilidad de la madera y puedan elegir con cuál de ellas construir el instrumento musical. así se logró el compromiso para la construcción de los instrumentos musicales para la prueba de sonido. Se realizó el seguimiento durante el proceso de construcción para poder realizar las pruebas acústicas de los fondos pre ensamblados en el laboratorio antes de su instalación final en el cordófono.

c. Evaluación de los Cordófonos.

El objetivo de la prueba de sonido es garantizar que los resultados cuantitativos obtenidos en el laboratorio sean aprobados como parte de la evaluación cualitativa del músico profesional o experto al ejecutar el cordófono de prueba, y expresar los resultados mediante los términos más comunes utilizados en el lenguaje musical para calificar el sonido de un instrumento musical según los criterios mencionados en la tabla 8. Sólo se pudo concretar la prueba de sonido de las guitarras.

Tabla 8: Criterios de evaluación de los instrumentos musicales contruidos

CARACTERÍSTICA DEL SONIDO DEL INSTRUMENTO MUSICAL	
LENGUAJE MUSICAL	LENGUAJE TÉCNICO
Intensidad Proyección	Referido al Volumen del instrumento
Color Equilibrio Sonoridad pareja	Equilibrio en las 6 cuerdas. Agudos, medios y graves estén en la misma proporción, balanceados.
Deterioro Caída (decay):	Caída de la nota Es el tiempo que le lleva a la onda para pasar del punto máximo de amplitud hasta un estado de energía estacionario.
Sensibilidad Ataque (attack): Pegada	Respuesta rápida. Es el tiempo que le lleva a la onda para alcanzar el punto máximo de su amplitud
Sostenimiento (sustain) Resonancia	Es el tiempo en que la amplitud de la onda sonora permanece estacionaria. Prolongación del sonido. Cuanto sostiene la nota.
Peso Brillo	Masa del instrumento. Agudos
Timbre	Es la nota fundamental más los armónicos Marca las cualidades sonoras de la madera Es definida por la caja de resonancia Es el carácter de la madera
Liberación (release):	Es el tiempo que le lleva a la onda para pasar del final de su período estacionario hasta el punto de su extinción.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Selección de Especies

Las evaluaciones preliminares permitieron diferenciar entre especies no aptas y potencialmente aptas para la luthería. Las primeras se mencionan en la tabla 9 y las potencialmente aptas se agrupan en cinco categorías: 5^{ta} (Tabla 10), 4^{ta} (Tabla 11), 3^{ra} (Tabla 12), 2^{da} (Tabla 13) y 1^{ra} categoría (Tabla 14). Además, se incluyeron las maderas de uso tradicional y exótico.

Tabla 9: Especies no aptas para luthería

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
icoja	<i>Unonopsis floribunda</i>	Annonaceae
copal	<i>Dacryodes nitens</i>	Burseraceae
apacharama	<i>Licania lata</i>	Chrysobalanaceae
huimba	<i>Ceiba samauma</i>	Bombacaceae
utucuro	<i>Septotheca tessmanii ulbrich</i>	Bombacaceae
misho chaqui	<i>Helicostylis tomentosa</i>	Moraceae
caimitillo	<i>Chrysophyllum preuril</i>	*
añuje caspi, añuje moena	<i>Anaueria brasiliensis</i>	Lauraceae
requia	<i>Guarea kuntiana</i>	Meliaceae
capirona de altura	<i>Capirona decorticans</i>	Rubiaceae
shiringana, gutapercha	<i>Sapium marmierii</i>	Euphorbiaceae
huamanzamana	<i>Jacaranda copaia</i>	Bignoniaceae
tornillo colorado	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	Fabaceae
sacha cetico	<i>Schefflera morototoni</i>	Araliaceae
rifari	<i>Miconia poeppigii</i>	Melastomataceae
cumala caupuri	<i>Virola pavonis</i>	Myristicaceae
renaco	<i>Ficus americana</i>	Moraceae
chimicua	<i>Perebea guianensis</i>	Moraceae

Nota: (*) Sin identificación científica.

Tabla 10: Especies potenciales para luthería: 5^a categoría

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
leche huayo, leche caspi	<i>Couma macrocarpa</i>	Apocynaceae
hualaja	<i>Zanthoxylum ekmanii</i>	Rutaceae
huacapu	<i>Minquartia guianensis</i>	Olacaceae
zapotillo machin zapote	<i>Matisia bracteolosa</i>	Bombacaceae
caballo micuna	<i>Guarea glabra</i>	Meliaceae
lagarto caspi	<i>Calophyllum brasiliense</i>	Clusiaceae
chontaquiuro	<i>Diptotropis purpurea</i>	Fabaceae
peine de mono	<i>Maquisapa ñaccha</i>	*
cachimbo caspi	<i>Couratari guianensis</i>	Lecythidaceae
maria buena	<i>Pterocarpus santalinoides</i>	Fabaceae
shiringa	<i>Heva brasiliensis</i>	Euphorbiaceae
quinilla blanca	<i>Pouteria glomerata</i>	Sapotaceae
pashaco	<i>Enterolobium barnebianum</i>	Fabaceae
carahuasca	<i>Guatteria pteropus</i>	Annonaceae
shimbillo	<i>Inga sp.</i>	Fabaceae
cumala aguanillo	<i>Otoba parvifolia</i>	Myristicaceae
aceite caspi	<i>Caraipa densiflora</i>	Verbenaceae
chuchuhuasi	<i>Maytenus amazonica</i>	Celastraceae
macambillo	<i>Theobroma sp.</i>	Sterculiaceae
manchinga	<i>Brosimum potable</i>	Moraceae
quillosa	<i>Vochysia lomatophylla</i>	Vochysiaceae
mari mari	<i>Hymenaea coubaril</i>	Fabaceae

Nota: (*) Sin identificación científica.

Tabla 11: Especies potenciales para luthería: 4^a categoría

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
purma caspi	<i>Casearea arborea</i>	Flacourtiaceae
cumaceba	<i>Swartzia polyphylla</i>	Fabaceae
achiote caspi	<i>Sloanea sp.</i>	Elaeocarpaceae
almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Caryocaraceae
sacha casho	<i>Anacardium giganteum</i>	Anacardiaceae
cedro masha	<i>Cabrlea canjerana</i>	Meliaceae
uchumullaca	<i>Trichilia maynasiana</i>	Meliaceae
marupa	<i>Simarouba amara</i>	Simaroubaceae
cepanchina	<i>Sloanea durissima</i>	Elaeocarpaceae
quillosa de altura	<i>Vochysia bracedinae</i>	Vochysiaceae
cumala llorona	<i>Osteophloeum platyspermum</i>	Myristicaceae

Tabla 5: Especies potenciales para luthería: 3^{ra} categoría

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
charichuelo	<i>Garcinia macrophylla</i>	Clusiaceae
guacamayo caspi	<i>Simiria cordifolia</i>	Rubiaceae
guariuba	<i>Clarisia racemosa</i>	Moraceae
tahuari	<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
insira	<i>Maclura tinctoria</i>	Moraceae
palisangre	<i>Brosimum rubescens</i>	Moraceae
sacha castaña, olla de mono	<i>Lecythis pisinis Cambess</i>	Lecythidaceae
machimango hoja grande	<i>Eschweilera gigantea</i>	Lecythidaceae
remo caspi	<i>Aspidosperma rigidum</i>	Apocynaceae
canela moena	<i>Ocotea javitensis</i>	Lauraceae
umari	<i>Poraqueiba sericea</i>	Icacinaceae
quillosa, tornillo blanco	<i>Qualea paraensis</i>	Vochysiaceae
quinilla colorada	<i>Manilkara bidentata</i>	Sapotaceae

Tabla 6: Especies potenciales para luthería: 2^{da} categoría

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
guisador caspi	<i>Tapura juruana</i>	Dichapetalaceae
cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae
anis moena	<i>Ocotea fragrantissima</i>	Lauraceae

Tabla 14: Especies potenciales para luthería: 1^{ra} categoría

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
acero caspi	<i>Symphonia globulifera</i>	Clusiaceae
charapilla, shihuahuaco	<i>Dipteryx odorata</i>	Fabaceae

4.2 De los Ensayos Experimentales

4.2.1 Contenido de Humedad y Densidad

En la Tabla 15 se presenta el contenido de humedad determinado por el método gravimétrico y con detector de humedad, y la densidad anhidra en las 13 especies estudiadas. El detalle de los datos se presenta en el Anexo 5 y 6. Respecto a la densidad se aprecia que los valores experimentales determinados son cercanos a rangos referenciales.

Tabla 7. Contenido de humedad gravimétrico y por detector de humedad y densidad anhidra

Especies	Contenido de humedad (%)		Densidad anhidra (g/cm ³)	Rangos Referenciales para densidad anhidra
	Gravimétrico	Detector eléctrico		
arce (<i>Acer saccharum</i>)		9,1	0,54	-
caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)		10,8	0,58	-
cedro (<i>Cedrela odorata</i>)		11,2	0,44	-
diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	12,4		0,63	-
dialium (<i>Dialium guianense</i>)	11,3		0,98	D. anhidra 0.90 g/cm ³ (Bravo, P. 2017)- D. anhidra: 0,90±0,07 g/cm ³ . (Bravo C, 2017).
estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	10,8		0,86	-
nogal (<i>Juglans sp.</i>)		8,2	0,55	D anhidra 0.63g/cm ³ (Barreto, G. <i>et all.</i> 1990).
palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	7,5		0,53	-
palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	9,9		1,01	-
palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	10,2		0,69	D. anhidra. 0.60 g/cm ³ . (MAE, FAO 2014).
Shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	11,4		0,92	-
spruce (<i>Picea engelmannii</i> ,) $\frac{1^{\text{ra}} \text{ calidad}}{4^{\text{ta}} \text{ calidad}}$	11,1		$\frac{0,47}{0,36}$	-
Ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)		9,4	0,41	D. Anhidra Base:0.38 g/cm ³ , Medio:0.39 g/cm ³ , Apical:0.38 g/cm ³ (García, H. <i>et all</i> 2017). D anhidra 0.64 g/cm ³ (Cueva MN, <i>et all</i> 2013).

4.2.2 Velocidad de Sonido y Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación y Resistencia de la Onda Acústica

a. Velocidad de Sonido.

El tiempo del recorrido de la pulsación se corrigió a través de la interpolación de su recorrido en 26.139 us que es el tiempo transcurrido en recorrer la longitud del cable transductor. La figura 23 muestra la ecuación de regresión de dicha corrección

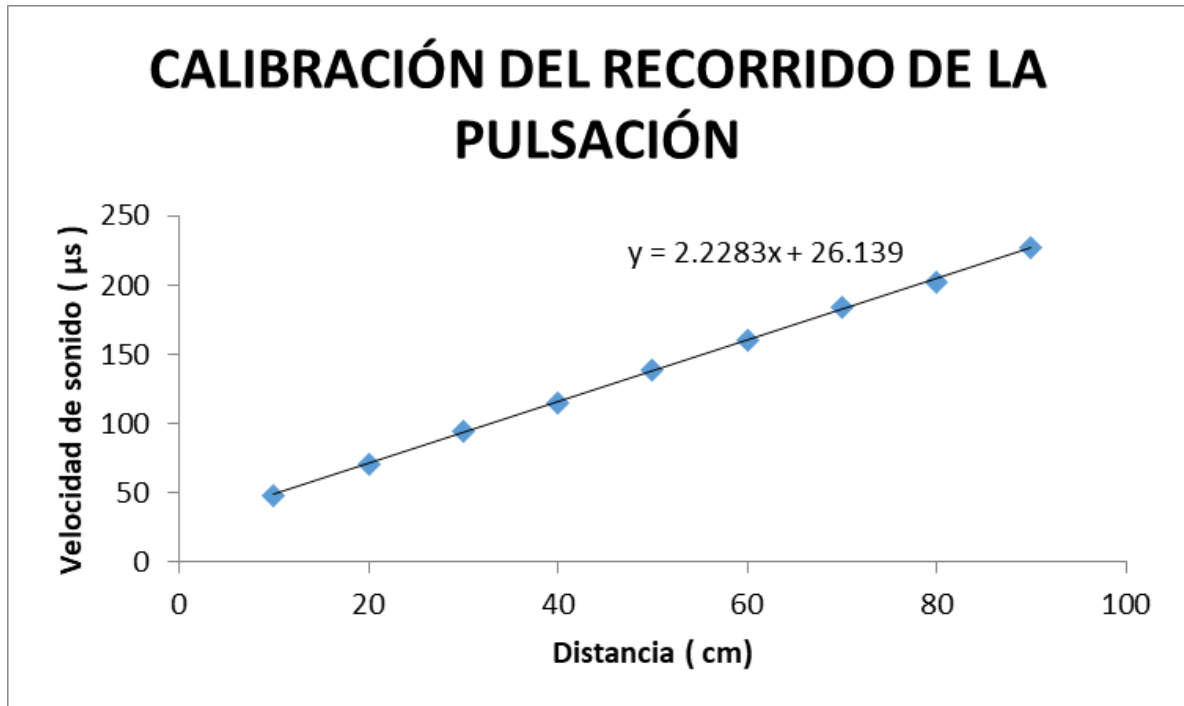


Figura 23: Interpolación del recorrido de la pulsación con sondas tipo espigas de 19 KHz.

La Tabla 16 presenta las velocidades promedio de la propagación del sonido en sentido longitudinal y radiales. Los coeficientes de variación se presentan en el Anexo 3.

Al respecto, el valor hallado en sentido longitudinal es mayor a las referencias bibliográficas para el Spruce (*Picea spruceanum*) cuyos valores fluctúan entre 4790 m/s (Kollman 1968) y 5600 m/s (Bucur, 2018); igualmente son mayores los valores obtenidos respecto al cedro: 3770 m/s y caoba: 4422 m/s (Van Der Slooten, 1993), y el palisandro: 4600 m/s (Bucur 2018).

Tabla 16: Velocidad de propagación de sonido en muestras longitudinales y radiales

ESPECIE	Velocidad de propagación de sonido (m/s)	
	Longitudinal	Radial
arce (<i>Acer saccharum</i>)	*	*
caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	5326	1315
cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	5106	*
diablo Fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	5173	1194
dialium (<i>Dialium guianense.</i>)	alburá	*
	duramen	*
estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	4563	1951.3
nogal (<i>Juglans sp.</i>)	*	*
palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	5013	2018
palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	5100	1892
palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	5245	*
shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	4824	2166
spruce (<i>Picea spruceanum</i>)	1 ^{ra} calidad	1694
	4 ^{ta} calidad	1251
ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	4978	1116

Nota: Coeficiente de variación estimado para ambas secciones es 5% incluyendo el error de medición de las probetas.

(*) Probeta dañada.

b. Amortiguación de la Radiación y Resistencia de la Onda acústica.

b.1 Muestras Longitudinales.

Los valores promedios obtenidos se presentan en la Tabla 17 y la Figura 24 ilustra la relación entre el amortiguamiento de la radiación y la resistencia de la onda acústica. En el Anexo 4 se presenta el coeficiente de variación.

Tabla 17: Valores promedios de la amortiguación de la radiación y resistencia de la onda acústica en muestras longitudinales (unidades relativas)

ESPECIE	RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA (D*V)	AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN (V/D)
caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	3237	9562
cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	2429	11229
diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	2785	8288
dialium (<i>Dialium guianense</i>)	Albura	5268
	Duramen	5704
estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	3796	5487
palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	3360	7814
palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	4577	5252
palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	3389	8122
shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	4650	5460
spruce (<i>Picea spruceanum</i>).	2260	15677
ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	2102	11172

Nota: Coeficiente de variación estimado para la resistencia de la onda acústica y la amortiguación de la radiación en muestras longitudinales es del orden del 5% incluyendo el error de medición de las probetas.

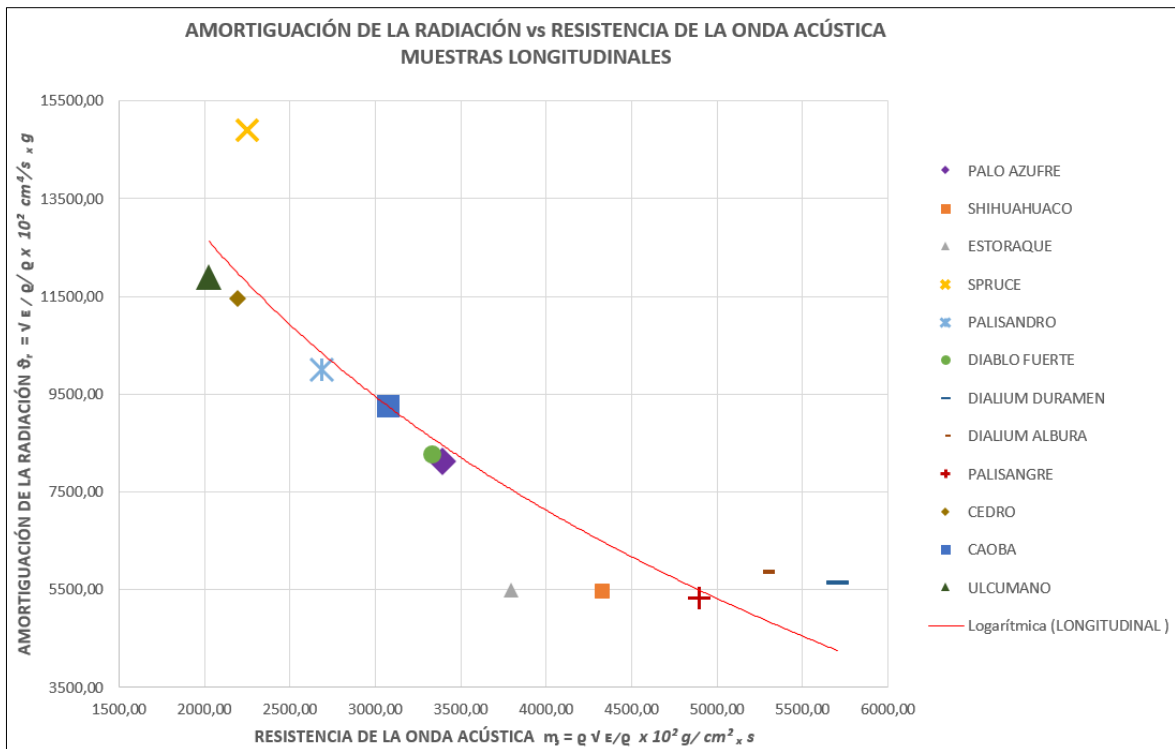


Figura 24: Relación entre la amortiguación de la radiación y la resistencia de la onda acústica en muestras longitudinales.

Donde:

ϑ_r : Amortiguación de la radiación.

E : Velocidad de sonido.

ρ : Densidad.

cm : Centímetros.

s : segundos.

g : gramos.

m_3 : Resistencia de la onda acústica

La relación amortiguación – resistencia, en sección longitudinal permite diferenciar dos grupos en las maderas de prueba dentro de una sola tendencia, un grupo de los mayores valores de amortiguación de la radiación que se ubican hacia la parte superior e izquierda y que a su vez encierran a las maderas de densidades medias, y el grupo de mayores valores de resistencia a la onda acústica que se ubican hacia la parte inferior derecha y son las maderas de altas densidades.

Así las especies de mayor densidad que se agrupan hacia altos valores de resistencia acústica y valores de amortiguación de la radiación bajos muy cercanos entre sí son importantes para

la reflexión del sonido. En el estudio se identificó este comportamiento en estoraque (*Myroxylon balsamum*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), palisangre (*Brosimum rubescens*) y dialium (*Dialium guianense*) en albura y duramen. Mientras que en especies de densidades medias que presentan altos valores de amortiguación de la radiación y valores bajos de resistencia acústica, dichas características son importantes en la emisión de energía y por consiguiente la propagación del sonido. En el estudio se identificó este comportamiento en spruce (*Picea spruceanum*), ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), cedro (*Cedrela odorata*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), caoba (*Swietenia macrophylla*), diablo Fuerte (*Prumnopitys harmisiana*) y palo azufre (*Symphonia globulifera*).

Estos resultados coinciden con las conclusiones de KOLLMAN (1968) respecto a las cajas de resonancia utilizadas en la construcción de pianos y violines que presentan altos valores de amortiguación debido a la radiación. El mismo autor agrega que la resistencia de la onda de sonido es decisiva para la propagación del sonido y especialmente para el reflejo del sonido en el límite entre dos medios (tapa y fondo). En las pruebas se puede observar éste comportamiento en las maderas de densidad media y baja, y además se observa que las maderas utilizadas tradicionalmente como fondos de resonancia presentan altos valores de resistencia de la onda acústica y disminuyen la amortiguación de la radiación, las maderas evaluadas de mayor densidad siguen esta tendencia.

b.2 Muestras Radiales

Los valores promedios obtenidos se presentan en la Tabla 18 y la Figura 25 ilustra la relación entre el amortiguamiento de la radiación y la resistencia de la onda acústica. En el Anexo 4 se presenta el coeficiente de variación.

Tabla 18: Valores promedios de la amortiguación de la radiación y la resistencia de la onda acústica en muestras radiales (unidades relativas)

ESPECIE	RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA (D*V)	AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN (V/D)
caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	757	2358
diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	665	2141
estoraque (<i>Miroxylon balsamum</i>)	1620	2292
palisandro (<i>Dalbergia latifolia.</i>)	1303	3142
palisangre (<i>Brosimun rubescens.</i>)	1917	1995
shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	1915	2400
spruce (<i>Picea spruceanum</i>).	1 ^{ra} calidad	4701
	4 ^{ta} calidad	3648
ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	464	2658

Nota: Coeficiente de variación estimado para la Resistencia de la onda acústica y la Amortiguación de la radiación en muestras radiales es del orden del 5% incluyendo el error de medición de las probetas.

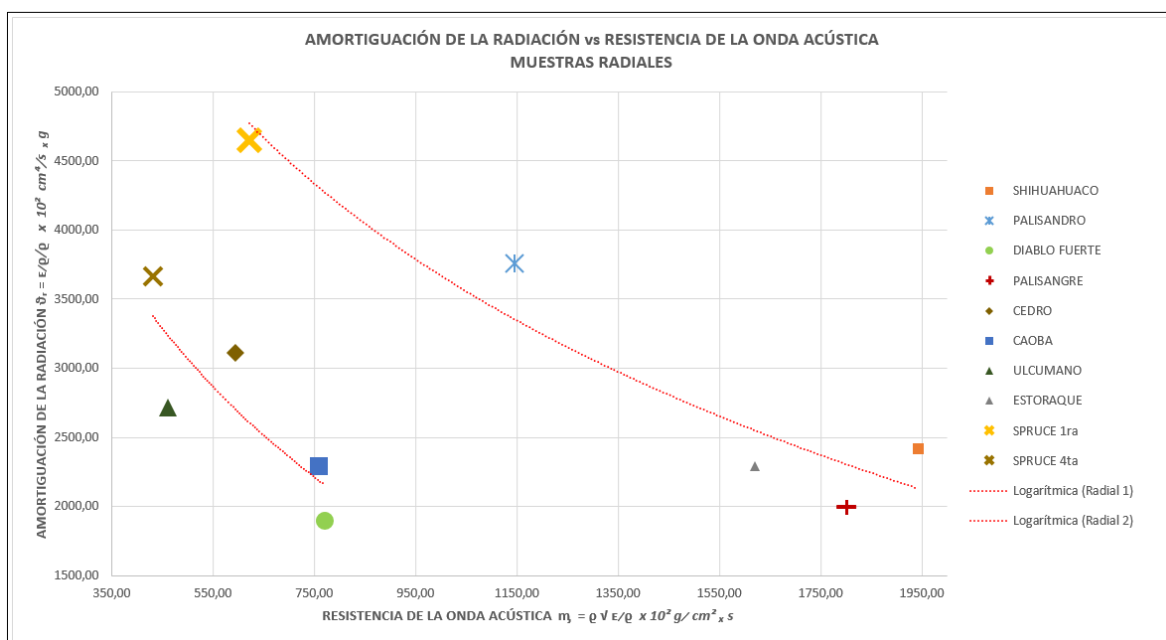


Figura 25: Relación entre la amortiguación de la radiación y la resistencia de la onda acústica en muestras radiales.

Donde:

ρ : Amortiguación de la radiación.

E : Velocidad de sonido.

ρ : Densidad.

cm : Centímetros.

s : segundos.

g : gramos.

m_r : Resistencia de la onda acústica.

Se diferencian dos grupos de maderas que grafican curvas con comportamiento logarítmico, la relación: amortiguación de la vibración y resistencia a la onda acústica (relación amortiguación – resistencia) en secciones radiales permite diferenciar en las maderas ensayadas dos grupos con tendencias similares. El primer grupo presenta mayores valores en cuanto a la relación amortiguación – resistencia: el spruce de primera calidad (*Picea spruceanum*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), palisangre (*Brosimum rubescens*) y shihuahuaco (*Dipterix odorata*). El segundo grupo está conformado por especies que presentan menores valores en cuanto a la relación amortiguación – resistencia: el spruce de cuarta calidad (*Picea spruceanum*), ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii.*), caoba (*Swietenia macrophylla*) y diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*).

En el caso de la madera de spruce se observó diferentes tamaños de anillos de crecimiento y al analizar ss resultados se comprobó que la diferencia entre primera y cuarta calidad están en relación con el ancho de los anillos de crecimiento; que si bien es cierto tienen un comportamiento similar en el sentido longitudinal de las fibras no ocurre lo mismo en sentido transversal.

Se nota que la madera de spruce (*Picea spruceanum*), de primera calidad y de cuarta calidad. presenta la mayor relación entre amortiguación y resistencia en comparación con las demás especies en ambas curvas; la de primera calidad encabeza la curva de mayores valores de relación amortiguación – resistencia, y la de cuarta calidad la curva de los menores valores de dicha relación.

El grupo de especies con los mayores valores de relación amortiguación – resistencia, que se ubican hacia la derecha, demarcando la curva de tendencia mas larga, presentan un ordenamiento de las maderas con alta radiación de sonido y de alta reflexión de sonido; y el grupo de especies con los menores valores de relación amortiguación - resistencia, que demarcan la curva de tendencia mas corta, se ubican hacia la izquierda, y presentan un

ordenamiento de las maderas con radiación y reflexión de sonido menores en comparación al grupo de la derecha, esto no los descarta como tableros de resonancia.

Estas relaciones permiten visualizar la calidad acústica a través de la composición de la madera mediante el efecto del tamaño de los anillos de crecimiento, posiblemente la diferenciación entre zonas de duramen y albura que definen la calidad de la madera. Esto se puede visualizar en la ubicación de las muestras radiales de spruce (*Picea spruceanum*) de primera calidad y cuarta calidad en las curvas de relación amortiguación – resistencia.

Roohnia (2011) demuestra en sus investigaciones que las partes externas del tallo, cerca de la corteza, exhibían menor amortiguación debido a la fricción interna, en ocasiones una mayor radiación sonora y una mayor eficiencia de conversión acústica, haciendo mención que estos resultados verifican razonablemente que una pieza de madera con anillos de crecimiento de menos de 2 mm de ancho (Tsoumis 1991, Bucur 2006) son apropiadas para la fabricación de tableros de resonancia.

En un cordófono de madera, las velocidades de sonido no guardan relación con la densidad, esto debido a que están compuestos de diferentes especies, las gráficas muestran que la influencia de la densidad está relacionada con la parte inercial (masa) de las maderas.

4.2.3 Modos de Vibración

Los patrones modales para las probetas tipo I A se presentan en la Figura 26, y las del grupo B en la Figura 27. Del mismo modo, para las probetas tipo II se presentan en la Figura 28. Estas figuras muestran un sondeo de los modos de vibración de mayor protagonismo, y muchas de las fotografías tomadas han captado una fracción, una transición o alguna repetición en una frecuencia armónica en la formación de los modos de vibración.

Asimismo, las Figuras 29, 30 y 31 ilustran los rangos de frecuencias en que se forman por resonancia los modos de vibración para las especies estudiadas; dichos rangos son para graficar la máxima y la mínima frecuencia entre las cuales se detectaron los modos de vibración y no representan un rango continuo de éstos. La tabla 19 indica el número de modos de vibración para los rangos que son propios para cada especie.

Se puede apreciar que la formación de modos de vibración idénticos entre dos muestras se logra a diferentes rangos de frecuencia según el tamaño y forma de la superficie y la especie de madera. Los rangos de frecuencia en que las muestras forman los modos de vibración se pueden observar en la superficie de la placa durante la duración de la emisión de la frecuencia generada. Por tratarse de un método no destructivo, se pueden comparar la capacidad de reproducción de modos entre dos maderas de la misma forma y dimensiones, de la misma especie o diferentes, también se puede comparar los fondos y tapas de resonancia de instrumentos musicales diferentes o idénticos antes de su ensamblaje.

Al comparar placas grandes, pequeñas y con forma predeterminada de cordófono, vemos que en el barrido de las frecuencias de prueba en el orden de evaluación no corresponde necesariamente al orden consecutivo de la formación de modos de vibración, Tampoco corresponde a una determinada frecuencia la formación de algún determinado modo de vibración.

La cantidad de modos de vibración formados por especie depende de la forma, la superficie y el espesor de la placa, para el caso estudiado, manteniendo el espesor constante, los resultados indican que a mayor superficie de la placa se forman modos en bajas frecuencias y disminuyen los modos en altas frecuencias, mientras que a menor superficie de la placa se forman modos en altas frecuencias y disminuyen los modos en bajas frecuencias.

Estos resultados se sustentan con la investigación de Elejabarrieta, (1997), quien menciona al físico Felix Savart (1791-1841) como uno de los primeros científicos que ensayo con tapas y fondos de violines sueltos con la colaboración de un luthier utilizando la técnica de Chladni para saber qué sonidos debían de producir la tapa y el fondo de un violín, antes de su ensamblaje para obtener un instrumento óptimo, obteniendo una distribución de líneas nodales a unas frecuencias de resonancias definidas y concluyendo que estos modos normales de vibración son patrones de ondas estacionarias y dependen de la rigidez, de la masa, de la geometría y de la distribución de espesores del elemento en estudio.

Al respecto, como parte de la determinación de las propiedades elásticas de la madera, se realizó la prueba de vibración en tableros de madera pre dimensionados para la fabricación de cordófonos, obteniendo las frecuencias de resonancia y patrones modales en el rango de 20 a 2000 Hz., esta caracterización permite establecer exigencias de calidad e identificar que sonidos producen los tableros de resonancia (tonewoods). antes de su ensamblaje en el cordófono.

simbolo Especie	A	B	C	D	E	F	G
ARCE (<i>Acer saccharum</i>)	 96,5 Hx. (87,89 - 105,3) Hx.	 211,5 Hx.	 258,26 Hx. (230,6 - 278) Hx.	 313,05 Hx. (301 - 325,1) Hx.		 472,7 Hx. (452,3 - 493,1) Hx.	
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	 71,78 Hx. (47,83-86,77) Hx.	 183,03 Hx. (139 - 222,9) Hx.	 246,9 Hx.	 324,525 Hx. (260,1 - 457,7) Hx.			
CEDRO (<i>Cedrela odorata.</i>)	 289,2 Hx. (222,4 - 322,6) Hx.					 511,6 Hx. (502,2 - 521) Hx.	
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana.</i>)	 71,87 Hx. (59,22 - 92,74) Hx.		 243,4 Hx. (226,4 - 277,7) Hx.		 349,3 Hx. (318,3 - 377,9) Hx.	 421,04 Hx. (402,9 - 442,5) Hx.	
NOGAL (<i>Juglans sp.</i>)	 119,6 Hx. (101,2 - 138) Hx.	 328,56 Hx. (270,7 - 363,6) Hx.		 491,75 Hx. (491,3- 492,2) Hx.	 600,3 Hx.		
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	 115,5 Hx. (92,8 - 127,7) Hx.	 254,6 Hx. (230 - 260) Hx.	 309,3 Hx. (300,6 - 318) Hx.				
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	 127,95 Hx. (109,9 - 145,6) Hx.	 208,9 Hx.	 276,1 Hx. (274 -277,9) Hx.			 386,6 Hx.	 459,9 Hx. (423,3 - 496,2) Hx.
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	 72,58 Hx.	 192,3 Hx. (156,3 - 248,2) Hx.	 289,825 Hx. (258,7-317,4) Hx.	 353,5 Hx.	 388,9 Hx.		
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii.</i>)	 54,5 Hx. (17,4 - 158) Hx.		 206,5 Hx. (196,1-222,5) Hx.		 235,6 Hx. (228,4 242,2) Hx.		

«continua hacia la derecha ...»

«continuación...»

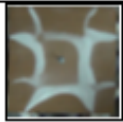



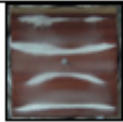







Especie / símbolo	H	I	J	K	L	M	N
ARCE (<i>Acer saccharu.</i>)							
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)							
CEDRO (<i>Cedrela odorata.</i>)							
DIABLO FUERTE (<i>Prunopsis kermiziana</i>)							
	487,4 Hz. (465 - 511,6) Hz.						
NOGAL (<i>Juglans sp.</i>)							
	677,35 Hz. (669,8 - 684,9) Hz.						
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)							
		1,5675 KHz. (1,57-1,569) KHz.				1,9965 KHz. (1,99 - 2,01) KHz.	
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)							
	588 Hz.						2,306 KHz.
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)							
	413,03 Hz. (406,1-425,5) Hz.	466,1 Hz.		550,0 Hz.	743,95 KHz. (724,6-763,3) Hz.		
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliozii</i>)							
		320,7 Hz. (292,4 - 343,7) Hz.	499,7 Hz.				

Figura 26: Modos de vibración en placas cuadradas Tipo I de 20 x 20 cm (Grupo A).



























simbolo Especie	a	b	c	d	e	f	g	h
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	 396,3 Hz. (279,6 - 598,8) Hz.		 1,0743 KHz. (1,038-1,116)KHz.				 1,1808 KHz. (1,118-1,204)KHz.	 2,319 KHz. (1,911-2,727)KHz.
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	 380,7 Hz. (338,6 - 427,8) Hz.	 511,8 Hz.	 748,06 Hz. (668,8 - 824,1) Hz.	 959 Hz. (938,9 - 959,1) Hz.	 1,0957 KHz. (1,06 - 1,11) KHz.			
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	 234,6 Hz. (190,8 - 277,8) Hz.		 786,2 Hz.	 871,1 Hz.	 1,099 KHz.			
PALO AZUFRE (<i>Symplocos glabulifera</i>)	 220,9 Hz. (188,4 - 274) Hz.	 460,15 Hz. (374,7 - 510,2) Hz.	 579,2 Hz. (548,9 - 610,8) Hz.	 759,5 Hz.	 909,4 Hz.			
SHIWUANUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	 270,1 Hz. (230 - 322) Hz.	 494,65 Hz. (429,1 - 560,2) Hz.	 635,15 Hz. (574,8 - 696,5) Hz.					
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	 182,3 Hz. (138,9 - 248,5) Hz.	 357,3 Hz. (264,2 - 425,5) Hz.	 521 Hz. (468,5 - 580,1) Hz.	 564,3 Hz. (589,2 - 642,6) Hz.	 746,1 Hz. (717,1 - 775,1) Hz.			

Figura 27: Modos de vibración en placas cuadradas Tipo I de 12 x 12 cm. – (Grupo B)

























	α	β	γ	δ	ϵ	σ	ζ	η	θ
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>) Fondo charango	 115.06 Hz. (110 - 118.2) Hz.	 176.9 Hz. (173.6 - 182.6) Hz.							
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>) Tapa de charango con roseta		 133.18 Hz. (116.7 - 145.9) Hz.	 189.2 Hz. (166.2 - 227.8) Hz.						
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>) Tapa de charango sin roseta	 152.9 Hz. (134.5 - 167.3) Hz.	 199.98 Hz. (168.1 - 231.4) Hz.							
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>) Fondo de guitarra		 51.9 Hz. (21.7 - 69.49) Hz.	 73.55 Hz. (52.86 - 87.12) Hz.		 155.9 Hz. (150 - 159) Hz.			 222.96 Hz. (163 - 252.6) Hz.	 289.9 Hz.
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>) Fondo de Bandurria	 17.39 Hz.	 40.97 Hz. (13.99 - 70.45) Hz.		 110.3 Hz.	 208.78 Hz. (204.8 - 275.4) Hz.				
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>) Fondo de guitarra	 56.5 Hz. (45.97 - 70.05) Hz.	 56.2 Hz. (51.63 - 60.73) Hz.						 168.35 Hz. (167.4 - 169.3) Hz.	
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>) Fondo de mandolina	 64.56 Hz. (37.6 - 147) Hz.	 69.2 Hz. (44.36 - 174.2) Hz.		 102.81 Hz. (75.71 - 129.9) Hz.	 232.85 Hz. (228.3 - 237.4) Hz.	 158.85 Hz. (148.9 - 168.8) Hz.	 162 Hz. (160.1 - 163.8) Hz.		

Figura 28: Modos de vibración en placas tipo II (Tapay fondos de resonancia de instrumentos musicales)

PLACAS TIPO I (20 x 20 cm)			
	RANGO: 2 - 20 Hz.	RANGO: 20 - 200 Hz.	RANGO: 200- 2 KHz.
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)		72,58 Hz.	763,3 Hz.
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	17,54 Hz.		665,4 Hz.
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)		47,83 Hz.	457,7 Hz.
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)		92,8 Hz.	2,005 KHz.
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)		109,9 Hz.	2,306 KHz.
NOGAL (<i>Juglans neotrópica</i>)		101,2 Hz.	684,9 Hz.
ARCE (<i>Acer saccharum</i>)		87,89 Hz.	493,1 Hz.
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)		222,4 Hz.	521 Hz.
DIABLO FUERTE (<i>Prunmopitys harmisiana</i>)		53,22 Hz.	511,6 Hz.

Figura 29: Rangos de frecuencias modales en placas tipo I - Grupo "A" (placas cuadradas de 20 x 20 cm.).

PLACAS TIPO I (12 x 12 cm)			
	RANGO: 2 - 20 Hz.	RANGO: 20 - 200 Hz.	RANGO: 200- 2KHz.
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)		138,9 Hz.	775,1 Hz.
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)		190,3 Hz.	1,1 KHz.
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)			333,6 Hz.
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)		279,6 Hz.	1,112 KHz.
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)		230 Hz.	695,5 Hz.
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)		188,4 Hz.	909,4 Hz.

Figura 30: Rangos de frecuencias modales en placas tipo I - Grupo "B" (placas cuadradas de 12 x 12 cm.).

PLACAS TIPO II (TAPA O FONDO DE INSTRUMENTOS)			
	RANGO: 2 - 20 Hz.	RANGO: 20 - 200 Hz.	RANGO: 200- 2KHz.
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>) Tapa charango sin roseta		134,5 Hz.	231,4 Hz.
SPRUCE(<i>Picea engelmannii</i>) Tapa charango con roseta		116,7 Hz.	227,8 Hz.
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>) Fondo de mandolina.	37,60 Hz.		237,4 Hz.
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>) Fondo charango		110,0 Hz.	182,6 Hz.
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>) Fondo de guitarra	21,70 Hz.		289,9 Hz.
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>) Fondo de bandurria	13,99 Hz.		275,4 Hz.
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>) Fondo de guitarra		45,97 Hz.	169,3 Hz.

Figura 31: Rangos de frecuencias modales en placas Tipo II (Tapa y fondos de resonancia de instrumentos musicales).

Tabla 19: Modos de vibración según la forma de la placa y rangos de frecuencias

PLACAS		ESPECIES	CANTIDAD DE MODOS DE VIBRACIÓN	RANGO DE FRECUENCIAS	FORMA DE PLACA
TIPO	GRUPO				
TIPO I	A	spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	9	73 – 763 Hz.	Cuadrada (20 x 20 cm)
		palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	7	110 Hz - 2 KHz.	
		palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	5	93Hz– 2 KHz.	
		nogal (<i>Juglans sp.</i>)	5	101 – 685 Hz.	
		arce (<i>Acer saccharum</i>)	5	88 – 493 Hz.	
		ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	4	55 - 242 Hz.	
		caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	4	48 – 458 Hz.	
	cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	2	222 – 521 Hz.		
	B	diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	6	53 – 512 Hz.	Cuadrada (12 x 12 cm)
		spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	5	139 – 775 Hz.	
		estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	5	334 Hz – 1,1 KHz.	
		palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	5	188 – 512 Hz.	
		palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	4	190 Hz - 1 KHz.	
		dialium (<i>Dialium guianense</i>)	4	280 Hz – 2,7 KHz.	
shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)		3	230 – 696 Hz.		
TIPO II (FONDOS Y TAPAS DE INSTRUMENTOS)	shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	6	38 – 164 Hz.	Fondo de mandolina	
	palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	5	22 - 290 Hz.	Fondo de guitarra	
	palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	4	17 – 275 Hz.	Fondo de bandurria	
	palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	3	46 – 169 Hz.	Fondo de guitarra	
	spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	2	117 - 228 Hz.	Tapa charango con roseta	
	spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	2	135 – 231 Hz.	Tapa charango sin roseta	
	dialium (<i>Dialium guianense</i>)	2	110 – 183 Hz.	Fondo charango	

4.2.4 Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico

a. Frecuencia Fundamental.

Las frecuencias experimentales promedio para la Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales se presentan en la tabla 20. Los coeficientes de variación se presentan en el Anexo 5.

Tabla 20: Frecuencias de resonancia experimentales promedio en muestras longitudinales y radiales para la Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico.

ESPECIE	FRECUENCIAS DE RESONANCIA LONGITUDINAL (Hz.)			FRECUENCIAS DE RESONANCIA RADIAL (Hz.)			*REFERENCIA (Lg)
	(Frecuencia Fundamental) 1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico.	3 ^{er} armónico.	(Frecuencia Fundamental) 1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico	
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	150	405	742	97	260	502	Frec. resonancia: 166 Hz. Frec. resonancia (1 ^{er} arm.):446 Hz. Frec. resonancia (2 ^{do} arm.):871 Hz..
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	138	380	728	-	-	-	Frec. resonancia: 142 Hz. Frec. resonancia (1 ^{er} arm.):406 Hz. Frec. resonancia (2 ^{do} arm.):784 Hz..
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	131	356	681	87	232	452	-
DIALIUM (<i>Dialium guianense.</i>)	165	449	865	-	-	-	-
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	147	407	772	144.3	384.2	746.3	-
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	172	461	873	168	443	845	-
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	177	481	938	157	419	808	-
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	162	445	858	-	-	-	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	172	467	894	158	428	848	-
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>).	189	514	998	143	350	659	European spruce Frec. resonancia: 187 Hz. Frec. resonancia (1 ^{er} arm.): 514 Hz. Frec. resonancia (2 ^{do} arm.):1014 Hz..
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	158	433	841	208	400	655	-

Nota: * Van Der Slooten (1993). El coeficiente de variación estimado para la Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales es 10% incluyendo el error de medición de las probetas.

b. Clasificación de Rangos de Frecuencias para Maderas en la Fabricación de Cordófonos.

Las frecuencias de resonancia obtenidas agrupan las especies en rangos diferenciados para los tres primeros armónicos. así se propone una *clasificación de rangos de frecuencias para maderas en la fabricación de cordófonos*. En esta investigación se hará referencia como frecuencias bajas al rango obtenido con los valores de frecuencias del 1^{er} armónico, frecuencias medias al rango del 2^{do} armónico y frecuencias altas al rango del 3^{er} armónico. La tabla 21 presenta los valores en Hz. para las frecuencias baja, media, media – alta y alta.

Tabla 21: Clasificación de frecuencias en tablillas de resonancia

FRECUENCIA DE RESONANCIA	RANGO (Hz.)	FRECUENCIAS
1 ^{er} armónico	87,1 – 208,1	bajas
2 ^{do} armónico	231,4 – 449,4	medias
2 ^{do} y 3 ^{er} armónicos	451,9 – 513,9	medias - altas
3 ^{er} armónico	654,5 – 998,4	altas

c. Modulo de Elasticidad Dinámico.

El módulo de elasticidad dinámico por el método de las vibraciones transversales tanto longitudinales como radiales se presentan en las tablas 22 y 23. Se observa que dichos valores hallados son similares en cada especie para los tres armónicos evaluados, lo que demuestra la consistencia en la medición de la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónicos.

Nótese que en el caso de los módulos de elasticidad longitudinales del palisandro los valores hallados por Haines (1979) son superiores, mientras que los determinados para la caoba son inferiores a los hallados por Sotomayor (2017-2018)

En la tabla 22 se incluye además con fines comparativos valores de módulos de elasticidad estático referenciales. El coeficiente de variación del Módulo de Elasticidad Dinámico de la Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónicos en muestras longitudinales y radiales son del orden del 10% incluyendo el error de medición de las probetas (Anexo 6).

Tabla 22: Módulos de elasticidad longitudinales experimentales para la Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico). 2^{do} y 3^{er} armónico

ESPECIE	MOE DINÁMICO			REFERENCIAL Longitudinal, Kg/cm ² Frecuencia Fundamental	MOE ESTÁTICO REFERENCIAL Longitudinal
	EXPERIMENTAL PROMEDIO Longitudinal 12% CH, Kg/cm ²				
	Frecuencia Fundamental (1 ^{er} armónico)	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico		
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	147 554	145 615	142 099	93 161.3 Kg/cm ² . (9136 NMm-2). Sotomayor, J. 2018. 105 438.7 Kg/cm ² (10340 NMm-2). Sotomayor, J. 2017.	105 460 Kg/cm ² 12% CH. (Wood handbook 2010). 110 027 379 Kg/cm ² (Atlas of Macroscopic Wood Identification 2011).
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	108 485	106 560	101 523		101 242 Kg/cm ² 12% CH. (Wood handbook 2010).
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	176 969	168 927	161 125	-	-
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	287 649	275 304	265 550	-	175 000- Kg/cm ² (Bravo, P. 2017). condición verde 40% CH:159 339,50 kg/cm ² , condición seca 12% CH: 210 391 kg/cm ² . (García, R. <i>et all.</i> 1998).
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	166 096	167 781	157 943	-	175 000 Kg/cm ² (Morales A, 2013).
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	152 520	141 278	134 390	173 352 Voichita bucur extraido de Haines. D. 1979	125 425,09 Kg/cm ² 12% CH. (Wood handbook 2010). 117 267,364 Kg/cm ² ≈11500 N/mm ² .(Atlas of Macroscopic Wood Identification 2011). 168 253,2 Kg/cm ² , 12% CH. (Wood handbook 2010).
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	254 295	246 586	245 049	-	286 846,171 Kg/cm ² ≈ 28130 N/mm ² . (Atlas of Macroscopic Wood Identification 2011). 137 661.69 Kg/cm ² verde,173 351.76 Kg/cm ² 12% CH, 137801.6 Kg/cm ² verde, 172 955,1 Kg/cm ² 12% CH. (Wood handbook 2010).
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	158 822	155 737	151 151	-	153 000 Kg/cm ² (Huiza, A 2020).
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	195 758	190 467	182 350	-	108 975,8 Kg/cm ² 12% CH. (Wood handbook 2010).
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	110 271	105 710	104 497	-	72 399,9 Kg/cm ² verde, 91,366.57 Kg/cm ² seca (Aldem, H. 1997). MOE ×1000 kg/cm ² : 75.37. (Portillo, R. <i>et all</i> 2019).
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	73 510	72 546	71 768	-	96 000 kg/cm ² , MOE verde 73 t/cm ² , MOE 12% CH: 96 t/cm ² . (Cueva MN, <i>et all</i> 2013).

Nota: El coeficiente de variación del módulo de elasticidad dinámico en sección longitudinal es 10% incluyendo el error de medición de las probetas.

Tabla 23: Módulos de elasticidad radiales experimentales y referenciales para la Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico

ESPECIE	MOE DINÁMICO			MOE DINÁMICO REFERENCIAL Radial
	EXPERIMENTAL PROMEDIO			
	Radial 12% CH, Kg/cm ²			
	1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico	
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	9 084	8 390	8 153	-
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	7 734	7 067	7 001	-
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	30 115	28 891	28 365	-
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	26 794	24 254	22 944	20 394,3 Kg/cm ² (Bucur extraído de Haines. D. 1979).
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	36 516	33 767	32 671	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	39 453	37 147	37 276	-
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>).	11 396	9 868	9 610	-
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	38 297	18 330	12 778	-

Nota: El coeficiente de variación del módulo de elasticidad dinámico en sección radial es 10% incluyendo el error de medición de las probetas.

d. Decaimiento Logarítmico.

Respecto al decaimiento logarítmico las tablas 24 y 25 muestran los resultados experimentales en sentido longitudinal y transversal respectivamente, dichos valores manifiestan el grado de energía transformada en calor que convierte la madera durante su deformación al ser percutida y hasta volver a su forma y estado normal, los valores del decaimiento logarítmico por lo general son bajos, por esto se presenta entre paréntesis los datos reales multiplicados por 1000 proporcionados por el analizador FFT de fakopp necesarios para el análisis. Asimismo, el coeficiente de variación del decaimiento logarítmico del 1er, 2do y 3er armónicos para las secciones longitudinales y radiales son del orden del $\pm 30\%$ incluyendo el error de medición de las probetas (Anexos 7).

Tabla 24: Decaimiento logarítmico en muestras longitudinales para la Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico

DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EXPERIMENTAL PROMEDIO				DECAIMIENTO LOGARÍTMICO REFERENCIAL
ESPECIE	Frecuencia Fundamental (1 ^{er} armónico)	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico	
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	(55,4) 0,06	(59,4) 0,06	(59,1) 0,06	0,019 (Van Der Slooten 1993). 0,096 (Suárez, B.).
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	(75,6) 0,08	(57,8) 0,06	(42,3) 0,04	0,025 (Van Der Slooten 1993) 0,075 (Suárez, B.).
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	115,4 (0,12)	111,5 (0,11)	52,3 (0,05)	
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	(20,6) 0,02	(33,9) 0,03	(30,2) 0,03	
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	(61,7) 0,06	(65,2) 0,07	(38,4) 0,04	
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	(58,1) 0,06	(103,0) 0,10	(60,6) 0,06	0,026 <i>Dalbergia</i> spp. (Bucur 2006 cita a Richardson 1986).
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	(19,7) 0,02	(46,6) 0,05	(23,6) 0,03	
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	(34,7) 0,04	(52,0) 0,05	(41,5) 0,04	
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	(46,0) 0,05	(69,5) 0,07	(33,2) 0,03	
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	(49,6) 0,05	(47,4) 0,05	(31,8) 0,03	0,021 (Van Der Slooten 1993). 0,022, 0,021 en baja frecuencia, 0,084, 0,075 en alta frecuencia, (Bucur 2006 cita a Haines 1979).
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	(48,7) 0,04	(66,0) 0,07	(41,0) 0,04	

Nota: Entre paréntesis los datos reales multiplicados por 1000.

Tabla 25: Decaimiento logarítmico en muestras radiales para la Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico

*DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EXPERIMENTAL PROMEDIO				DECAIMIENTO LOGARÍTMICO REFERENCIAL
ESPECIE	Frecuencia Fundamental (1 ^{er} armónico)	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico	
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	(95,0) 0,10	(96,0) 0,10	(97,7) 0,10	
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	(105,6) 0,11	(96,0) 0,10	(57,7) 0,06	
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	(63,7) 0,06	(52,4) 0,05	(54,7) 0,05	
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	(135,0) 0,14	(88,5) 0,09	(42,1) 0,04	
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	(72,8) 0,07	(67,4) 0,07	(48,6) 0,05	
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	(55,92) 0,06	(59,2) 0,06	(54,0) 0,05	
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	(41,07) 0,04	(68,8) 0,07	(56,3) 0,06	0,069, 0,058 en baja frecuencia, 0,098, 0,077 en alta frecuencia. (Bucur 2006 cita a Haines 1979).
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	242,8 (0,24)	234,7 (0,23)	98,9 (0,10)	

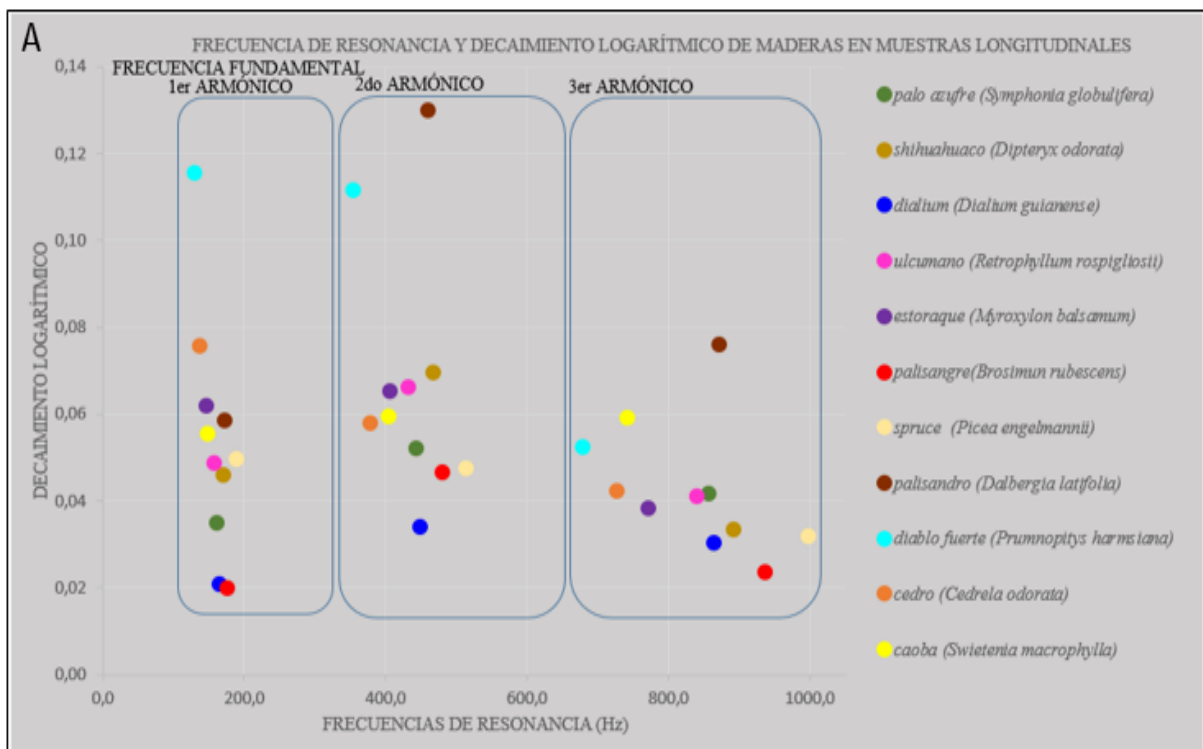
Nota: Entre paréntesis los datos reales multiplicados por 1000

e. Relación entre Frecuencia Fundamental y Decaimiento Logarítmico.

Es necesario recalcar que la resonancia de una tablilla de madera y la duración de su sonido relaciona la frecuencia fundamental y el decaimiento logarítmico en sentido longitudinal y transversal, ya que está conformada por elementos xilémicos longitudinales y radiales, y ambos son responsables de sus características acústicas. En un cordófono las técnicas constructivas pueden potenciar dichas vibraciones.

e.1 Muestras Longitudinales.

En la figura 32 se muestra la relación de las frecuencias de resonancia y los decaimientos logarítmicos, así como sus tendencias, para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, de muestras en sentido longitudinal.



Continua...

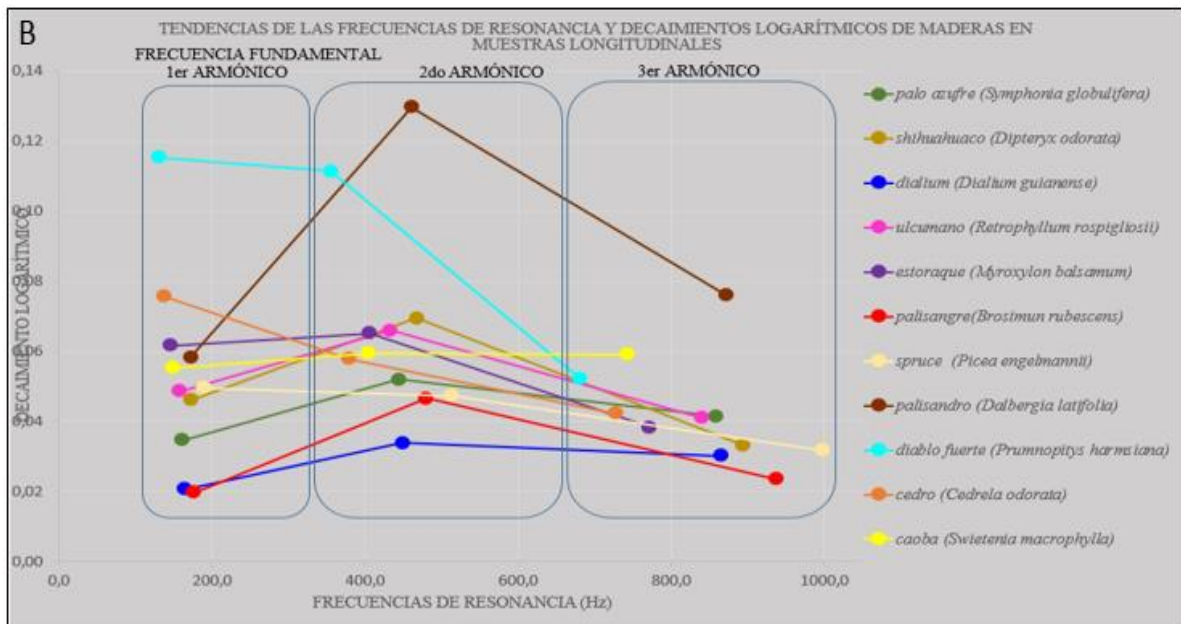
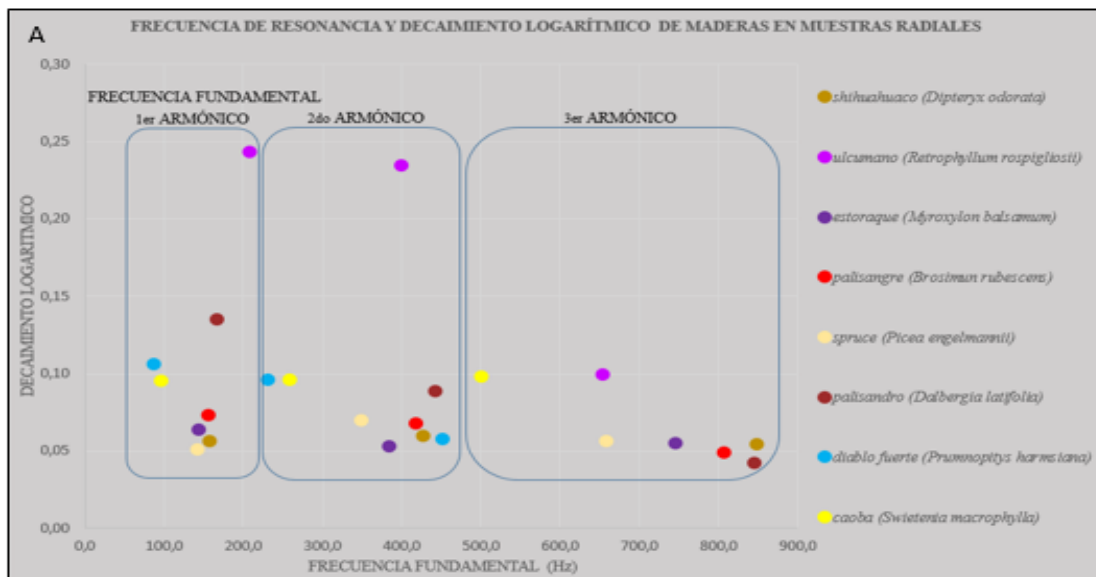


Figura 32: A: Relación entre frecuencias de resonancia y decaimientos logarítmicos en muestras longitudinales para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico. B: Tendencias.

e.2 Muestras Radiales.

En la figura 33 se muestra la relación de las frecuencias de resonancia y los decaimientos logarítmicos, así como sus tendencias, para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, de muestras en sentido radial.



Continua...



Figura 33: A: Relación entre frecuencias de resonancia y decaimientos logarítmicos en muestras radiales para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico. B: Tendencias.

Por su uso tradicional en fondos de cordófonos de cuerda y con fines de comparación se presenta en la Figura 34 el comportamiento de la caoba (*Swietenia macrophylla*) relacionando sus frecuencias de resonancia y su decaimiento logarítmico; consecutivamente en la Figura 35 se presenta los resultados para el Palisangre (*Brosimum rubescens*) y en la Figura 36 para el palo azufre (*Symphonia globulifera*) ambas comparadas con la caoba (*Swietenia macrophylla*). En el Anexo 8 se presentan los resultados de las observaciones individuales de las demás especies estudiadas.

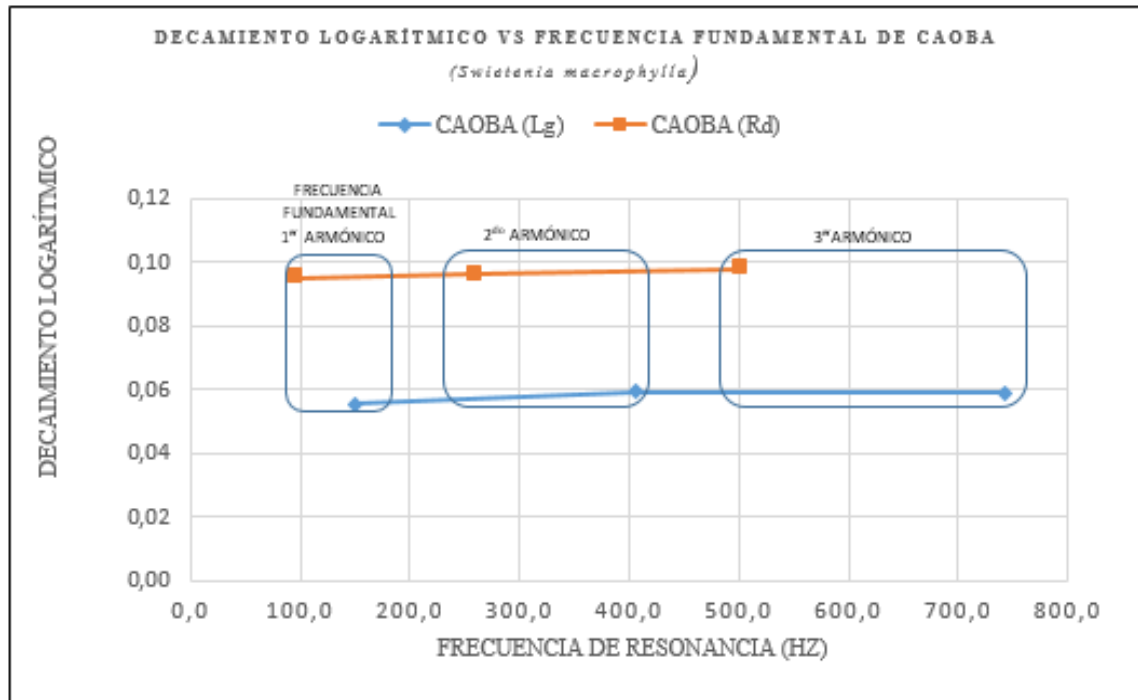


Figura 34: Reacción entre decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1º r armónico), 2º y 3º armónico, en muestras longitudinales y radiales de caoba (*Swietenia macrophylla*).

Con respecto a los índices de decaimiento logarítmico de la caoba (*Swietenia macrophylla*) para la frecuencia fundamental (1º armónico), 2º y 3º armónico, los valores en la sección longitudinal: (55,4), (59,4) y (59,1) respectivamente, son menores con respecto a la sección radial: (95,0), (96,0) y (97,7) respectivamente, por esto se observa en la Figura 34 que la sección radial está por encima de sus correspondientes longitudinales; esto significa que la sección longitudinal tiene mayor vibración y la sección radial mayor rigidez. Si comparamos independientemente los valores para cada sección, son muy cercanos, esto indica que en los tres armónicos la vibración de la madera tiene intensidades similares, y mayor preponderancia en la frecuencia fundamental o 1º armónico.

Con respecto a las frecuencias de resonancia de la caoba (*Swietenia macrophylla*) para la frecuencia fundamental (1º armónico), 2º y 3º armónicos, la sección longitudinal (150 Hz., 405 Hz. y 742 Hz. respectivamente) presenta valores mayores y se ubican distanciados en un rango más amplio en el espectro de frecuencias de resonancia con respecto a la sección radial (97 Hz., 260 Hz. y 502 Hz. respectivamente); predominando en ambas secciones como frecuencia de mayor vibración en la frecuencia fundamental o 1º armónico.

En conclusión, en una tablilla de resonancia de caoba (*Swietenia macrophylla*), las vibraciones longitudinales son mayores que las radiales y ambas tienen mayor vibración en frecuencias bajas (Lg:150Hz. y Tr: 97 Hz.). y como característica particular ambas secciones atenúan las vibraciones en forma gradual hacia frecuencias agudas.

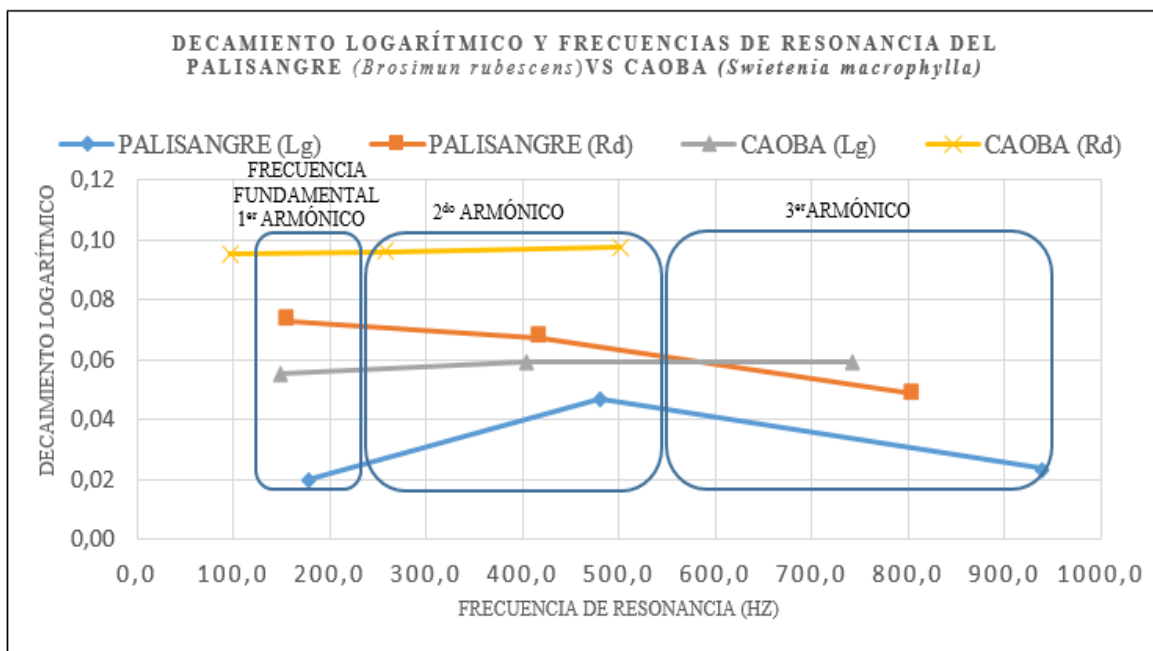


Figura 35: Relación entre decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, en muestras longitudinales y radiales de palisangre (*Brosimum rubescens*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

Con respecto a los índices de decaimiento logarítmico del palisangre (*Brosimum rubescens*) para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, los valores en la sección longitudinal: (19,7), (46,6) y (23,6) respectivamente, son menores con respecto a la sección radial: (72,8), (67,4) y (48,6) respectivamente; por esto se observa en la Figura 35 que la sección radial está por encima de sus correspondientes longitudinales esto significa que la sección longitudinal tiene mayor vibración y la sección radial mayor rigidez. Si comparamos independientemente los valores para cada sección, en la sección longitudinal la vibración de la madera es mayor en el 1^{er} armónico y la tendencia de atenuación no es consecutiva, siguiendo el 3^{er} armónico y en mayor grado el 2^{do} armónico, en el orden de bajas hacia altas frecuencias. Mientras que para la sección radial la vibración de la madera es mayor en el 3^{er} armónico. y la tendencia de atenuación es consecutiva en el 2^{do} y el 3^{er} armónico, en orden decreciente de altas hacia bajas frecuencias.

Con respecto a las frecuencias de resonancia del palisangre (*Brosimun rubescens*) para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico; la sección longitudinal (177 Hz., 481 Hz. y 938 Hz. respectivamente), presenta valores mayores y se ubican distanciados en un rango más amplio en el espectro de frecuencias de resonancia con respecto a la sección radial (157 Hz., 419 Hz. y 808 Hz. respectivamente), y la mayor vibración en la sección longitudinal es en la frecuencia fundamental o 1^{er} armónico (177 Hz.) y en sección radial es en el 3^{er} armónico (808 Hz.).

En conclusión, en una tablilla de resonancia de Palisangre (*Brosimun rubescens*), los elementos longitudinales tienen mayor vibración que los radiales; los elementos longitudinales vibran principalmente en frecuencias bajas (177,0 Hz.) y los elementos radiales vibran principalmente en frecuencias altas (807,7 Hz.).

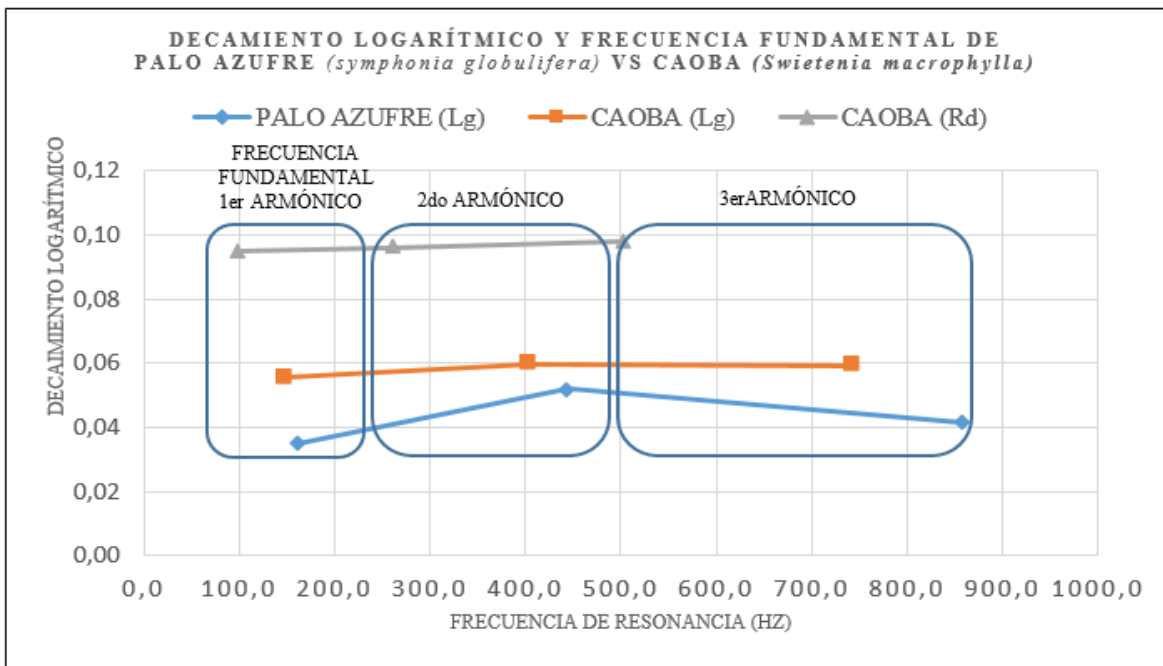


Figura 36: Relación entre decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, en muestras longitudinales de palo azufre (*Symphonia globulifera*) y en muestras longitudinales y radiales de caoba (*Swietenia macrophylla*).

Con respecto a los índices de decaimiento logarítmico del palo azufre (*Symphonia globulifera*) para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico, los valores en la sección longitudinal: (34,7), (52,0) y (41,5) respectivamente, en la Figura 36, permiten observar que la vibración de la madera presenta tendencia de atenuación no consecutiva en el orden de bajas hacia altas frecuencias, con la mayor vibración en el 1^{er} armónico, siguiendo el 3^{er} armónico y en mayor grado el 2^{do} armónico. No se concluyeron los ensayos de palo azufre (*symphonia globulifera*) en sección transversal.

Con respecto a las frecuencias de resonancia para la frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en la sección longitudinal: 162.Hz., 445 Hz. y 858 Hz. respectivamente, la mayor vibración es en la frecuencia fundamental o 1^{er} armónico (162 Hz.).

En conclusión, en un tablero de resonancia de palo azufre (*symphonia globulifera*), las vibraciones longitudinales tienen su mayor resonancia en bajas frecuencias (162 Hz.).

4.2.5 Coeficiente de Absorción

Los resultados obtenidos para ocho rangos de frecuencias de resonancia se presentan en la Tabla 26 cuyos valores promedios se grafican en la Figura 37, que definen curvas polinómicas de cuarto grado con líneas de tendencia sinusoidal; que son similares a graficas encontradas por Naves (2011) en maderas nativas brasileras. El coeficiente de variación de estos resultados es del orden del 10% incluyendo el error de medición de las probetas (Anexo 9).

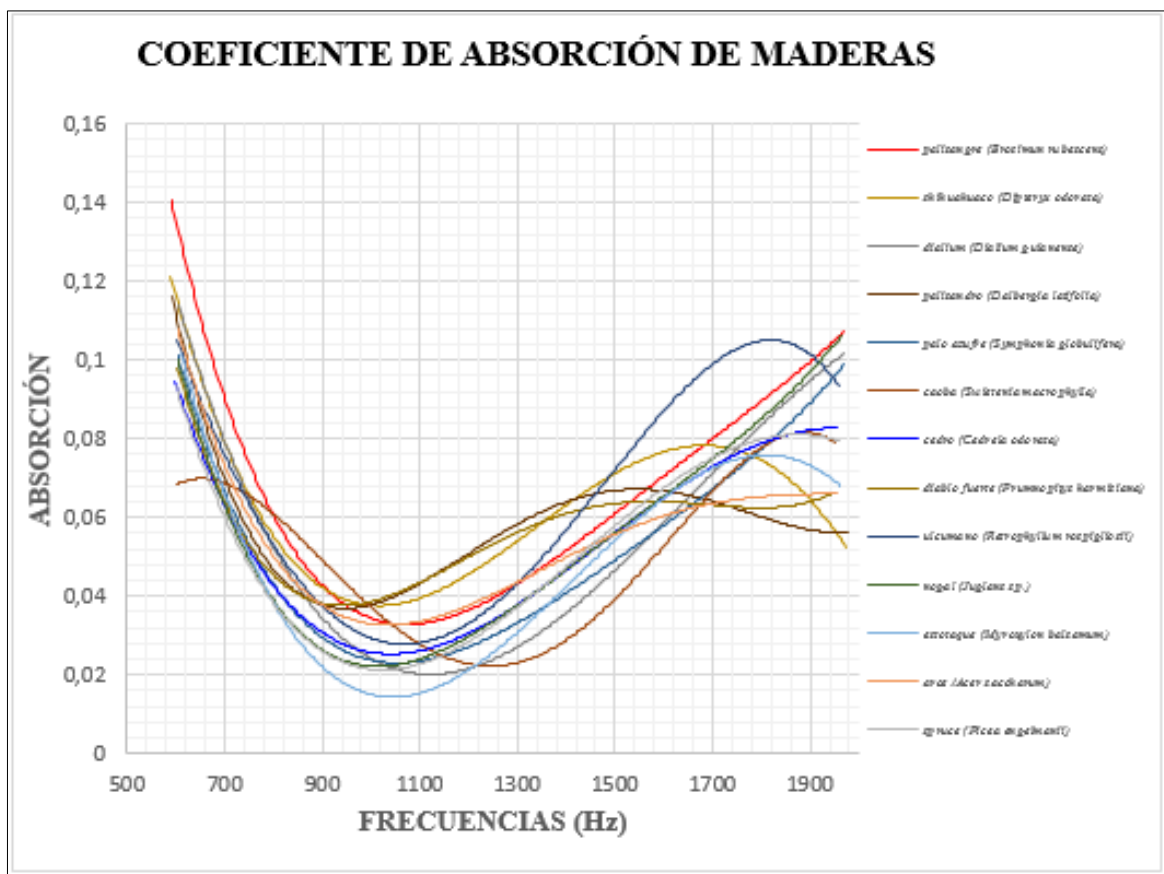


Figura 37: Coeficientes de absorción promedio en maderas de resonancia.

Tabla 26: Resumen de coeficientes de absorción y rangos de frecuencias de resonancia

ESPECIES	Coeficientes de absorción por rangos de frecuencias de resonancia (Hz.)							
	1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	5 ^{ta}	6 ^{ta}	7 ^{ma}	8 ^{va}
	506- 613	775- 800	956 - 995	1166 - 1190	1359 - 1384	1552 - 1584	1701- 1790	1930 - 1977
arce (<i>Acer saccharum</i>)	0,109	0,037	0,041	0,047	0,038	0,067	0,065	0,068
caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	0,072	0,049	0,048	0,029	0,019	0,033	0,084	0,076
cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	0,096	0,037	0,032	0,035	0,039	0,066	0,077	0,083
diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmsiana</i>)	0,099	0,040	0,038	0,062	0,051	0,072	0,060	0,070
dialium (<i>Dialium guianense</i>)	0,119	0,040	0,031	0,031	0,020	0,046	0,079	0,101
estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	0,103	0,030	0,037	0,019	0,031	0,084	0,047	0,075
nogal (<i>Juglans sp.</i>)	0,100	0,032	0,030	0,020	0,038	0,078	0,067	0,094
palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	0,094	0,046	0,060	0,045	0,063	0,089	0,069	0,064
palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	0,128	0,052	0,052	0,036	0,030	0,084	0,083	0,109
palo azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	0,100	0,045	0,037	0,029	0,038	0,063	0,060	0,112
shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	0,117	0,055	0,048	0,041	0,052	0,085	0,077	0,057
spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	0,091	0,039	0,025	0,023	0,027	0,085	0,083	0,094
ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	0,109	0,036	0,042	0,025	0,050	0,096	0,072	0,094

Nota: Coeficiente de variación del coeficiente de Absorción es del orden del 10% incluyendo el error de medición de las probetas

Por ser una madera de uso tradicional en fondos de cordófonos de cuerda y con fines de comparación, en la Figura 38 se ilustra la curva de absorción de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de 600,2 – 1953 Hz., consecutivamente en la Figura 39 se presentan las curvas de absorción para el palisangre (*Brosimum rubescens*) y en la Figura 40 el palo azufre (*Symphonia globulifera*), ambas acompañadas por la curva de la caoba (*Swietenia macrophylla*). Los resultados de las observaciones individuales de las demás especies estudiadas se presentan en el Anexo 9.

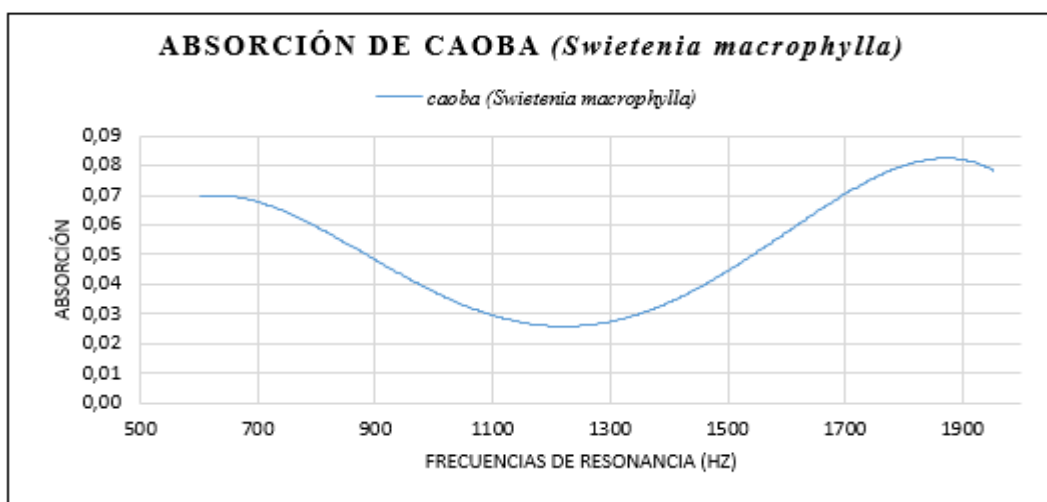


Figura 38: Curva de absorción de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600,2 – 1953 Hz.

El coeficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia y el diagrama de cajas de las mediciones de absorción de la caoba (*Swietenia macrophylla*) se presentan en el Anexo 9-b

La caoba (*Swietenia macrophylla*) presenta coeficientes de absorción promedios con valor mínimo de 0,02 y máximo de 0,08, para los ocho rangos de frecuencias de resonancia evaluados, según la Tabla 27.

Tabla 27: Coeficientes de absorción y rangos de frecuencias de resonancia de caoba (*Swietenia macrophylla*)

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)								
RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA (Hz.)	1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	5 ^{ta}	6 ^{ta}	7 ^{ma}	8 ^{va}
	600,2 - 601,6	787,6 - 789,5	976,2 - 981,4	1172-1174	1364 - 1370	1557 - 1563	1750 - 1762	1941 - 1953
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	0,072	0,049	0,048	0,029	0,019	0,033	0,084	0,076

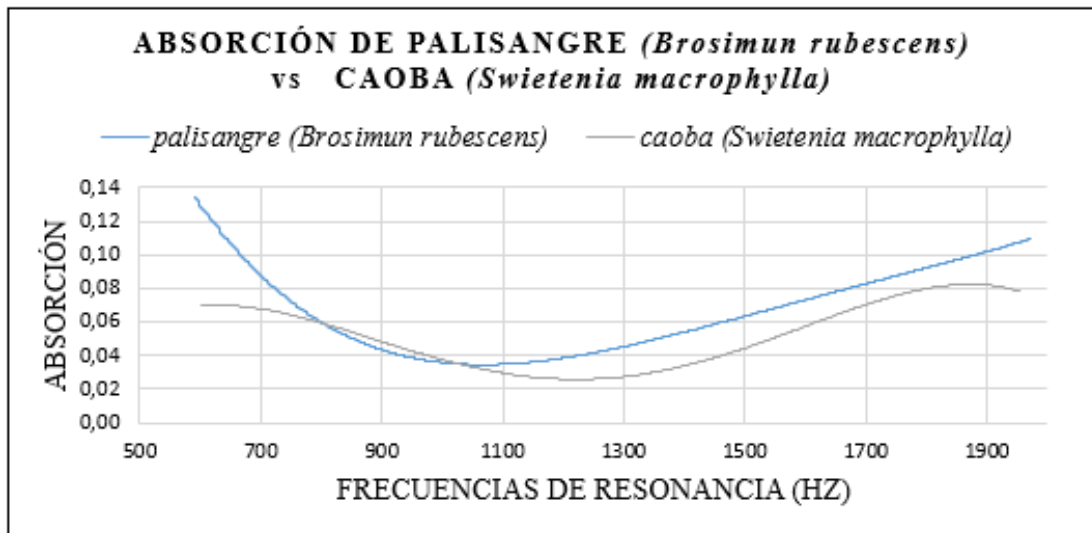


Figura 39: Curva de absorción del palisangre (*Brosimun rubescens*) en el rango de frecuencias de resonancia 590,7– 1970 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

De los rangos de frecuencias de resonancia del palisangre (*Brosimun rubescens*) presentados en el Anexo 9-i, podemos observar en la Figura 39 que en comparación con la caoba (*Swietenia macrophylla*), presenta mayor coeficiente de absorción promedio en los rangos A, D, E, F y G, (o menor reflexión de sonido), En el rango de resonancia B y D, ambas maderas presentan valores de coeficiente de absorción promedio muy cercanos,

En conclusión, el palisangre (*Brosimun rubescens*) presenta índices de coeficientes de absorción promedios con valor mínimo de 0,03 y máximo de 0,13 para los ocho rangos de frecuencias de resonancia evaluados, según la Tabla 28.

Tabla 28: Coeficientes de absorción por rangos de frecuencia de resonancia del palisangre (*Brosimun rubescens*)

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE PALISANGRE (<i>Brosimun rubescens</i>)								
RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA (Hz.)	1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	5 ^{ta}	6 ^{ta}	7 ^{ma}	8 ^{va}
	590,7 - 611,5	793,6 – 798,8	979,1 – 990,9	1173 - 1184	1370 - 1384	1562 - 1574	1761 - 1780	1950 - 1970
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	0,13	0,052	0,052	0,036	0,030	0,084	0,083	0,11

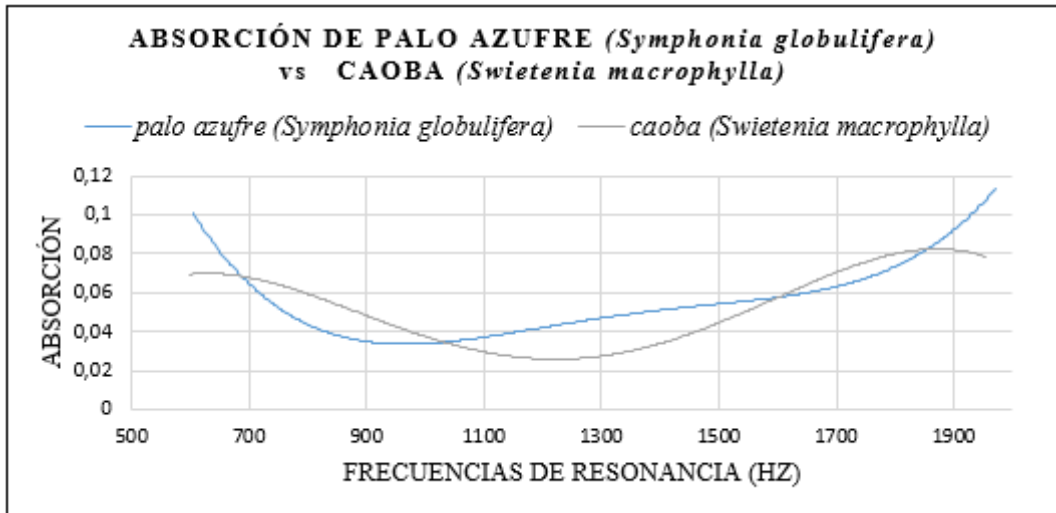


Figura 40: Curva de absorción del palo azufre (*Symphonia globulifera*) en el rango de frecuencias de resonancia 604– 1970 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

De los rangos de frecuencias de resonancia del palo azufre (*Symphonia globulifera*) presentados en el Anexo 9-j, podemos observar en la Figura 40 que en comparación con la caoba (*Swietenia macrophylla*), presenta mayor coeficiente de absorción promedio en los rangos A, D, E, F y H (o menor reflexión de sonido), y es menor en el rango B y G, (o mayor reflexión de sonido), En el rango de resonancia C y F ambas maderas presentan valores de coeficiente de absorción promedio muy cercanos.

En conclusión, el palo azufre (*Symphonia globulifera*) presenta coeficientes de absorción promedios con valor mínimo de 0,03 y máximo de 0,11 para los ocho rangos de frecuencias de resonancia evaluados, según la Tabla 29.

Tabla 8. Coeficientes de absorción por rangos de frecuencias de resonancia del palo azufre (*Symphonia globulifera*)

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)								
RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA (Hz.)	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va
	604 – 608,8	790 - 795	980 - 987	1175 - 1183	1373 - 1383	1566 - 1583	1761 - 1775	1951 - 1970
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	0,100	0,045	0,037	0,029	0,038	0,063	0,060	0,112

4.3 Prueba de Sonido

La prueba de sonido estuvo a cargo del Sr Oscar Cavero Aróstegui: Músico, arreglista, productor musical, autor, compositor, y reconocido guitarrista de diversos estilos, destacado en música criolla. Figura 41.



Figura 41: Músico profesional el Sr. Oscar Cavero ejecutando la prueba de sonido de los cordófonos 1 y 2 (guitarras).

El resultado de la prueba de sonido abarca al instrumento musical en su totalidad, que es un conjunto de resonadores compuestos por diferentes especies de maderas, y materiales diferentes a la madera como gomas, lacas, metales, plásticos u otros; por esto no podemos atribuir el resultado cuantitativo obtenido para el fondo y aros de resonancia como el único factor responsable de la calidad del instrumento construido, pero si utilizamos la aprobación cualitativa del músico profesional como respaldo para garantizar la calidad de las partes utilizadas en el instrumento musical evaluado

La imagen y los resultados de la prueba de sonido del cordófono I se presentan en la figura 42 y tablas 30 y 31; y para el cordófono II en la figura 43 y las tablas 32 y 33.

4.3.1 Evaluación del Cordófono I

Luthier:	Antonio Huamaní Granados (Hg guitars)
Instrumento:	Guitarra acústica
Madera de investigación para fondo y aros de resonancia:	palo azufre, acero caspi, azufre caspi (<i>Symphonia globulifera</i>)



Figura 42: Cordófono fabricado N° 1 (Guitarra 1) A: Vista frontal. B: Vista del fondo de resonancia. C: Vista lateral (aros de resonancia).

Tabla 30: Resultados de la prueba de sonido del cordófono I









CARACTERÍSTICA DEL SONIDO	RESULTADO
Intensidad, proyección	Medio - alto
Equilibrio sonoro, sonoridad (<i>color</i>)	Uniforme
Deterioro, caída (<i>decay</i>)	Bajo
Sensibilidad, ataque (<i>attack</i>)	Medio - bajo
Resonancia, sostenimiento (<i>sustain</i>)	Alto
Brillo (<i>agudos</i>)	Alto
Medios	Bajo
Graves	Alto
Timbre (<i>fondo de resonancia</i>)	Frecuencias bajas
Liberación (<i>reléase</i>)	Alto
Genero musical recomendado	Música clásica
Conclusión	Si es madera para instrumentos musicales.

Tabla 31: Resumen de parámetros acústicos del palo azufre (*Symphonia globulifera*)

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		10		
DENSIDAD ANHIDRA (g/cm ³)		0.69		
		Lg	Rd	
VELOCIDAD DE SONIDO (m/s)		5245	-	
RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA		3389	-	
AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN		8122	-	
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (Kg/cm ²)	Longitudinal	158 822.0	155 736.7	151 150.5
	Radial	-	-	-
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
DECAIMIENTO LOGARÍTMICO	Longitudinal	0.04	0.05	0.04
	Radial	-	-	-
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz)	Longitudinal	*161.6	444.5	858.2
	Radial	-	-	-

*Mayor vibración

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA (Hz)	0.100 (604 - 608.8)	0.045 (790 - 795)	0.037 (980 - 987)	0.029 (1175 - 1183)	0.038 (1373 - 1383)	0.063 (1566 - 1583)	0.060 (1761 - 1775)	0.112 (1951 - 1970)
---	------------------------	----------------------	----------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

MODOS DE VIBRACIÓN						
PLACA	símbolo	A	B	D	F	G
12 x 12 x 0.3 cm.						
		220.9 Hz (188.4 - 274) Hz	460.15 Hz (374.7 - 510.2) Hz	579.2 Hz (543.9 - 610.8) Hz	909.4 Hz	759.5 Hz
FONDO DE GUITARRA	símbolo	α	β	δ		
Espesor: 0.3 cm.						
		56.5 Hz (45.97 - 70.05) Hz	56.2 Hz (51.63 - 60.73) Hz	168.35 Hz (167.4 - 169.3) Hz		

Nota: Coeficiente de variación en muestras longitudinales para la velocidad de sonido (m/s), la resistencia de la onda acústica y la amortiguación de la radiación es de: 5%, para el módulo de elasticidad dinámico (kg/cm²), la frecuencia fundamental (Hz.) y la absorción es de 10%, y para el decaimiento logarítmico es de: 30%.

4.3.2 Evaluación del Cordófono II

Luthier:	Abrahán Falcón Pisconte
Instrumento:	Guitarras ABRAHAN FALCÓN P.
Madera de investigación para fondo de resonancia:	palisangre. (<i>Brosimum rubescens</i>)



Figura 43: Cordófono fabricado N° 2 (Guitarra 2) A: Vista frontal. B: Fondo de resonancia. C: Vista lateral (Aros de resonancia).

Tabla 32: Resultados de la prueba de sonido del cordófono II

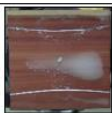


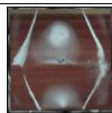

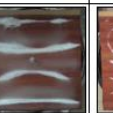





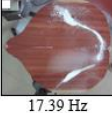
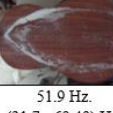







CARACTERÍSTICA DEL SONIDO	RESULTADO
Intensidad, proyección	Alto
Equilibrio sonoro, sonoridad (<i>color</i>)	Pareja
Deterioro, caída (<i>decay</i>)	Medio - Alto
Sebilidad, ataque (<i>attack</i>)	Alto
Resonancia, sostenimiento (<i>sustain</i>)	Bajo
Brillo (<i>agudos</i>)	Alto
Medios	Medio - Bajo
Graves	Bajo
Timbre(<i>fondo de resonancia</i>)	Frecuencias altas
Liberación (<i>reléase</i>)	Bajo
Genero musical recomendado	Criollo, huayno, flamenco
Conclusión	Si es madera para instrumentos musicales.

Tabla 33: Resumen de parámetros acústicos del palisangre (*Brosimum rubescens*)

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		10		
DENSIDAD ANHIDRA (g/cm ³)		1.01		
		Lg	Rd	
VELOCIDAD DE SONIDO (m/s)		5099.6	1891.8	
RESISTENCIA DE LA ONDA ACÚSTICA		4892.2	1801.2	
AMORTIGUACIÓN DE LA RADIACIÓN		5340.5	1994.5	
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
MOE DINÁMICO (Kg/cm ²)	Longitudinal	251 698.6	240 663.7	238 924.5
	Radial	36 516.0	33 767	32 670.9
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
DECAIMIENTO LOGARÍTMICO	Longitudinal	0.02	0.05	0.03
	Radial	0.07	0.07	0.05
		1 ^{er} armónico	2 ^{do} armónico	3 ^{er} armónico
FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz.)	Longitudinal	*177.0	480.5	938.3
	Radial	156.8	418.9	*807.7

*Mayor vibración

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN POR RANGOS DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA (Hz)	0.13 (590.7 - 611.5).	0.052 (793.6 - 798.8)	0.052 (979.1 - 990.9)	0.036 (1173 - 1184)	0.030 (1370 - 1384)	0.084 (1562 - 1574)	0.083 (1761 - 1780)	0.11 (1950 - 1970)
---	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-----------------------

MODOS DE VIBRACIÓN									
PLACA	símbolo	A	B	C		F	G	H	N
20 x 20 x 0.3 cm.									
PLACA	símbolo	a		c	d	e			
12 x 12 x 0.3 cm.									
FONDO DE GUITARRA Espesor 0.3 cm.	símbolo	α	β	γ	δ	ε	η	θ	
FONDO DE BANDURRIA Espesor 0.3 cm.									
									

Nota: Coeficiente de variación en muestras longitudinales y radiales para la velocidad de sonido (m/s), la resistencia de la onda acústica y la amortiguación de la radiación es de: 5%, para el módulo de elasticidad dinámico (kg/cm²), la frecuencia fundamental (Hz.) y la absorción es de 10%, y para el decaimiento logarítmico es de: 30%.

V. CONCLUSIONES

1. Las maderas de palisangre (*Brosimum rubescens*) y el palo azufre (*Symphonia globulifera*) son maderas con aptitud para la fabricación de fondos y aros de resonancia de cordófonos.
2. Los resultados obtenidos para las especies palisangre (*Brosimum rubescens*) y el palo azufre (*Symphonia globulifera*) garantizan la obtención de instrumentos musicales de óptima calidad y se respaldan con los criterios evaluados en la prueba de sonido.
3. Las especies palisangre (*Brosimum rubescens*) y el palo azufre (*Symphonia globulifera*) en fondos de resonancia de guitarras producen sonidos en frecuencias bajas y altas, presentando la última mayor duración del sonido
4. Entre las especies palisangre (*Brosimum rubescens*) y el palo azufre (*Symphonia globulifera*), la primera presenta mayor absorción de sonido.

VI. RECOMENDACIONES

1. Para el análisis de la frecuencia fundamental y el decaimiento logarítmico es necesario observar la tendencia de la resonancia en la mayor cantidad posible de armónicos.
2. Realizar estudios de amortiguación de la radiación y resistencia de la onda acústica en muestras radiales de diferentes calidades y en diferentes especies para corroborar su utilidad en la determinación de la calidad acústica a través de la composición de la madera mediante el efecto del tamaño de los anillos de crecimiento.
3. Para la determinación de los modos de vibración en la fabricación de cordófonos es necesario utilizar muestras con dimensiones estandarizadas.
4. Completar la prueba de sonido de las maderas Palisangre (*Brosimum rubescens*), Shihuahuaco (*Dipteryx odorata*) y Dialium (*Dialium guianense*) utilizadas como fondos y aros de resonancia para bandurria, mandolina y charango respectivamente.
5. Reducir el margen de error aumentando el número de muestras y mejorando la selección teniendo en cuenta la homogeneidad de la madera.
6. Con la información obtenida en coeficientes de absorción se recomienda incluirla en el diseño y mejoramiento de instrumentos musicales a fin de mejorar la calidad del producto.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Aldem, H. (1997). *Softwoods of North America* Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Recuperado de <https://www.fs.usda.gov/treearch/treearch/pubs/download/5648.pdf>
- ASTM C: 384 – 04. (2004) I Método de prueba estándar de Impedancia y absorción de materiales acústicos, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2004 doi: 10.1520/C0384-04, www.astm.org.
- Barreto, G., & Herrera, D. (1990). *Juglans Neotrópica.*, Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de los Recursos Naturales y del Ambiente (INDERENA). Recuperado de <https://www.guao.org/sites/default/files/biblioteca/Juglans%20Neotr%C3%B3pica.pdf>
- Bravo, P. (2017). Análisis comparativo de las propiedades físicas de la madera de *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith (tamarindo), en el sentido longitudinal y transversal de cuatro porciones del árbol y sus probables usos, Las Piedras – Tambopata, (Tesis de Pre - Grado, Puerto Maldonado, Perú, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios). Recuperada de <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/267>
- Carnero P. (2008) Determinación Preliminar del Módulo de Elasticidad Mediante el Empleo de Técnicas no Destructivas para Maderas Tropicales Peruanas, (Tesis de Pre – grado), Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cueva, MN., Vélez, DF., Barrios, TA y Nieto RV. (2013). Pino romerón [*Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page], especie nativa potencial para la reforestación en zonas altoandinas de Colombia Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de <http://iescinoc.edu.co/wp-content/uploads/Silvicultura-del-pino-romeron-CINOC.pdf>

- Cheng, G., Houjiang, Z., Xiping, W., Hu, M., Lujing, Z., Fenglu, L. (2017) Experimental and Theoretical Modal Analysis of Full-Sized Wood Composite Panels Supported on Four Nodes. *Materials*, 10(6), 683; <https://doi.org/10.3390/ma10060683>.
- Elejabarrieta, M. (1997). The modal analysis: application to the musical acoustic. *BIBLID* 1137-4411, 4; 153-165. Recuperado de <https://docplayer.es/13930993-El-analisis-modal-su-aplicacion-a-la-acustica-musical-the-modal-analysis-application-to-the-musical-acustic.html>
- Foelkel, C. (2014). Instrumentos de madera producidos con madera de reforestamiento. *Eucalyptus. Newsletter.* n° 46. Recuperado de https://www.eucalyptus.com.br/artigos/news46_Instrumentos_Musicais.pdf
- Fakopp Enterprise Bt. - A. (2005) Fast Fourier Vibration analyzer User's Guide. Fakopp Enterprise publication. HU.
- Fakopp Enterprise Bt – C. (2005) FAKOPP Ultrasonic Timer User's Guide. Fakopp Enterprise publication. HU.
- Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Recuperado de <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/62200>
- García, H., Chumbimune, S., Acevedo, M., Chavesta, M., Cuellar, J., Salazar, H. (2017). Aptitud de uso del ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), procedente de una plantación de 32 años mediante la caracterización tecnológica y anatómica *Revista Forestal del Perú*. 32 (2). p 78 – 88. doi: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1039>
- García, R. & Moya, R. (1998). El aserrío de *Dialium guianense* (Aubl) Sandwith en Costa Rica. *Madera y Bosques* 4(1), 1998:41-51. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/617/61740105.pdf>
- Huiza, A 2020. Trabajabilidad de la madera de *dipteryx ferrea* (ducke) dücke (shihuahuaco) de plantación de 16 años; provincia de padre abad-ucayali. (Tesis de Pre – Grado, Pucallpa, Perú. Universidad Nacional de Ucayali). Recuperada de <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4355>

- Kollmann, F.P.; Côté W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood. München, (v.1, .274 – 285). Alemania, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Lancón, L. (2012). Caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala. (Tesis Maestría. Mexico D.F. Universidad Autónoma Metropolitana) Recuperado de <https://1library.co/document/y62g077z-caracterizacion-absorcion-sonora-modelos-fisicos-escala.html>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE); Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2014). Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales – Ecuador. Quito. Recuperado de <http://www.fao.org/3/i4407s/i4407s.pdf>
- Morales, A. 2013. El estoraque (*Myroxylon balsamum* (L.) Harms). (Tesis de Pre - Grado, Jaén, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca). Recuperado de <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/419>
- Motech. (1997). Operación manual. Funktions generator FG-506 und FG-513. Conrad Electronic gmbh.
- Normas técnicas peruanas (NTP), (2004). "Maderas. Método de Determinación de Contenido de Humedad". Norma Técnica Peruana 251.010. 2da edición. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. Lima, Perú. 7p.
- Normas técnicas peruanas (NTP). (1980). "Maderas. Método de Determinación de Densidad". Norma Técnica Peruana 251.011. 2da edición. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. Lima, Perú. 7p.

- Naves, R. (2011). Caracterización experimental de absorción acústica de maderas nativas brasileras. (Proyecto de graduación. Brasilia, Brasil. Universidad de Brasilia.) Recuperado de <https://bdm.unb.br/handle/10483/3433>
- Phonic. (2012). Manual de usuario Amplificador potenciado max 1500 plus. v1.2.
- Portillo, R.; Cueva, N; Sierra, J y. Vásquez, M. 2019. Propiedades físico mecánicas del *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page de 22 años en dos sistemas de plantación en Colombia. Revista Forestal del Perú. 34 (1): pág.41 – 51. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v34i1.1284>.
- Quintanar, A., Herrera, M., Rivera, L., Pérez C. 1998. Algunas características anatómicas y acústicas de tres especies de angiospermas de Huayacocotla. México DF. Revista Madera y Bosques 4(1):15-25. doi:10.21829/myb.1998.411364
- R&S@HMO (2015). Manual de uso. Compact Series Digital Oscilloscope. www.rohde-schwarz.com
- Roohnia, M., Hossein, S., Alavi-Tabar, A., Tajdini, A., A, Jahan-Latibari y N. Manouchehri. (2011). Acoustic properties in Arizona cypress logs: a tool to select Wood for sounding board. BioResources. 6 (1):386 – 399. Recuperado de <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/acoustic-properties-in-arizona-cypress-logs-a-tool-to-select-wood-for-sounding-board/>
- Ruffinatto, F; Crivellaro, A. (2011). Atlas of Macroscopic Wood Identification: With a Special Focus on Timbers Used in Europe and CITES-listed Species. 1ra edición. Suiza, Springer, Cham,439. doi <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23566-6>.
- Shure tech portal (2010). Especificaciones técnicas micrófono SV 100. www.shure.com
- Sotomayor, J. (2017). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 9 (48). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.150>

- Sotomayor, J. (2018). Módulo de elasticidad dinámico, factor de calidad e índice material de 25 maderas. Determinación por vibraciones transversales. *Ingeniare. Chile*. vol. 27 N° 2, 2019, pp. 280-287. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7046830>
- Suárez, B. & Sotomayor, J. Caracterización de maderas mexicanas para la elaboración de instrumentos musicales. Recuperado de https://www.academia.edu/6822100/Maderas_Mexicanas_para_instrumentos_musicales
- Spavento, E. (2008) Propiedades físicas de la madera. Buenos Aires, Argentina universidad nacional de la Plata. 29 p. Recuperado de <https://scholar.google.com/citations?user=9RjRAGwAAAAJ&hl=es>
- Ulrike G.K. Wegst (2006) Wood for sound. *American Journal of Botany* .93(10):1439-1448. doi:10.3732/ajb.93.10.1439
- Van Der Slooten, H; Souza, M. (1993) Evaluación de especies madereras de la Amazonía Seleccionadas para la Manufactura de Instrumentos musicales. Manaus - Amazonas - Brasil. INPA. 123 p.
- Virtins technology. (2010-2020) Manual Rev. 1.5 Vt rta-168a/b. www.virtins.com
- Bucur, V (2006), *Acoustics of Wood*. Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, XVIII, 394 p. doi 10.1007/3-540-30594-7
- Zurdo, D. (2007). El Violín: primer instrumento perfecto. ACTA 04516 p. Recuperado de https://www.acta.es/medios/articulos/cultura_y_sociedad/045027.pdf

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Lista de especies evaluadas

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
icoja	<i>Unonopsis floribunda</i>	Annonaceae
leche huayo, leche caspi	<i>Couma macrocarpa</i>	Apocynaceae
copal	<i>Dacryodes nitens</i>	Burseraceae
guisador caspi	<i>Tapura juruana</i>	Dichapetalaceae
acero caspi	<i>Symphonia globulifera</i>	Clusiaceae
apacharama	<i>Licania lata</i>	Chrysobalanaceae
huimba	<i>Ceiba samauma</i>	Bombacaceae
charichuelo	<i>Garcinia macrophylla</i>	Clusiaceae
utucuro	<i>Septotheca tessmanii</i>	Bombacaceae
hualaja	<i>Zanthoxylum ekmanii</i>	Rutaceae
misho chaqui	<i>Helicostylis tomentosa</i>	Moraceae
huacapu	<i>Minquartia guianensis</i>	Olacaceae
caimitillo	<i>Chrysophyllum preuril</i>	Sapotaceae
guacamayo caspi	<i>Simiria cordifolia</i>	Rubiaceae
añuje caspi, añuje moena	<i>Anaueria brasiliensis</i>	Lauraceae
requia	<i>Guarea kuntiana</i>	Meliaceae
guariuba	<i>Clarisia racemosa</i>	Moraceae
zapotillo machin zapote	<i>Matisia bracteolosa</i>	Bombacaceae
caballo micuna	<i>Guarea glabra</i>	Meliaceae
tahuari	<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
purma caspi	<i>Casearea arborea</i>	Flacourtiaceae
cumaceba	<i>Swartzia polyphylla</i>	Fabaceae

Continúa

...

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
capirona de altura	<i>Capirona decorticans</i>	Rubiaceae
chontaquiroy	<i>Diplotropis purpurea</i>	Fabaceae
cachimbo caspi	<i>Couratari guianensis</i>	Lecythidaceae
shiringana, gutapercha	<i>Sapium marmierii</i>	Euphorbiaceae
palisangre	<i>Brosimum rubescens</i>	Moraceae
maria buena	<i>Pterocarpus santalinoides</i>	Fabaceae
shiringa	<i>Heva brasiliensis</i>	Euphorbiaceae
huamanzamana	<i>Jacaranda copaia</i>	Bignoniaceae
sacha castaña, olla de mono	<i>Lecythis pisinis</i>	Lecythidaceae
sacha casho	<i>Anacardium giganteum</i>	Anacardiaceae
quinilla blanca	<i>Pouteria glomerata</i>	Sapotaceae
tornillo colorado	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	Fabaceae
machimango hoja grande	<i>Eschweilera gigantea</i>	Lecythidaceae
remo caspi	<i>Aspidosperma rigidum</i>	Apocynaceae
cedro masha	<i>Cabralea canjerana</i>	Meliaceae
sacha cetico	<i>Schefflera morototoni</i>	Araliaceae
uchumullaca	<i>Trichilia maynasiana</i>	Meliaceae
rifari	<i>Miconia poeppigii</i>	Melastomataceae
cumala caupuri	<i>Virola pavonis</i>	Myristicaceae
canela moena	<i>Ocotea javitensis</i>	Lauraceae
pashaco	<i>Enterolobium barnebianum</i>	Fabaceae
umari	<i>Poraqueiba sericea</i>	Icacinaceae
carahuasca	<i>Guatteria pteropus</i>	Annonaceae
shimbillo	<i>Inga sp.</i>	Fabaceae
cumala aguanillo	<i>Otoba parvifolia</i>	Myristicaceae
marupa	<i>Simarouba amara</i>	Simaroubaceae
aceite caspi	<i>Caraipa densiflora</i>	Verbenaceae
cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae
cepanchina	<i>Sloanea durissima</i>	Elaeocarpaceae

Continúa...

ESPECIE		FAMILIA
Nombre Común	Nombre científico	
Shihuahuaco,Charapilla	<i>Dypterix odorata</i>	Fabaceae
chuchuhuasi	<i>Maytenus amazonica.</i>	Celastraceae
macambillo	<i>Theobroma</i>	Sterculiaceae
manchinga	<i>Brosimun potabile</i>	Moraceae
quillosa, tornillo blanco	<i>Qualea paraensis</i>	Vochysiaceae
quillosa	<i>Vochysia lomatophylla</i>	Vochysiaceae
quillosa de altura	<i>Vochysia bracedinae</i>	Vochysiaceae
anis moena	<i>Ocotea fragrantissima</i>	Lauraceae
quinilla colorada	<i>Manilkara bidentata</i>	Sapotaceae
renaco	<i>Ficus americana</i>	Moraceae
chimicua	<i>Perebea guianensis</i>	Moraceae
cumala llorona	<i>Osteophloeum platyspermum</i>	Myristicaceae
mari mari	<i>Hymenaea coubaril</i>	Fabaceae
lagarto caspi	<i>Calophyllum brasiliense</i>	Clusiaceae
achiote caspi	<i>Sloanea sp.</i>	Elaeocarpaceae
insira	<i>Maclura tinctoria</i>	Moraceae
almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Caryocaraceae

FUENTE: Herbarium Amazonense (AMAZ). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP).

Anexo 2: Criterios de evaluación de los luthiers

EVALUACIÓN LUTHIER “A”

CRITERIOS	CALIFICACIÓN	OBS. GENERALES
1) Peso	SI	Se recomendaron especies para partes específicas de cordófonos.
2) Color	(aprobada)	
3) Olor		
4) Uso		
	NO (rechazadas)	

Nota: El luthier “A” ocupa la tercera posición entre los que aprueban el mayor número de especies (28 especies), entre sus aprobaciones se diferenciaron seis categorías, las cuales identificó mediante vistos buenos, siendo: (√): Maderas pesadas de calidad de sonido baja, (√√): Maderas pesadas de calidad de sonido medio, (√√√): Madera pesada de calidad de sonido bueno, (√√√√-): Madera de peso medio con calidad de sonido, (√√√√+): Maderas de peso medio de calidad de sonido bueno superior, (√√√√√): Maderas de bajo peso de calidad de sonido bueno, y (√√√√√√): Maderas de bajo peso de calidad de sonido alto. El luthier tomó en cuenta cuatro criterios: Peso, Color, Olor, y Uso.

EVALUACIÓN LUTHIER “B”

CRITERIOS	CALIFICACIÓN	OBS. GENERALES
1) Textura-	SI	Ninguna madera podría ser utilizada en tapa armónica.
2) Calidad de hebra		
3) Porosidad	(aprobada)	Se descarta maderas valiosas muy duras por difícil Trabajabilidad.
4) Secado al natural		
	NO (rechazadas)	

Nota: El luthier “B” ocupa la segunda posición en la mayor cantidad de especies aprobadas (33 especies), entre sus aprobaciones diferenció cuatro categorías: “X”: Maderas sólo para Diapasón, “XX”: Muy buena para diapasón, “sT”: Sin tratamiento buena para elaborar cajas armónicas. y “cT”: Con tratamiento buena para elaborar cajas armónicas. El tratamiento referido consiste en el previo apilado de la madera para su secado natural durante el tiempo que sea necesario, y los criterios tomados en cuenta son cuatro: Textura, Calidad de hebra, Porosidad y Contenido de Humedad.

EVALUACIÓN LUTHIER “C”

CRITERIOS	CALIFICACIÓN	OBS. GENERALES
1) Sonido	√√ : Buen sonido + buena	Se asignó una Nota (escala musical) a cada especie. Ninguna madera podría ser utilizada en tapa armónica.
2) Estética	SI estética	
	√ : Buen sonido	
	NO X: Descartar	

Nota: El luthier “C” ocupa la primera posición en la mayor cantidad de especies aprobadas (53 especies), entre sus aprobaciones diferenció dos categorías: (√): Maderas con buen sonido y buena estética, y (√√): Maderas con buen sonido. El luthier tomó en cuenta dos criterios: El sonido y la estética.

EVALUACIÓN LUTHIER “D”

CRITERIOS	CALIFICACIÓN	OBS. GENERALES
1) Comparación con maderas tradicionales	SI	Es necesario doblar la madera. Ninguna madera podría ser utilizada en tapa armónica.
2) Doblado de la madera	NO	

Nota: El luthier “D” ocupa el cuarto lugar en la mayor cantidad de especies aprobadas (16 especies), realizando su selección mediante la comparación con especies tradicionales para partes específicas de sus cordófonos y observando características como la posibilidad de doblado de la madera.

EVALUACIÓN LUTHIER “E”

CRITERIOS	CALIFICACIÓN	OBS. GENERALES
Comparación con maderas tradicionales	SI	Se recomendaron especies para partes específicas de cordófonos.
	NO	

Nota: El luthier “E” aprobó la menor cantidad de especies (10 especies), realizando su selección mediante la comparación con especies tradicionales para partes específicas de sus cordófonos.

Anexo 3: Coeficiente de variación para la velocidad de sonido en muestras longitudinales y radiales.

ESPECIE	MUESTRAS LONGITUDINALES			MUESTRAS RADIALES		
	Promedio V (m/s)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio V (m/s)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	5325,7	216,4	0,04	1314,6	17,44	0,01
CEDRO (<i>Cedrela odorata.</i>)	5106,1	1860,51	0,04	-	-	-
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	5173,4	272,4	0,05	1193,8	11,0	0,01
DIALIUM						
Albura (<i>Dialium guianense</i>)	5561,4	157,0	0,03	-	-	-
Duramen	5666,4	19,8	0,003			
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	4563,3	132,6	0,03	1951,3	82,0	0,04
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	5012,5	197,5	0,04	2018,1	19,8	0,01
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens.</i>)	5099,6	122,25	0,02	1891,8	70,01	0,04
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	5245,0	233,4	0,04	-	-	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	4823,7	206,9	0,04	2165,5	56,0	0,03
SPRUCE						
1 ^{ra} calidad (<i>Picea engelmannii</i>)	5874,2	226,0	0,04	1694,3	45,3	0,03
4 ^{ta} calidad				1251,1	8,5	0,01
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii.</i>)	4977,9	196,60	0,04	1115,6	13,87	0,01

Anexo 4: Coeficiente de variación para la resistencia de la onda acústica y la amortiguación de la radiación en muestras longitudinales y radiales.

ESPECIE	Sección longitudinal						Sección radial					
	Resistencia de la onda acústica			Amortiguamiento de la radiación			Resistencia de la onda acústica			Amortiguamiento de la radiación		
	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio.	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio.	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio.	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	3237,3	150,2	5	9562,3	506,8	5	757,3	41,6	5	2358,3	86,1	4
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	2429,0	87,1	4	11229,0	530,8	5						
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmsiana</i>)	2785,2	115,7	4	8288,0	396,2	5	665,3	19,2	3	2141,2	45,4	2
DIALIUM duramen (<i>Dialium guianense</i>)	5703,9	100,3	2	5631,2	131,7	2	-	-	-	-	-	-
alburá	5267,9	208,2	4	5754,0	272,8	5	-	-	-	-	-	-
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	3796,2	151,0	4	5487,3	183,3	3	1620,3	65,7	4	2292,1	80,3	4
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	3360,0	171,5	5	7814,4	310,4	4	1302,5	48,0	4	3141,9	127,9	4
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	4577,3	247,2	5	5251,8	256,1	5	1916,5	82,8	4	1994,5	108,3	5
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	3389,0	158,0	5	8121,6	439,6	5	-	-	-	-	-	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	4650,0	234,8	5	5460,7	285,6	5	1914,8	96,6	5	2399,5	131,7	5
SPRUCE 1 ^{ra} calidad (<i>Picea engelmannii</i>)	2260,8	86,8	4	15676,7	858,2	5	636,3	32,0	5	4701,2	228,9	5
4 ^{ta} calidad	-	-	-	-	-	-	429,5	11,0	3	3647,6	155,5	4
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	2102,0	101,8	5	11172,1	544,4	5	464,1	23,7	5	2658,0	139,3	5

Anexo 5: Coeficiente de variación para la Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico. A) Muestras longitudinales. B) Muestras radiales.

A) Muestras longitudinales

ESPECIE	FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{er} armónico)			2 ^{do} ARMÓNICO			3 ^{er} ARMÓNICO		
	Promedio total	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación (%)	Promedio total	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación (%)	Promedio total	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	149,5	10,3	67	405,2	19,0	5	742,4	66,2	9
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	138,0	14,3	10	379,7	32,6	9	727,9	57,1	8
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	131,0	8,4	6	355,5	18,4	5	680,5	44,4	7
ESTORAQUE (<i>Miroxylon balsanum</i>)	146,5	10,3	7	406,5	17,7	4	772,0	37,4	5
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	172,3	7,4	4	461,3	25,1	5	872,7	46,4	5
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	177,0	7,7	4	480,5	28,4	6	938,3	56,0	6
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	161,6	6,0	4	444,5	12,6	3	858,2	23,3	3
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	172,3	12,8	7	467,4	33,1	7	894,0	62,6	7
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	165,29	14,1	9	449,35	39,0	9	865,23	78,2	9
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	189,2	6,3	3	513,9	17,8	4	998,4	29,5	3
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	157,9	6,1	4	433,2	17,1	4	840,7	39,1	5

B) Muestras radiales

ESPECIE	FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{er} armónico)			2 ^{do} ARMÓNICO			3 ^{er} ARMÓNICO		
	Promedio total	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio total	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio total	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	97,3	3,0	3	259,6	5,0	2	501,6	14,9	3
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	87,1	3,1	4	231,4	4,2	2	451,9	7,8	2
ESTORAQUE (<i>Miroxylon balsanum</i>)	144,3	10,7	7	384,2	2,9	1	746,3	8,2	1
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	167,6	2,6	2	443,1	6,6	2	845,4	13,1	2
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	156,8	10,9	7	418,9	30,3	7	807,7	58,3	7
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	157,6	12,7	8	427,8	26,9	6	848,2	32,4	4
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	136,1	10,2	8	350,1	30,1	9	658,5	62,9	10
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	208,1	5,3	3	400,1	6,7	2	654,5	14,2	2

Anexo 6: Coeficiente de variación del módulo de elasticidad dinámico en muestras longitudinales y radiales para la Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónicos.

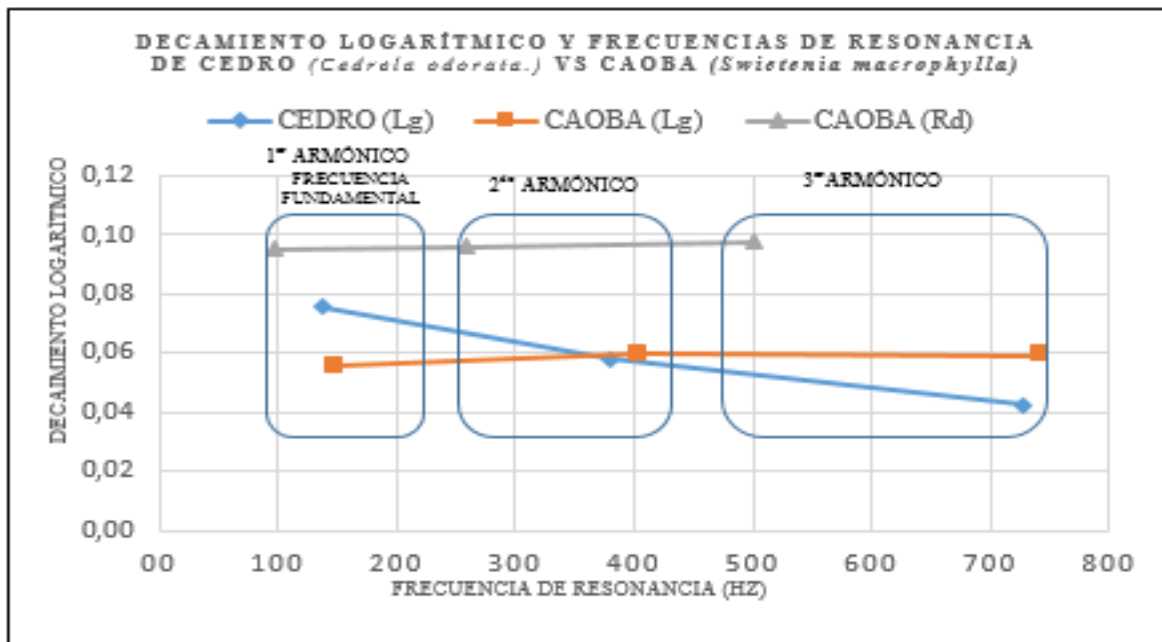
ESPECIE	MUESTRAS LONGITUDINALES									MUESTRAS RADIALES								
	FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{er} ARMÓNICO)			2 ^{do} ARMÓNICO			3 ^{er} ARMÓNICO			FRECUENCIA FUNDAMENTAL (1 ^{er} ARMÓNICO)			2 ^{do} ARMÓNICO			3 ^{er} ARMÓNICO		
	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	147554,0	14078,2	10	145614,6	14575,0	10	142098,8	13856,6	10	9084,1	802,3	9	8390,2	733,6	9	8152,9	727,6	9
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	108484,8	8350,6	8	106559,8	8548,5	8	101522,9	7580,1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	176968,8	16629,0	9	168926,6	12865,2	8	161124,8	15412,2	10	7734,0	445,9	6	7067,1	153,5	2	7001,0	153,4	2
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	287649,2	25304,4	9	275304,2	22563,8	8	265549,5	21973,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESTORAQUE (<i>Miroxylon balsanum</i>)	166095,5	14786,4	9	167780,5	8546,0	5	157943,2	9015,9	6	30115,4	1701,4	6	28891,2	1668,9	6	28365,0	1661,8	6
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	152520,3	12243,4	8	141277,9	12678,6	9	134389,6	12506,3	9	26793,7	1325,6	5	24253,9	1123,3	5	22944,1	950,8	4
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	254295,0	17172,9	7	246586,0	20541,2	8	245049,2	19805,0	8	36516,0	2076,2	6	33766,6	1754,6	5	32670,9	1440,2	4
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	158822,0	14143,5	9	155736,7	11900,6	8	151150,5	11957,5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	195757,6	18832,2	10	190467,2	15734,7	8	182349,5	13897,3	8	39452,7	2583,2	7	37147,4	3034,9	8	37276,0	2609,9	7
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	110270,8	11192,8	10	105710,0	10919,6	10	104496,9	10020,2	10	11396,0	750,6	7	9868,1	657,2	7	9610,7	523,5	5
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	73509,5	4709,0	6	72545,7	5113,2	7	71767,5	5563,3	8	38297,0	3283,9	9	18330,4	1332,2	7	12777,6	1059,5	8

Anexo 7: Coeficiente de variación del decaimiento logarítmico en muestras longitudinales y radiales.

ESPECIE	MUESTRAS LONGITUDINALES									MUESTRAS RADIALES								
	ARMÓNICO			1 ^{er} ARMÓNICO			2 ^{do} ARMÓNICO			1 ^{er} ARMÓNICO			2 ^{do} ARMÓNICO			3 ^{er} ARMÓNICO		
	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	57,77	15,4	29,9	45,3	13,4	29,5	36,1	7,3	20,1	95,0	24,1	25,4	96,0	25,4	26,5	97,7	17,6	18,0
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	55,8	16,7	29,9	51,8	7,4	14,3	42,3	9,0	21,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	115,4	30,7	26,6	117,9	30,4	25,8	52,3	8,5	16,3	105,6	29,0	27,4	96,0	25,6	26,7	57,7	8,9	15,4
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	20,6	4,3	21,0	32,8	6,4	19,6	30,2	4,1	13,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESTORAQUE (<i>Miroxylon balsanum</i>)	63,6	14,7	23,2	58,7	7,8	13,4	38,7	3,5	9,2	63,7	16,4	25,7	63,7	16,4	25,7	54,7	15,7	28,7
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	58,1	17,3	29,7	103,0	31,8	30,8	60,6	17,5	28,9	135,0	33,5	24,8	88,5	17,5	19,8	42,1	7,5	17,9
PALISANGRE (<i>Brosimum rubescens</i>)	20,4	7,2	35,0	32,7	11,1	33,9	22,9	7,0	30,5	72,8	16,1	22,1	72,8	16,1	22,1	48,6	6,6	13,6
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	35,1	10,4	29,7	50,2	13,2	26,2	32,7	10,4	31,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	47,3	14,7	31,2	56,2	15,9	28,2	33,2	6,6	19,9	55,92	15,0	26,9	59,2	17,3	29,2	54,0	15,4	28,4
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>)	53,4	15,9	29,8	47,4	11,8	24,9	31,8	4,6	14,5	41,1	10,3	25,1	41,1	10,3	25,1	56,3	11,0	19,6
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	51,4	16,1	31,2	46,2	11,1	23,9	38,2	11,6	30,4	242,8	32,4	13,3	234,7	52,4	22,3	98,9	18,0	18,2

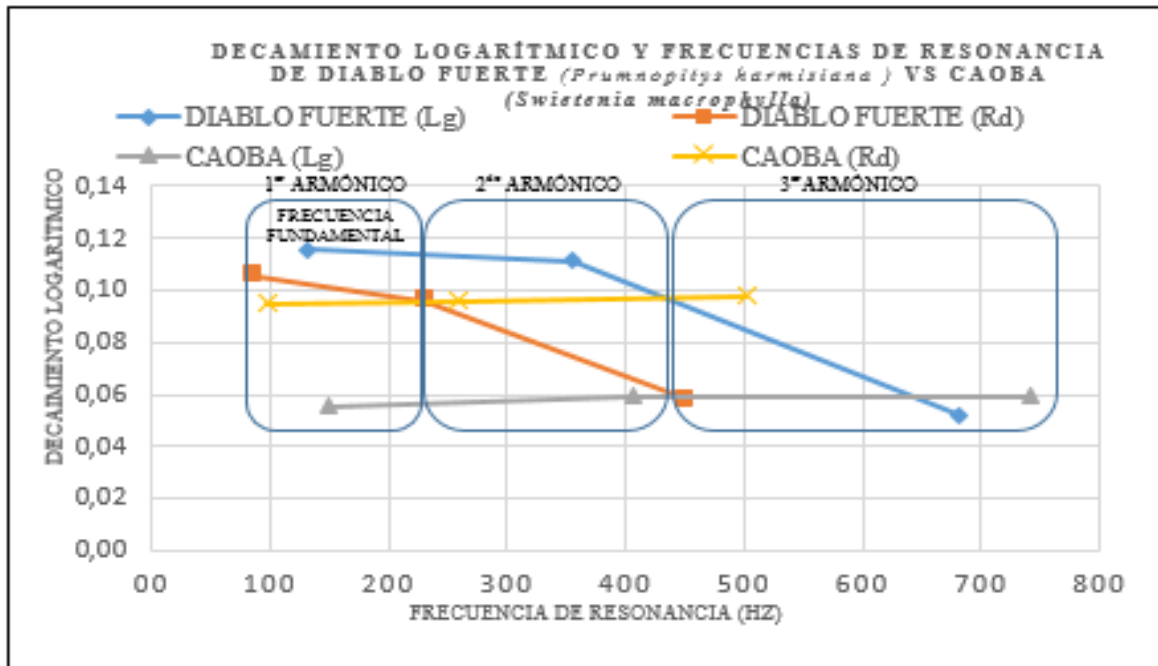
Anexo 8: Relaciones entre decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia Fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales: 1. cedro (*Cedrela odorata*), 2. diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*), 3. dialium (*Dialium guianense*), 4. estoraque (*Myroxylon balsamum*), 5. palisandro (*Dalbergia latifolia*), 6. shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), 7. spruce (*Picea engelmannii*) y 8. ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*).

1. CEDRO (*Cedrela odorata*)



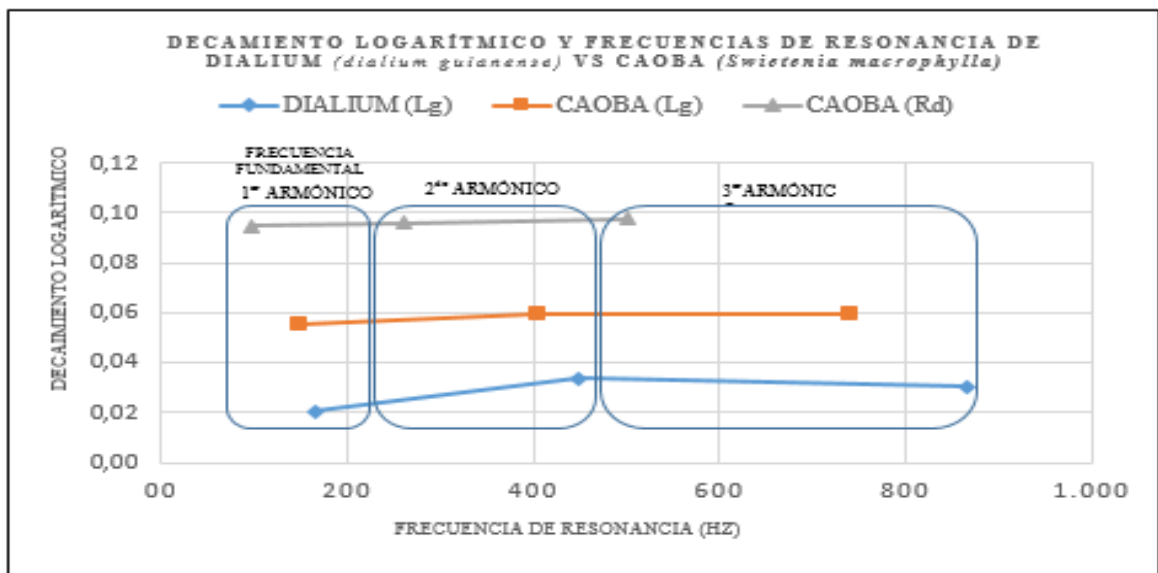
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales de cedro (*Cedrela odorata*) y en muestras longitudinales y radiales de caoba (*Swietenia macrophylla*).

2. DIABLO FUERTE (*Prumnopitys harmisiana*)



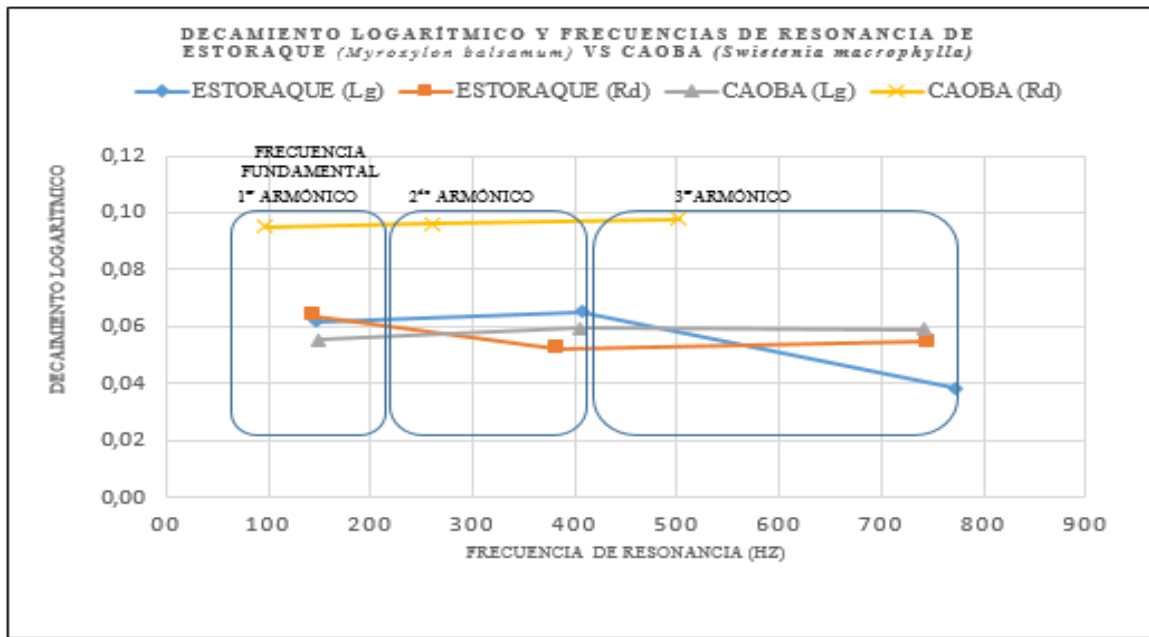
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

3. DIALIUM (*Dialium guianense*)



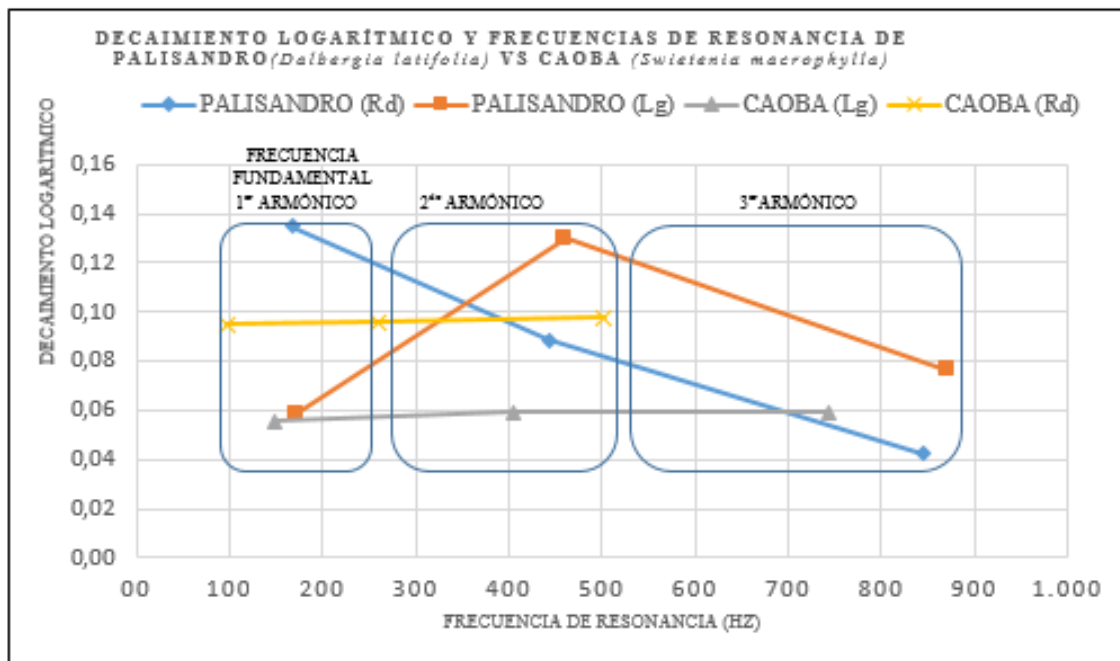
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales de dialium (*Dialium guianense*) y en muestras longitudinales y radiales de caoba (*Swietenia macrophylla*).

4. ESTORAQUE (*Myroxylon balsamum*)



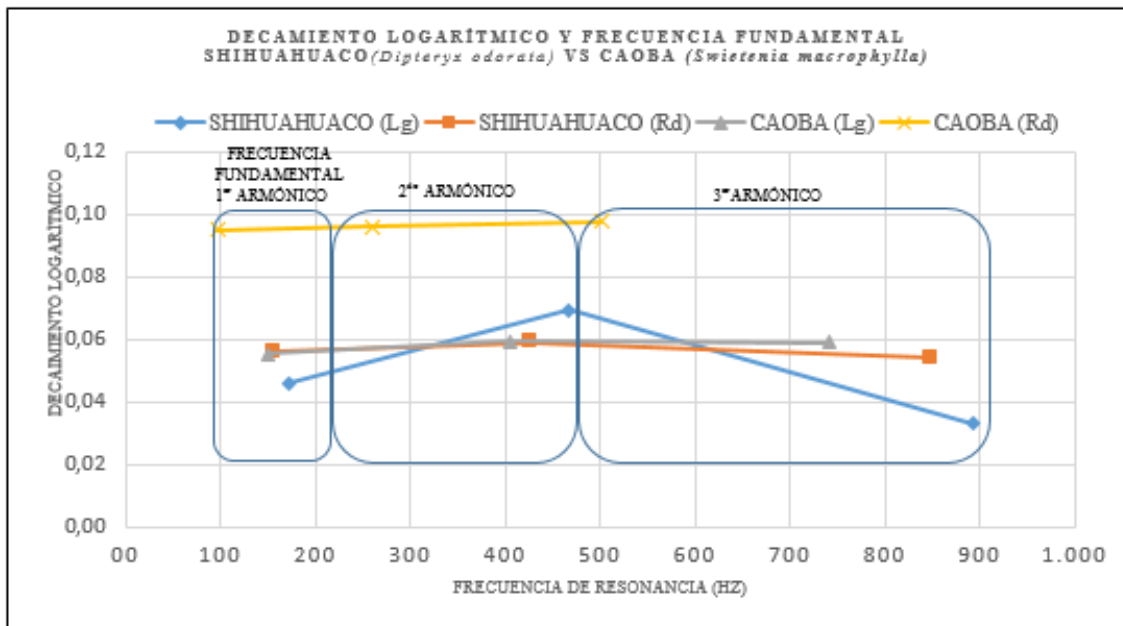
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de estoraque (*Myroxylon balsamum*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

5. PALISANDRO (*Dalbergia latifolia*)



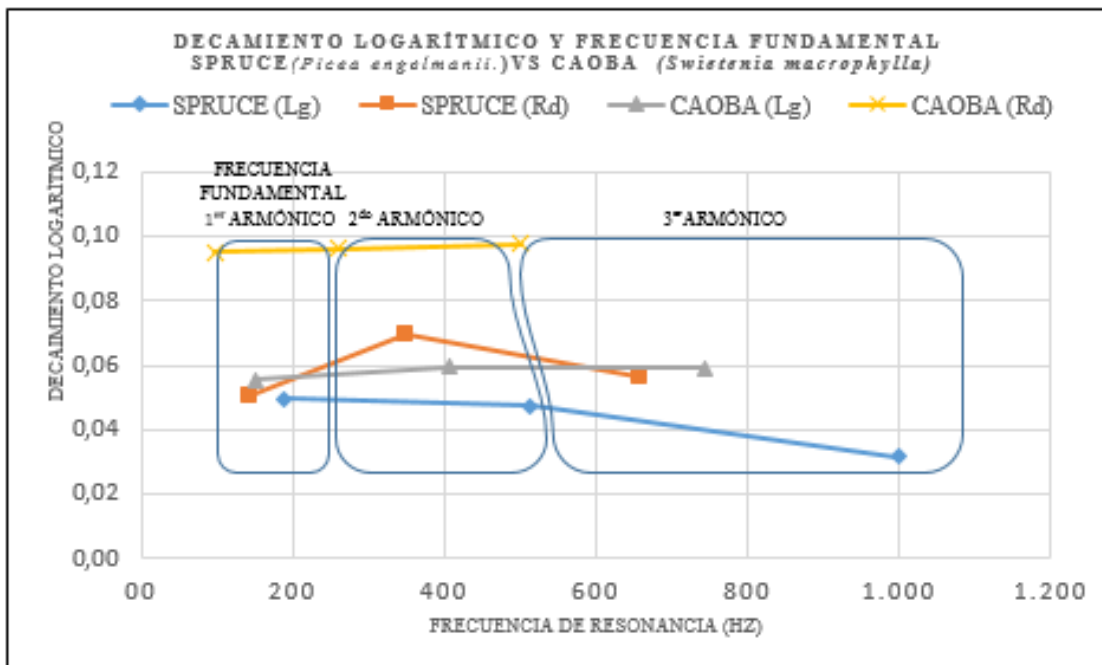
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de palisandro (*Dalbergia latifolia*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

6. SHIHUAHUACO (*Dipteryx odorata*)



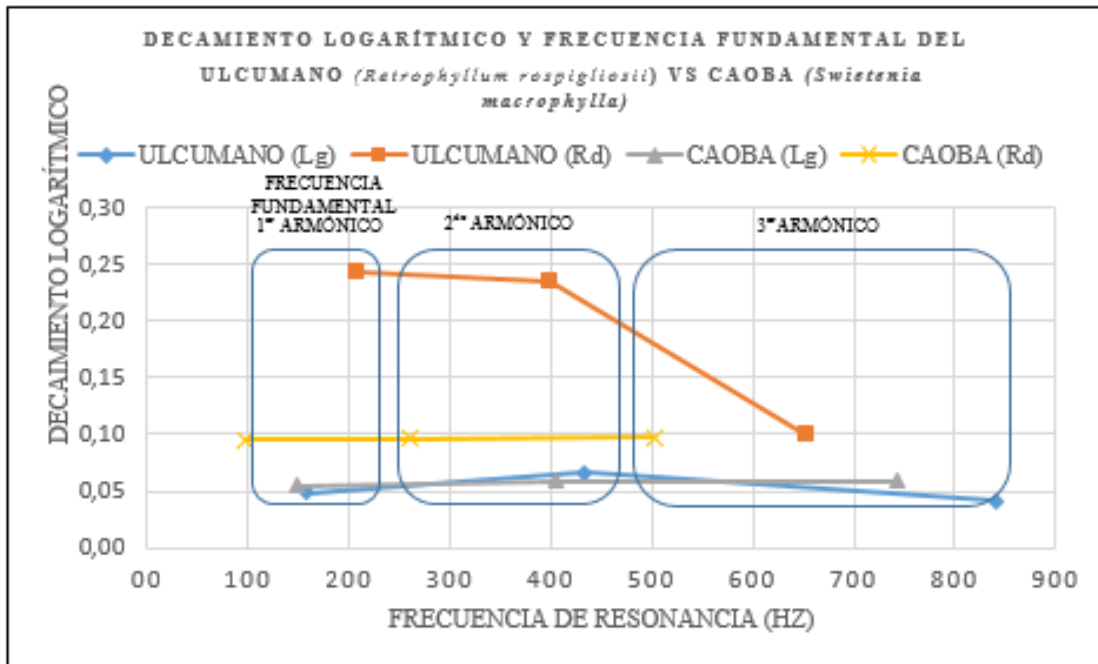
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de shihuahuaco (*Dipteryx odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*)

7. SPRUCE (*Picea engelmannii*)



Decaimientos Logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de spruce (*Picea engelmannii*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

8. ULCUMANO (*Retrophyllum rospigliosii*.)



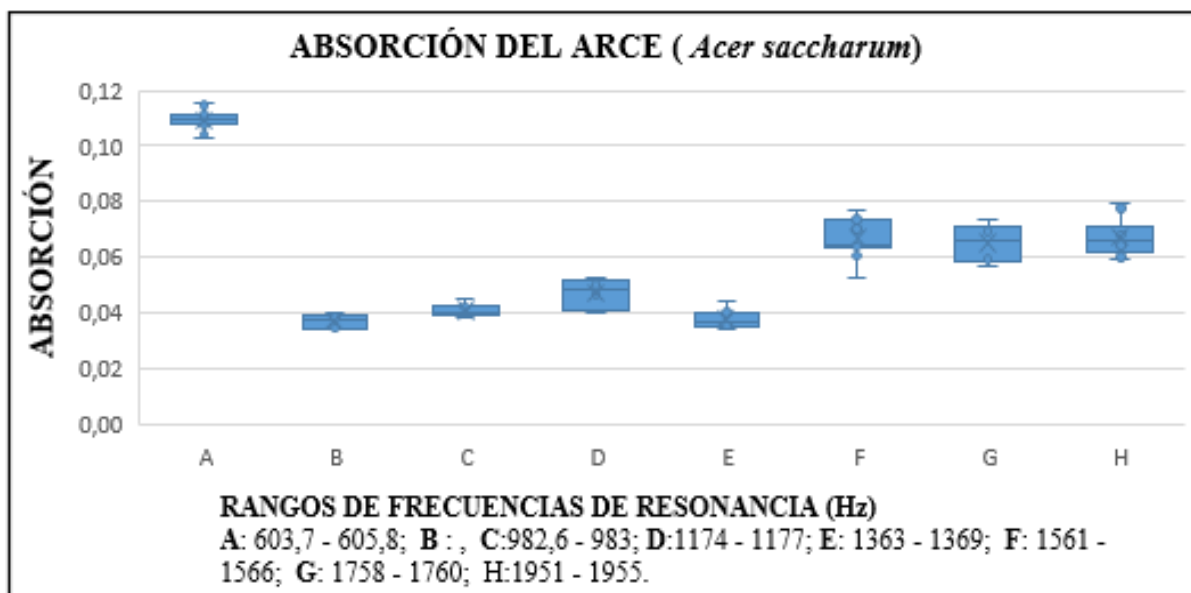
Decaimientos logarítmicos y frecuencias de resonancia: Frecuencia fundamental (1^{er} armónico), 2^o y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales de ulcumano (*retrophyllum rospigliosii*) y caoba (*Swietenia macrophylla*)

Anexo 9: Coeficiente de variación del coeficiente de absorción por rangos de frecuencias de resonancia: a. arce (*Acer saccharum*), b. caoba (*Swietenia macrophylla*), c. cedro (*Cedrela odorata*), d. diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*), e. dialium (*Dialium guianense*), f. estoraque (*Myroxylon balsamum*), g. nogal (*Juglans sp.*), h. palisandro (*Dalbergia latifolia*), i. palisangre (*Brosimum rubescens*), j. palo azufre (*Symphonia globulifera*), k. shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), l. spruce (*Picea engelmannii*), m. ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*).

a. ARCE (*Acer saccharum*)

Coeficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el arce (*Acer saccharum*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF ABSORCIÓN	DESDEV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
ARCE (<i>Acer saccharum</i>)	603,3 - 605,8	0,109	0,004	3,41
	792,2 - 793,3	0,037	0,002	6,57
	982,6 - 983	0,041	0,002	5,50
	1173 - 1177	0,047	0,005	10,51
	1363 - 1369	0,038	0,003	8,87
	1561 - 1566	0,067	0,007	10,84
	1758 - 1760	0,065	0,007	10,38
	1951 - 1955	0,068	0,007	9,84

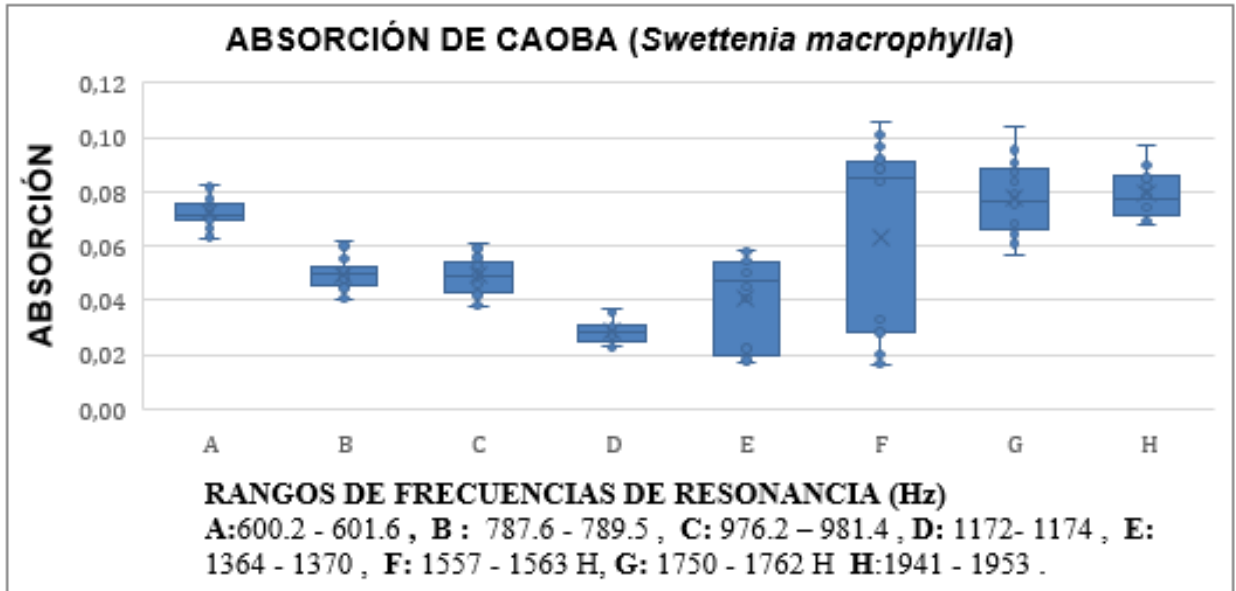


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en arce (*Acer saccharum*).

b. CAOBA (*Swietenia macrophylla*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para la caoba (*Swietenia macrophylla*).

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF. ABSORCIÓN N	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
CAOBA (<i>Swietenia macrophylla</i>)	600,2 – 601,6	0,072	0,0048	6,71
	787,6 – 789,5	0,049	0,0046	9,2
	976,2 – 981,4	0,048	0,0043	8,88
	1172- 1174	0,029	0,0030	10,48
	1364 - 1370	0,019	0,0013	6,54
	1557 - 1563	0,033	0,0032	9,41
	1750 - 1762	0,084	0,0064	7,89
	1941 - 1953	0,076	0,0073	9,50

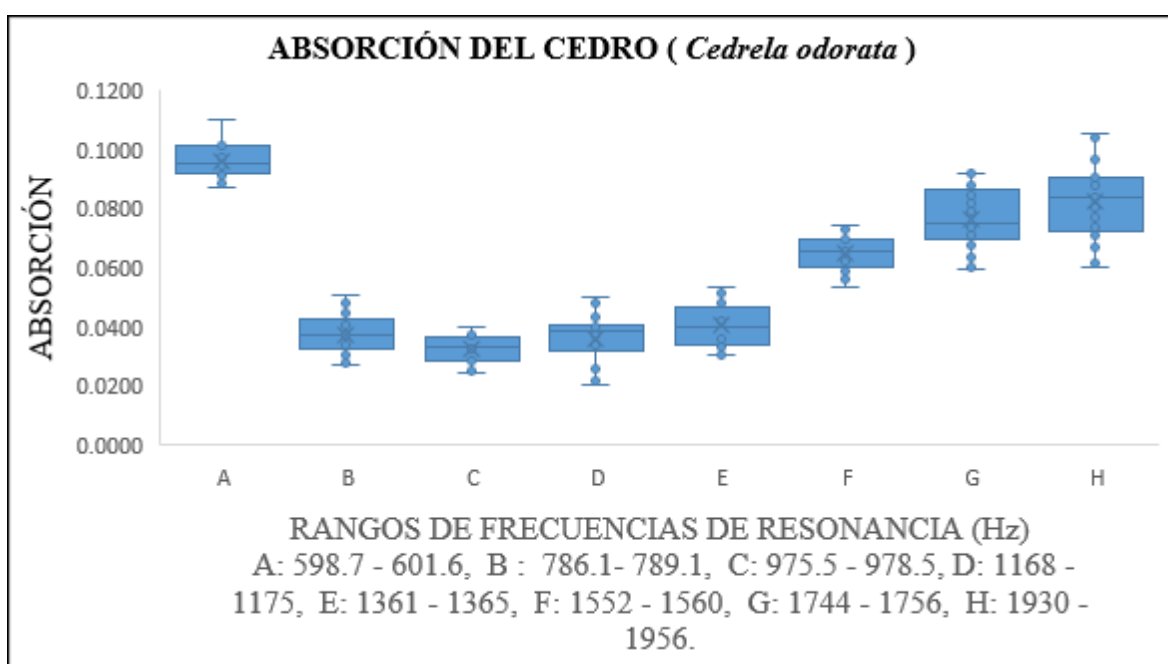


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en caoba (*Swietenia macrophylla*).

c. **CEDRO** (*Cedrela odorata*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el cedro (*Cedrela odorata*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz.)	PROMEDIOS		
		COEF. ABSORCIÓN N	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
CEDRO (<i>Cedrela odorata</i>)	598,7 – 601,6	0,096	0,0048	4,95
	786,1- 789,1	0,037	0,0034	9,1
	975,5 – 978,5	0,032	0,003	9,33
	1168 - 1175	0,035	0,0030	8,48
	1361 - 1365	0,039	0,0038	9,88
	1552 - 1560	0,066	0,0063	9,57
	1744 - 1756	0,077	0,0078	10,17
	1930 - 1956	0,083	0,0081	9,91

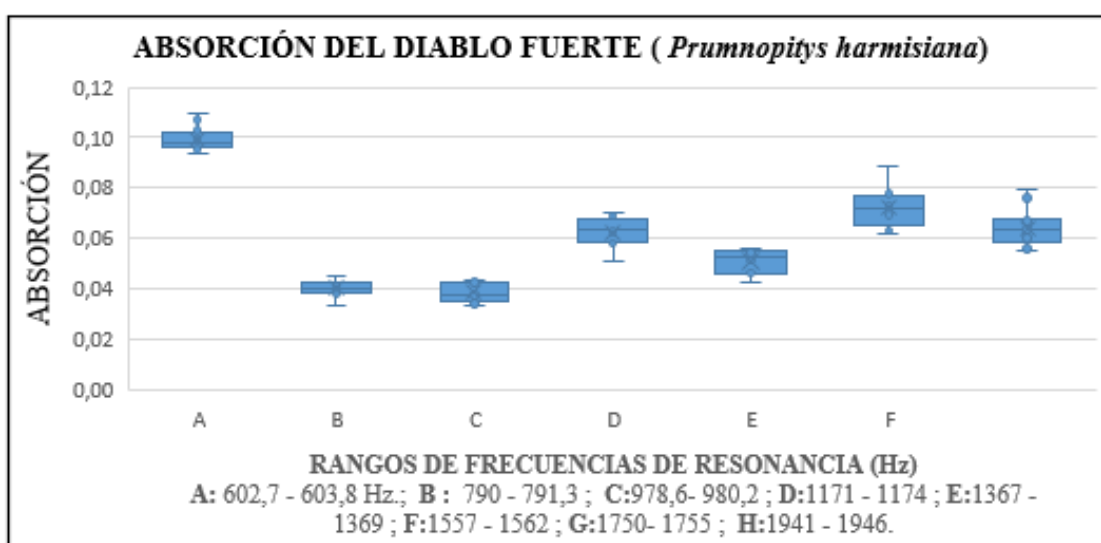


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en cedro (*cedrela odorata*).

d. DIABLO FUERTE (*Prumnopitys harmisiana*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*).

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz).	PROMEDIO		
		COEF. ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
DIABLO FUERTE (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	602,7 - 603,8	0,099	0,005	4,740
	790 - 791,3	0,040	0,003	8,396
	978,6- 979,7	0,038	0,004	9,915
	1171 - 1174	0,062	0,006	10,249
	597,3 - 605,6	0,051	0,005	10,350
	1557 - 1560	0,072	0,008	10,773
	1750- 1755	0,060	0,003	5,643
	1941 - 1948	0,070	0,007	9,710

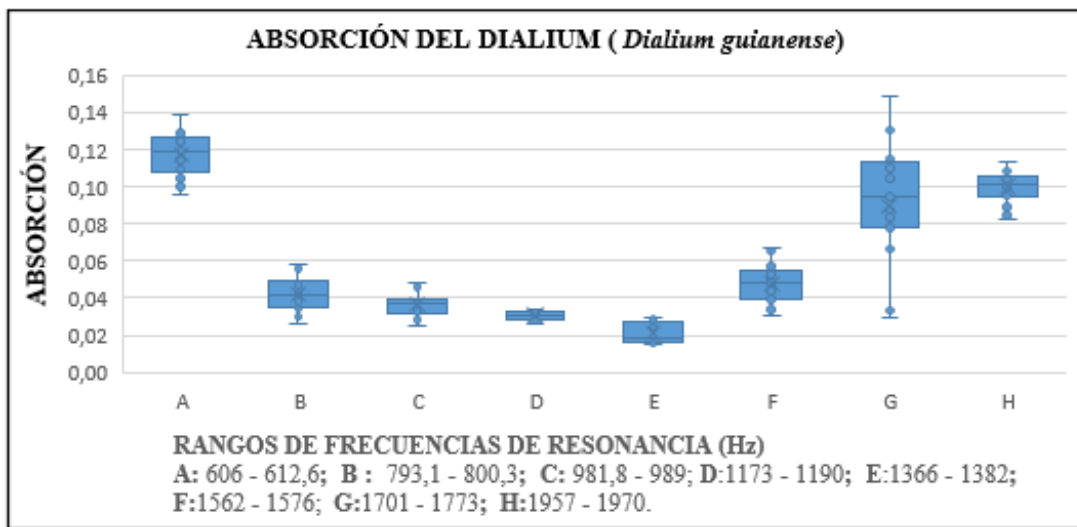


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*).

e. **DIALIUM** (*Dialium guianense*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el dialium (*Dialium guianense*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz.)	PROMEDIO		
		COEF. ABSORCIÓN	DESV. ESTÁNDAR	COEF. VARIACIÓN
DIALIUM (<i>Dialium guianense</i>)	602,7 – 603,8	0,099	0,0047	4,74
	793,1 – 800,3	0,040	0,0039	9,7
	981,8 - 989	0,036	0,0034	9,54
	1173 - 1190	0,031	0,0027	8,19
	1366 - 1382	0,020	0,0019	9,37
	1562 - 1576	0,046	0,0045	9,59
	1701 - 1773	0,079	0,0084	10,38
	1955- 1970	0,101	0,0092	9,15

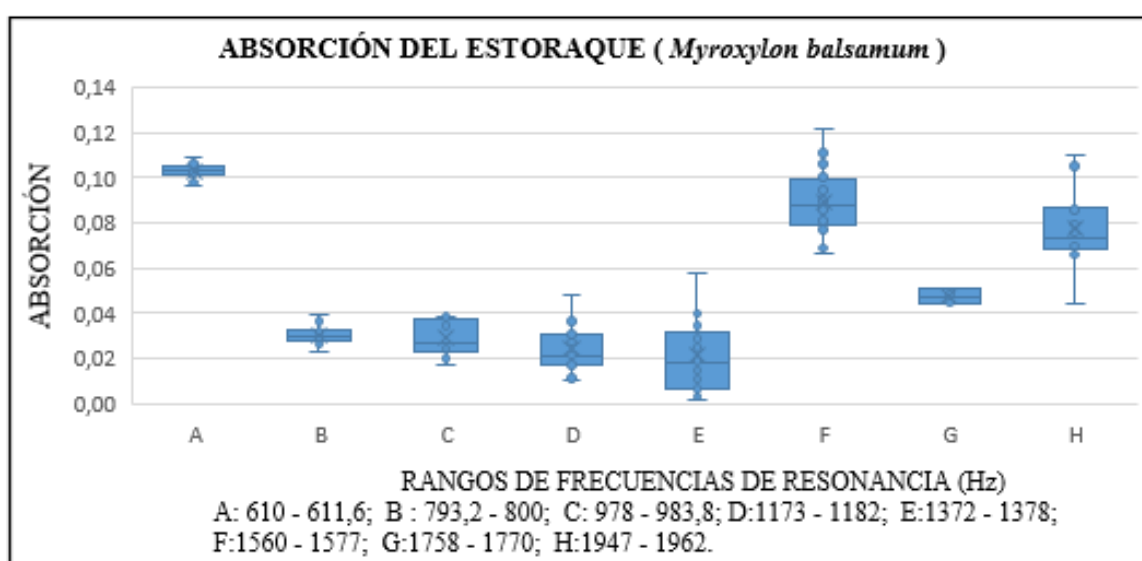


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en dialium (*Dialium guianense*).

f. ESTORAQUE (*Myroxylon balsamum*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el estoraque (*Myroxylon balsamum*)

ESPECIE	MUESTRA	N° DATOS CV	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
				COEF. ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
ESTORAQUE (<i>Myroxylon balsamum</i>)	1A	12	610 - 611,5	0,103	0,004	3,47
		10	793,5 - 800	0,030	0,003	10,02
		5	978 - 983,8	0,037	0,002	4,87
		5	1173 - 1182	0,019	0,002	9,74
		4	1372 - 1378	0,031	0,002	7,67
		20	1560 - 1577	0,084	0,008	9,12
		7	1758 - 1770	0,047	0,003	6,30
		9	1947 - 1962	0,075	0,008	10,45

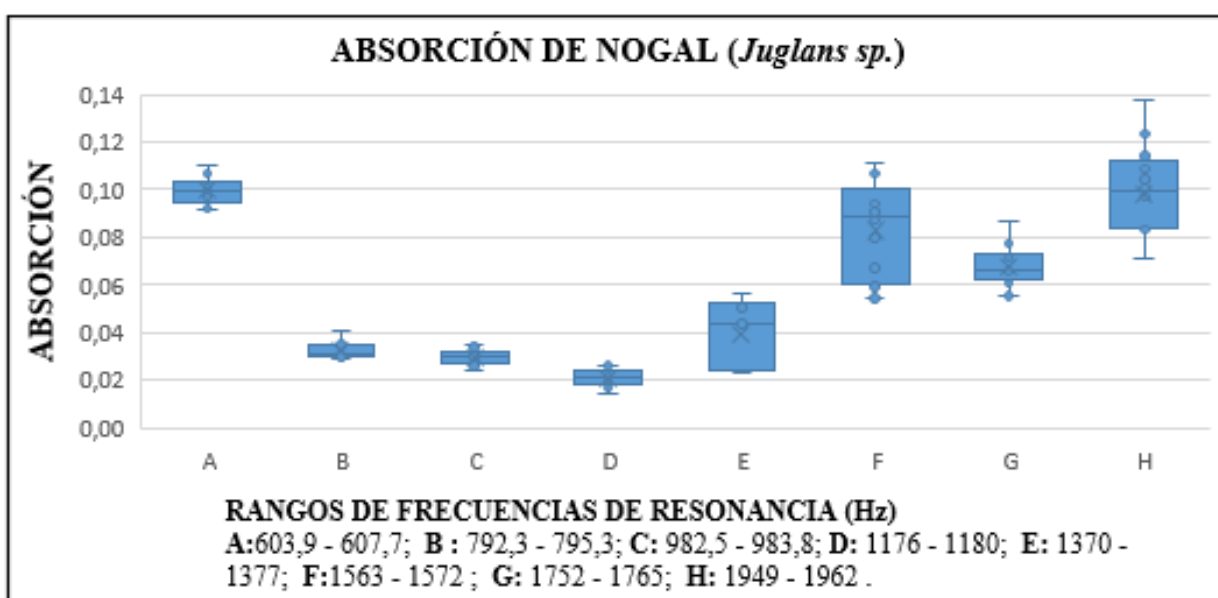


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en estoraque (*Myroxylon balsamum*).

g. NOGAL (*Juglans sp.*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el nogal (*Juglans sp.*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF. ABSORCION	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
NOGAL (<i>Juglans sp.</i>)	603,9 – 607,7	0,100	0,0037	3,73
	792,3 – 795,3	0,032	0,003	9,39
	982,5 – 983,8	0,030	0,0031	10,47
	1176 - 1180	0,020	0,0021	10,25
	1370 - 1377	0,038	0,0030	8,26
	1563 - 1572	0,078	0,008	9,96
	1752 - 1765	0,067	0,0070	10,32
	1949 - 1977	0,094	0,0070	7,61

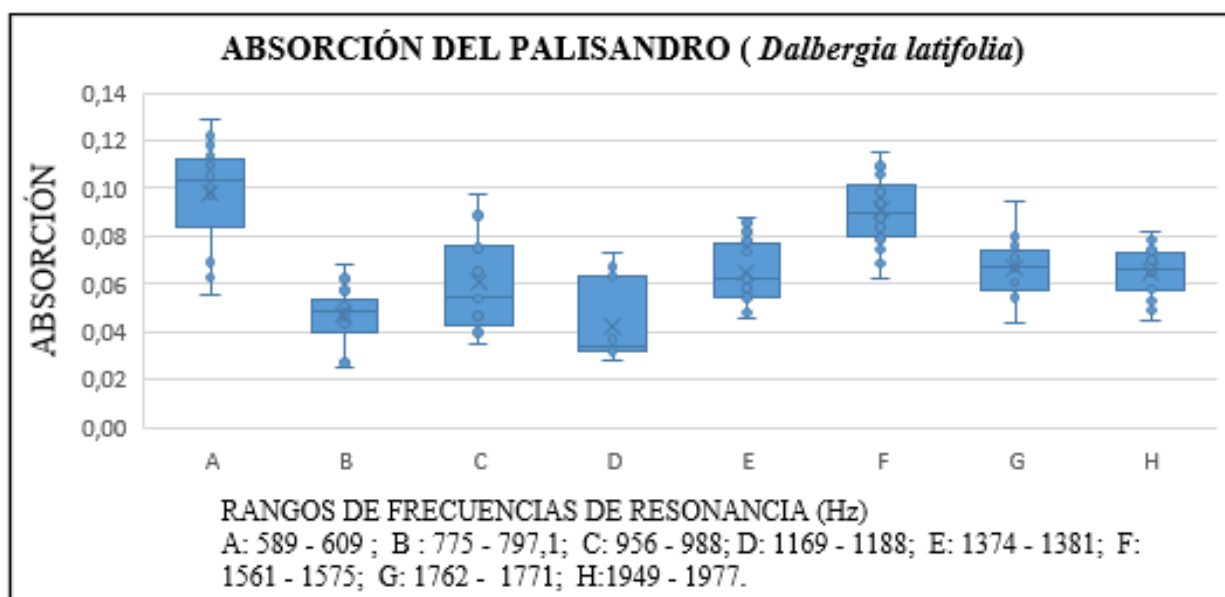


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en nogal (*Juglans sp.*).

h. PALISANDRO (*Dalbergia latifolia*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el palisandro (*Dalbergia latifolia*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIO		
		COEF. ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
PALISANDRO (<i>Dalbergia latifolia</i>)	589 - 609	0,094	0,0069	7,43
	775 - 797,1	0,046	0,0035	7,8
	956 - 995	0,060	0,0059	9,43
	1169 - 1188	0,045	0,0039	9,23
	1374 - 1381	0,063	0,0053	8,74
	1561 - 1575	0,089	0,010	12,29
	1762 - 1771	0,069	0,0051	7,57
	1949 - 1977	0,064	0,0066	10,33

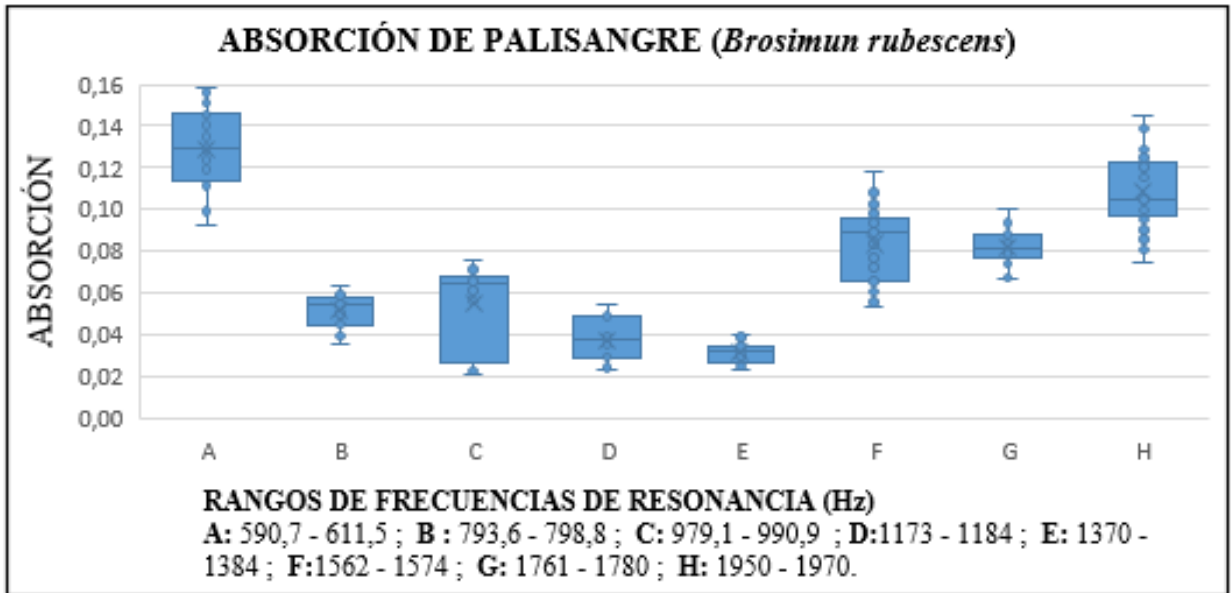


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en palisandro (*Dalbergia latifolia*).

i. **PALISANGRE** (*Brosimun rubescens*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el palisangre (*Brosimun rubescens*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF, ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
PALISANGRE (<i>Brosimun rubescens</i>)	590,7 - 611,5	0,094	0,0069	7,43
	793,6 - 798,8	0,052	0,0037	7,1
	979,1 - 990,9	0,052	0,0046	8,71
	1173 - 1184	0,036	0,0039	10,42
	1370 - 1384	0,030	0,0025	8,23
	1562 - 1574	0,084	0,009	10,06
	1761 - 1780	0,083	0,0080	9,67
	1950 - 1970	0,109	0,0089	8,41

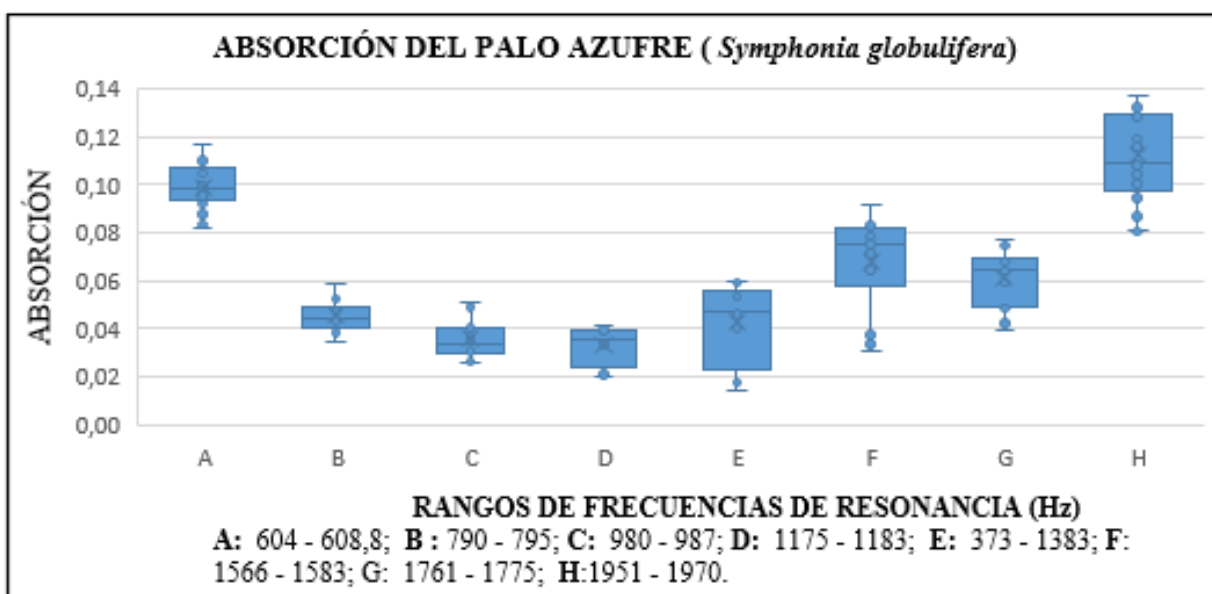


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en palisangre (*Brosimun rubescens*)

j. **PALO AZUFRE** (*Symphonia globulifera*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el palo azufre (*Symphonia globulifera*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF, ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
PALO AZUFRE (<i>Symphonia globulifera</i>)	604 – 608,8	0,100	0,0081	8,19
	790 – 795	0,045	0,0045	9,9
	980 - 987	0,037	0,0038	9,92
	1175 - 1183	0,029	0,0018	5,26
	1373 - 1383	0,038	0,0038	10,07
	1566 - 1583	0,063	0,0061	9,40
	1761- 1775	0,060	0,0047	7,87
	1951 - 1970	0,112	0,0074	7,10

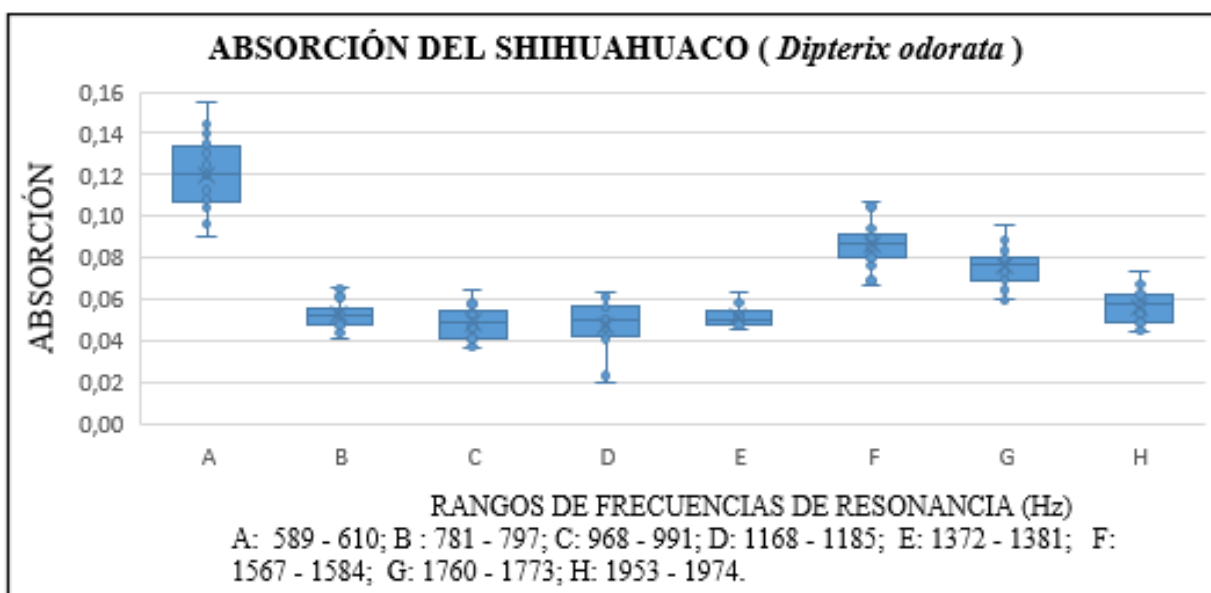


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en palo azufre (*Symphonia globulifera*).

k. **SHIHUAHUACO** (*Dipteryx odorata*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el shihuahuaco (*Dipteryx odorata*).

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF, ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
SHIHUAHUACO (<i>Dipteryx odorata</i>)	589 - 610	0,117	0,012	10,00
	781 - 797	0,055	0,0050	9,2
	968 - 991	0,048	0,0045	9,26
	1168 - 1185	0,041	0,0041	9,37
	1372 - 1381	0,052	0,0040	7,48
	1567 - 1584	0,085	0,008	9,55
	1760 - 1773	0,077	0,0061	8,04
	1953 - 1974	0,057	0,0053	9,69

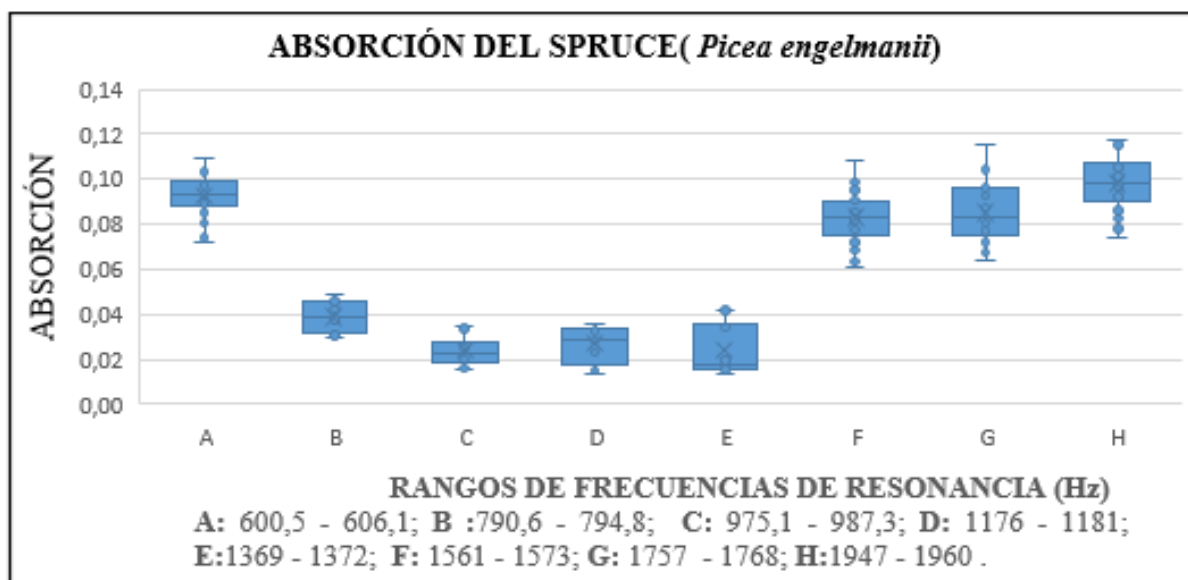


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en shihuahuaco (*Dipteryx odorata*).

1. **SPRUCE** (*Picea engelmannii*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el spruce (*Picea engelmannii*)

ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF, ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
SPRUCE (<i>Picea engelmannii</i>),	598,8 – 606,1	0,091	0,0074	8,38
	790,6 – 794,8	0,039	0,0024	5,8
	975,1 – 987,3	0,025	0,0016	7,29
	1176 - 1181	0,023	0,0021	8,49
	1369 - 1372	0,027	0,0029	10,43
	1561 - 1573	0,085	0,0085	10,16
	1757- 1768	0,083	0,0083	10,22
	1947 - 1960	0,094	0,0092	9,71

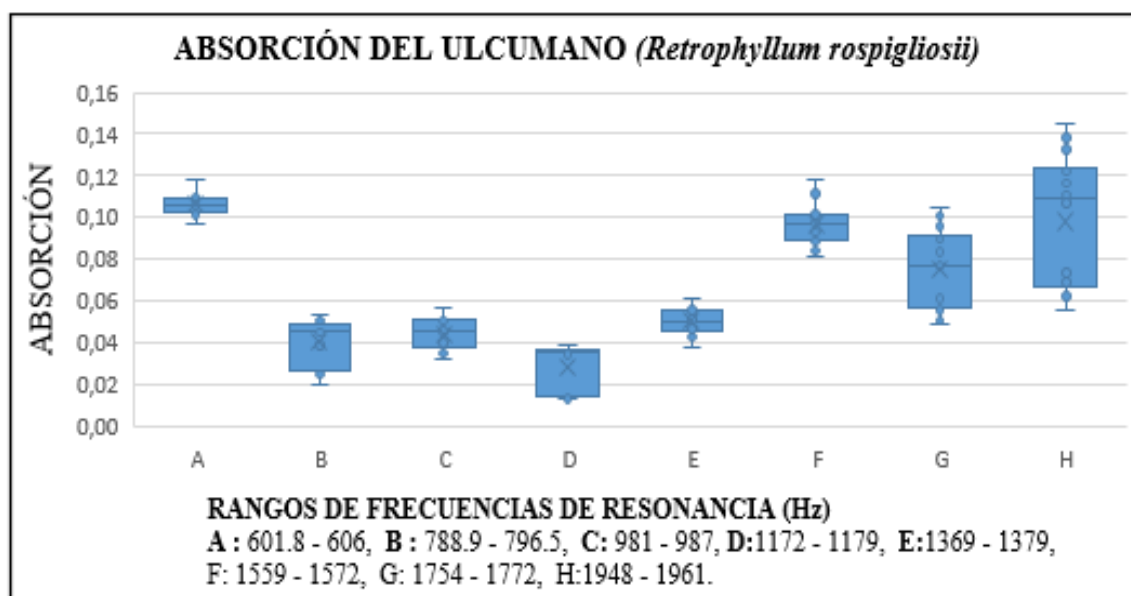


Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en spruce (*Picea engelmannii*).

m. ULCUMANO (*Retrophyllum rospigliosii*)

Coefficiente de variación por rangos de frecuencias de resonancia para el ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*).

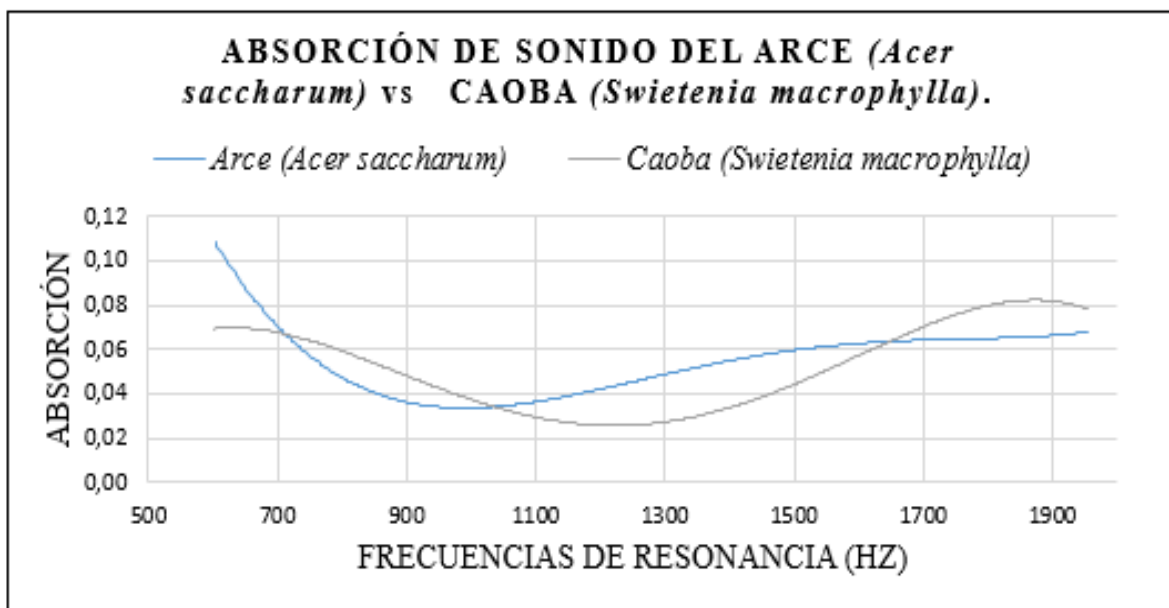
ESPECIE	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	PROMEDIOS		
		COEF, ABSORCIÓN	DESV ESTÁNDAR	COEF VARIACIÓN
ULCUMANO (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	505,5 - 606	0,109	0,0084	7,38
	788,9 - 796,5	0,036	0,0036	9,6
	981 - 987	0,042	0,004	9,49
	1172 - 1179	0,025	0,0014	7,15
	1369 - 1379	0,050	0,0054	10,07
	1559 - 1572	0,096	0,010	10,81
	1754 - 1772	0,072	0,0078	10,63
	1948 - 1961	0,094	0,0099	10,47



Diagramas de cajas de las mediciones de absorción de sonido por rangos de frecuencias de resonancia en ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*).

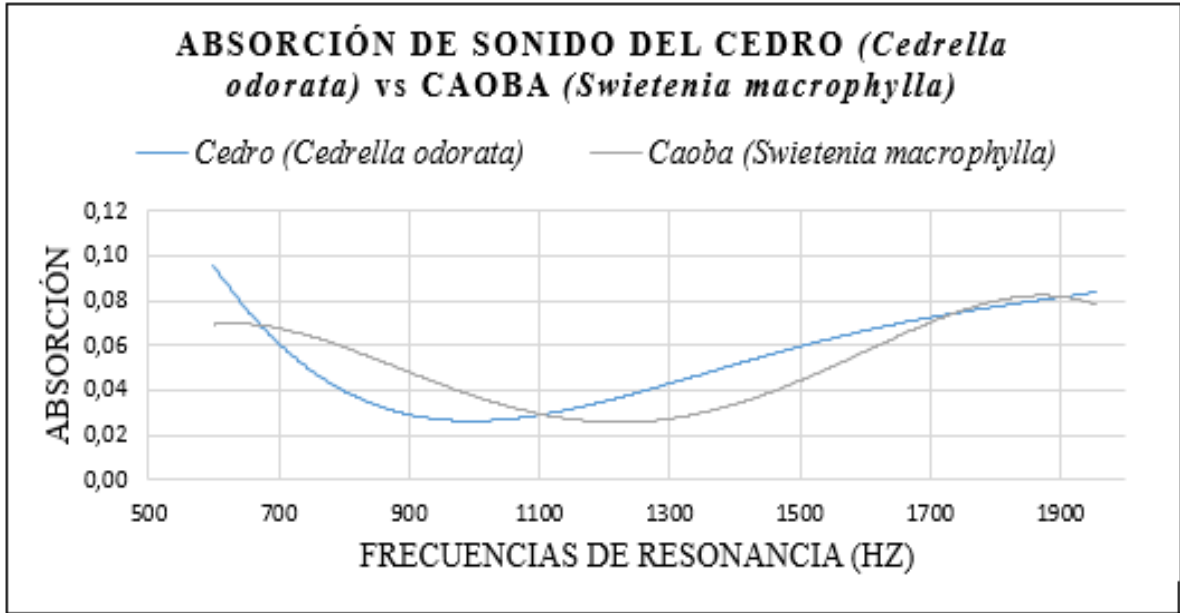
Anexo 10: Curvas de absorción de sonido de las especies estudiadas comparadas con la caoba: a. arce (*Acer saccharum*), b. cedro (*Cedrela odorata*), c. diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*), d. dialium (*Dialium guianense*), e. estoraque (*Myroxylon balsamum*), f. nogal (*Juglans sp.*), g. palisandro (*Dalbergia latifolia*), h. palisangre (*Brosimum rubescens*), i. palo azufre (*Symphonia globulifera*), j. shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), k. spruce (*Picea engelmannii*), l. ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*).

a. ARCE (*Acer saccharum*)



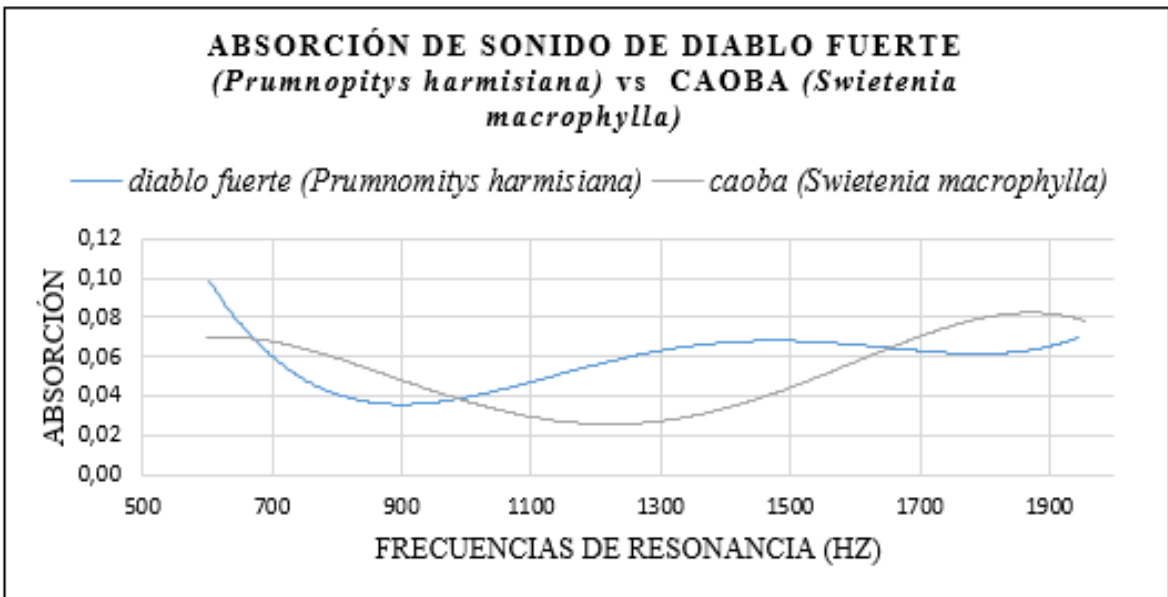
Curva de absorción del arce (*Acer saccharum*) en el rango de frecuencias de 604a 1955 Hz. y curva de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

b. CEDRO (*Cedrela odorata*)



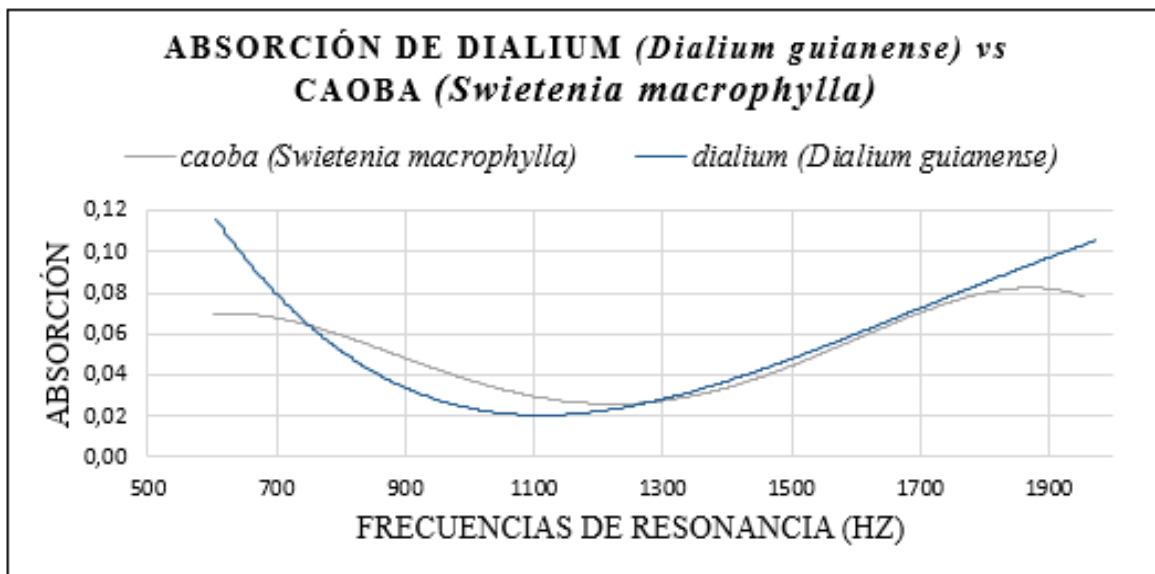
Curva de absorción del cedro (*cedrella odorata*) en el rango de frecuencias de resonancia 598,7 – 1956 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

c. DIABLO FUERTE (*Prumnopitys harmisiana*)



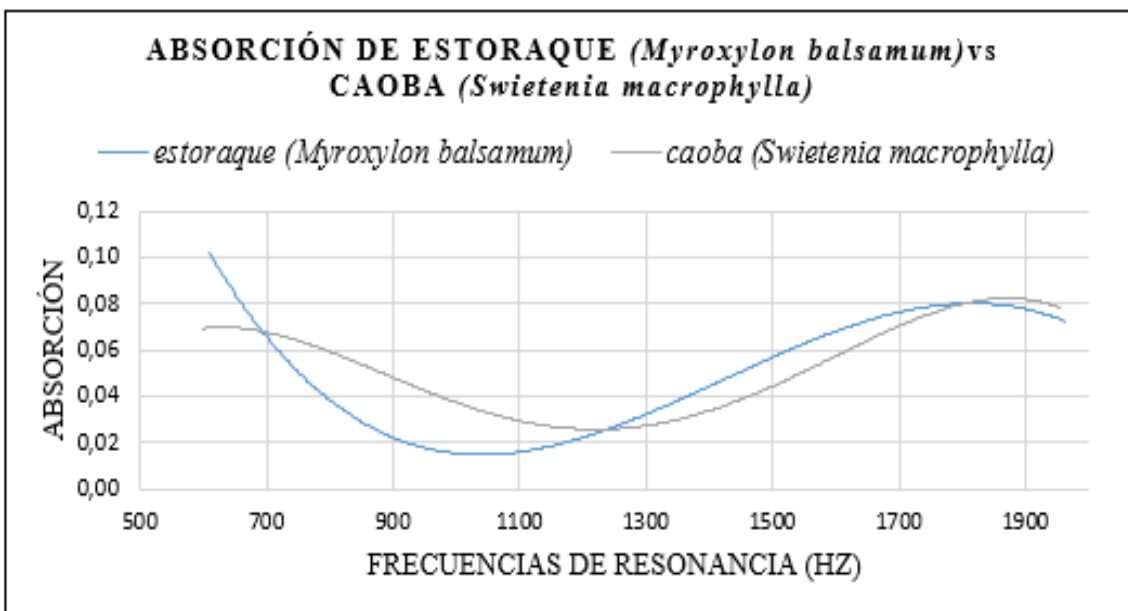
Curva de absorción del diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*) en el rango de frecuencias de resonancia 602,7 – 1948 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

d. **DIALIUM** (*Dialium guianense*,)



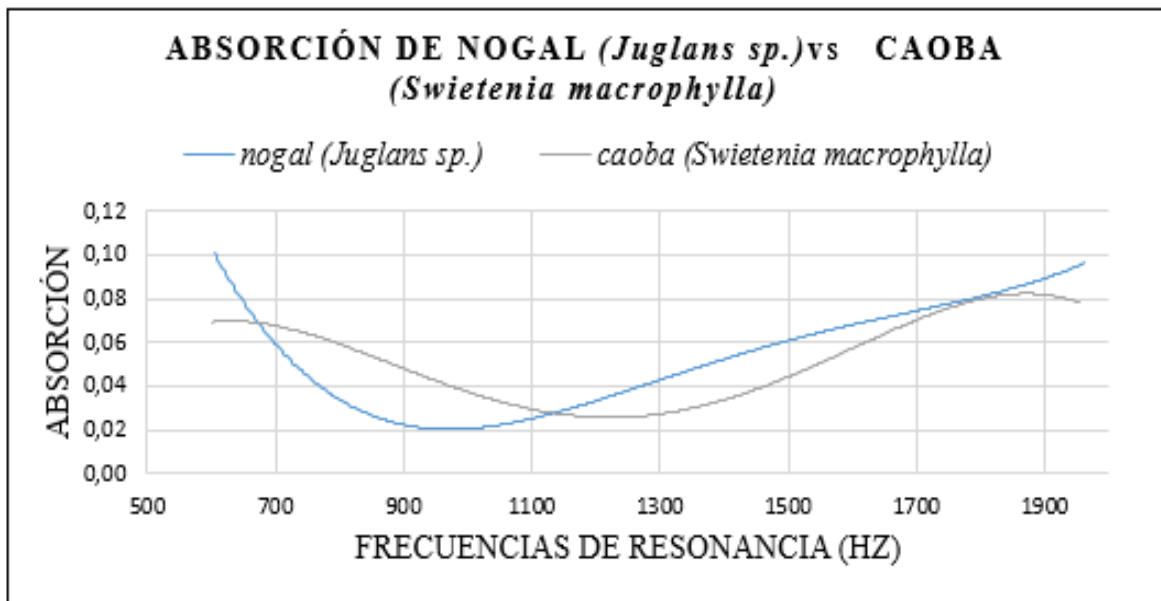
Curva de absorción del dialium (*Dialium guianense*) en el rango de frecuencias de resonancia 606 – 1970 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

e. **ESTORAQUE** (*Myroxylon balsamum*)



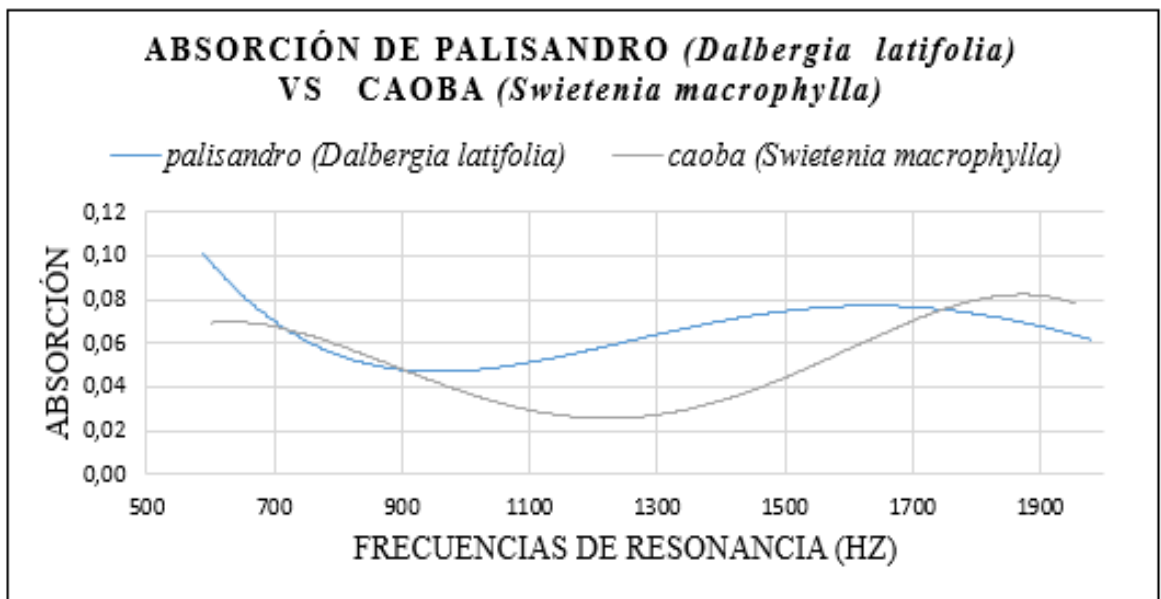
Curva de absorción del estoraque (*Myroxylon balsamum*) para el rango de frecuencias de resonancia de 610 a 1962 Hz, y curva de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

f. **NOGAL** (*Juglans sp.*)



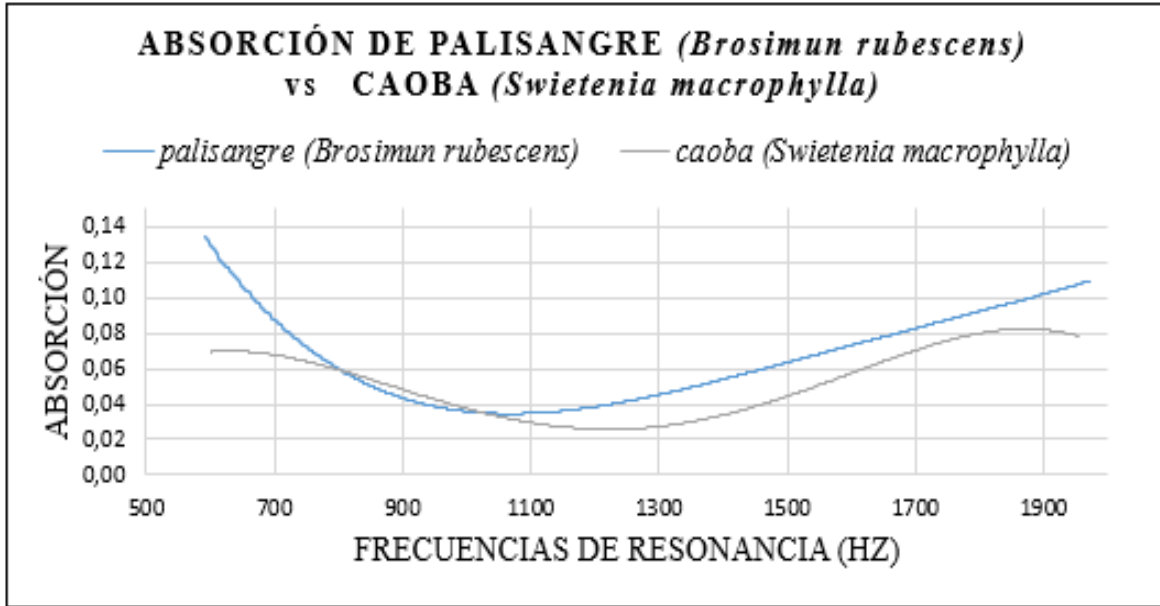
Curva de absorción del nogal (*Juglans sp.*) para el rango de frecuencias de resonancia de 603,9 a 1962 Hz, y curva de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

g. **PALISANDRO** (*Dalbergia latifolia*)



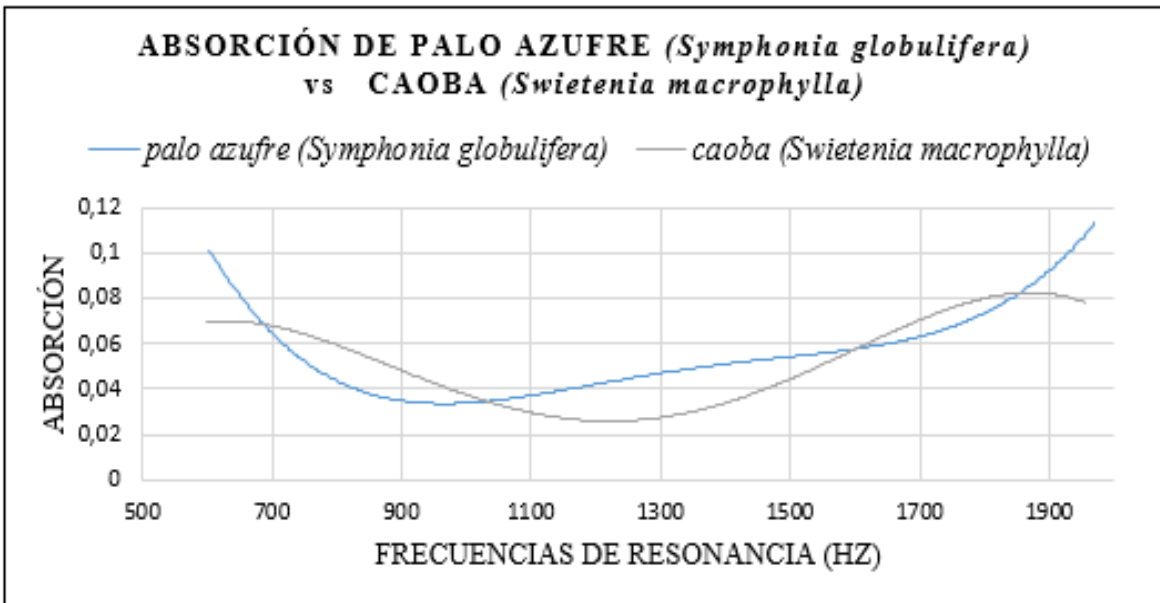
Curva de absorción del palisandro (*Dalbergia latifolia*) en el rango de frecuencias de resonancia 589– 1977 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

h. PALISANGRE (*Brosimun rubescens*)



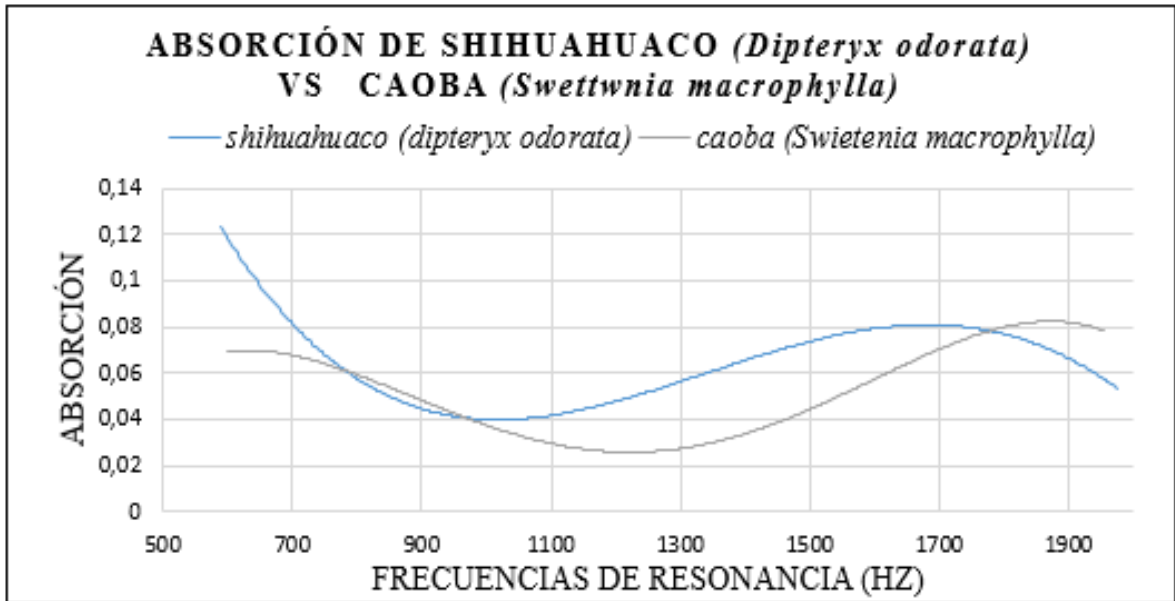
Curva de absorción del palisangre (*Brosimun rubescens*) en el rango de frecuencias de resonancia 590,7– 1970 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

i. PALO AZUFRE (*Symphonia globulifera*)



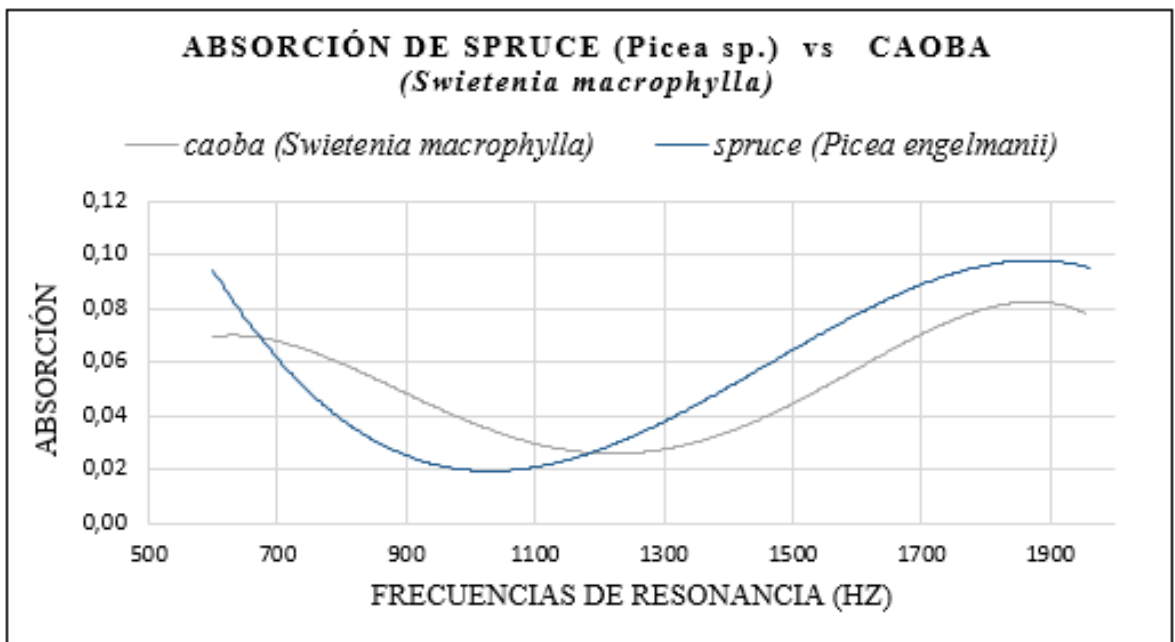
Curva de absorción del palo azufre (*Symphonia globulifera*) en el rango de frecuencias de resonancia 604– 1970 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

j. SHIHUAHUACO (*Dipteryx odorata*)



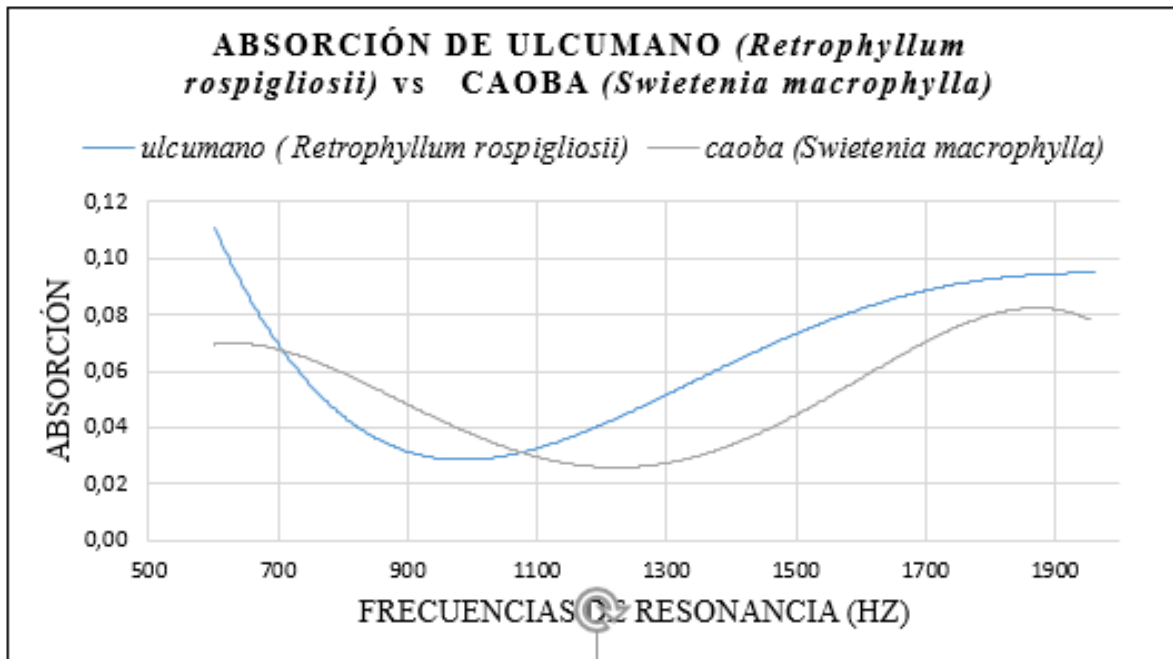
Curva de absorción del shihuahuaco (*Dypteryx odorata*) en el rango de frecuencias de resonancia 589– 1974 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

k. SPRUCE (*Picea engelmannii*)



Curva de absorción del spruce (*Picea engelmannii*) en el rango de frecuencias de resonancia 600,5 – 1960 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.

1. ULCUMANO (*Retrophyllum rospigliosii*)



Curva de absorción del ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*) en el rango de frecuencias de resonancia 601,8–1961 Hz. y curva de absorción de caoba (*Swietenia macrophylla*) en el rango de frecuencias de resonancia: 600 – 1953 Hz.