



AValiação das Propriedades Tecnológicas de Madeiras Amazônicas como Indicadores para Uso na Manufatura de Instrumentos Musicais de Cordas

Ana Julia de O. Godoy^{1*}; Claudete C. do Nascimento²; Roberto D. de Araújo²; Irineide de A. Cruz²; Gean dos S. Dantas³ e Cristiano S. do Nascimento⁴

*ajdog.eng23@uea.edu.br

¹ Prog. Inst. de Bolsa de Iniciação Científica, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil

² Lab. de Engenharia e Artefatos de Madeira, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil

³ Puro Amazonas, Manaus, Brasil

⁴ PPG Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Brasil

RESUMO

O estudo investigou as propriedades tecnológicas de madeiras para avaliar seu potencial na manufatura de instrumentos musicais. Foram analisadas as propriedades anatômicas (porosidade, diâmetro e frequência dos vasos), físico-mecânicas (densidade básica, umidade, módulo de elasticidade e ruptura, e dureza Janka), químicas (extrativos totais, lignina, holocelulose e resíduo mineral fixo) e desempenho acústico, representado pelo índice de performance (IP) de seis espécies amazônicas. As madeiras de marupá (*Simarouba amara*) e morototó (*Didymopanax morototoni*) apresentaram alto IP, baixa densidade e alta porosidade, sendo indicadas para tampos e fundos de instrumentos musicais devido à leveza e boa vibração sonora. Por outro lado, madeiras como cumaru (*Dipteryx odorata*), macacaúba (*Platymiscium ulei*) e angelim-rajado (*Pithecellobium racemosum*), com alta densidade e resistência mecânica, são mais adequadas para componentes estruturais, como laterais e braços. Este estudo reforça a importância de práticas de manejo sustentável e inovação tecnológica para valorizar a biodiversidade amazônica e promover produtos de alto valor agregado.

Palavras-chave: Madeiras da Amazônia; propriedades acústicas, índice de performance; sustentabilidade.

ABSTRACT

The study investigated the technological properties of wood to evaluate its potential for the manufacture of musical instruments. Anatomical properties (porosity, vessel diameter, and frequency), physical-mechanical properties (basic density, moisture, modulus of elasticity and rupture, and Janka hardness), chemical properties (total extractives, lignin, holocellulose, and fixed mineral residue), and acoustic performance, represented by the performance index (PI), were analyzed for six Amazonian species. The woods of marupá (*Simarouba amara*) and morototó (*Didymopanax morototoni*) presented high PI, low density, and high porosity, making them suitable for soundboards and backs of musical instruments due to their lightness and good sound vibration. Conversely, woods such as cumaru (*Dipteryx odorata*), macacaúba (*Platymiscium ulei*), and angelim-rajado (*Pithecellobium racemosum*), with high density and mechanical strength, are more appropriate for structural components like sides and necks. This study highlights the importance of sustainable management practices and technological innovation to enhance the value of Amazonian biodiversity and promote high-value-added products.

Keywords: Amazonian woods; acoustic properties, performance index; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de madeira na produção de instrumentos musicais, particularmente instrumentos de corda, requer a seleção de materiais com propriedades tecnológicas distintas que afetam significativamente a qualidade do som, durabilidade e atratividade visual. A floresta amazônica, conhecida por sua biodiversidade, oferece uma variabilidade de espécies arbóreas que representam potencial para o desenvolvimento de produtos de alto valor agregado, como instrumentos musicais (Minato et al., 2010; Nascimento et al., 2019).

As propriedades tecnológicas da madeira, incluindo aspectos anatômicos, químicos, físicos e mecânicos, desempenham um papel central na determinação da qualidade dos produtos florestais. Em particular, o índice de performance (IP), que relaciona rigidez (E_{M0}) e densidade (ρ_{bas}), tem sido identificado como uma variável preditora crítica para a qualidade acústica da madeira. Estudos anteriores sugerem que diferentes constantes da madeira, como composição química e características anatômicas, podem influenciar significativamente a qualidade sonora (Longui et al., 2012; Bucur, 2023). A presença de extrativos, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade, pode impactar a densidade da madeira e reduzir a ressonância. Além disso, aspectos anatômicos como o diâmetro e a quantidade de vasos, bem como a orientação da grã, têm sido apontados, como fatores determinantes na produção de som em instrumentos de corda (Brémaud, 2012; Čulík et al., 2023).

Estudos clássicos e contemporâneos exploraram o potencial de madeiras tropicais para a manufatura de instrumentos musicais. Slooten e Souza (1987) e Nascimento et al. (2019) avaliaram madeiras amazônicas utilizando parâmetros como anatomia e propagação de ondas acústicas, destacando espécies como candidatas promissoras para a fabricação de violões. Outros estudos destacaram o uso de espécies tradicionais como nogueira e amoreira, que apresentam propriedades acústicas favoráveis para instrumentos musicais devido à sua ρ_{bas} , E_{M0} e ondas mecânicas de propagação (Roohnia et al., 2011; Zamaninasab et al., 2023).

A classificação da madeira com base em suas características anatômicas e tecnológicas também tem impacto direto na qualidade e no valor comercial dos instrumentos musicais produzidos, como demonstrado por Dinulică et al. (2021) e Mihălcică et al. (2022). Essa relação não apenas orienta a escolha de materiais, mas também promove uma valorização econômica de espécies tropicais, contribuindo para o desenvolvimento da regional de áreas pouco desenvolvidas.

A integração do conhecimento científico ao setor de manufatura é essencial para a inovação e a sustentabilidade, considerando as propriedades específicas das madeiras amazônicas como fatores determinantes para aplicações acústicas de alto desempenho. A presente pesquisa investiga o potencial acústico de diferentes espécies amazônicas, com o objetivo de fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos, alinhados às diretrizes de manejo sustentável (Freitas e Vasconcellos, 2019; Mania et al., 2019; Quintavalla et al., 2022). O estudo avaliou as propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas de seis espécies da região, correlacionando-as ao Índice de Propagação (IP), a fim

de identificar aquelas mais adequadas para a fabricação de instrumentos musicais. Adicionalmente, destaca-se a importância da utilização racional dos recursos florestais, com foco no aproveitamento eficiente de resíduos madeireiros e na otimização de processos industriais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo, amostras de madeira provenientes de lotes aleatórios foram doadas por empresas de madeira local (Amazonas, Brasil), e complementadas por indicações de luthiers da Puro Amazonas. As amostras foram fragmentadas e submetidas à identificação anatômica macroscópica, realizada pelo especialista J.A. Freitas no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras do COTEI/INPA. As espécies identificadas estão relacionadas na Tabela 1. Após a confirmação anatômica, corpos de prova com dimensões de 20 mm × 20 mm × 30 mm foram confeccionados (n = 10 para cada espécie). Em seguida, as amostras foram aclimatadas em condições controladas (20 ± 2 °C; UR 65 ± 5%) antes da obtenção de espectros na região do infravermelho próximo (NIR) das superfícies radial e tangencial. O material remanescente foi moído (Willey) e peneirado a 60 mesh para posterior quantificação de compostos químicos.

Tabela 1 – Madeiras selecionadas para o estudo

Espécies	Características gerais da madeira
Angelim-rajado <i>Pithecellobium racemosum</i> Ducke - Fabaceae)	Madeira de alta densidade (0,81 g/cm ³), com cerne castanho-amarelo-claro sobre um fundo amarelo-pardacento, caracterizado por longos veios de cor castanho-violáceo dispostos de forma irregular, o que proporciona um aspecto atrativo. A grã é reversa, e a textura varia de média a grosseira.
Cardeiro <i>Scleronema micranthum</i> (Ducke) Ducke – Malvaceae	Madeira de densidade moderada (0,59 g/cm ³), com cerne de tonalidade castanho-claro e aspecto lustroso. O alburno apresenta coloração amarelo-claro. A grã varia de direita a oblíqua, enquanto a textura é grossa.
Cumaru <i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) - Fabaceae	Madeira de alta densidade (0,97 g/cm ³), com cerne castanho-amarelado escuro, nitidamente diferenciado do alburno de tonalidade bege. Apresenta grã reversa, textura média, é insípida, inodora e possui brilho moderado.
Macacaúba <i>Platymiscium ulei</i> Harms - Fabaceae	Madeira de alta densidade (0,90 g/cm ³), com cerne de coloração castanho-claro, podendo apresentar tons avermelhados, veios escuros ou nuances arroxeadas ao longo das fibras. Possui grã reversa a irregular, textura média e uniforme, e ligeiramente áspera ao toque.
Marupá <i>Simarouba amara</i> Aubl. - Simaroubaceae	Madeira de baixa densidade (0,35 g/cm ³), com coloração de branco-palha ou branco com um leve tom rosado. Apresenta superfície lustrosa, moderadamente lisa ao tato, grã direita e textura média a grosseira.
Morototó <i>Didymopanax morototoni</i> (Aubl.) Decne. & Planch. - Araliaceae	Madeira de peso baixo a moderado (0,40 g/cm ³), com lenho entrelaçado em tonalidades de cinza e creme-claro, grã variando de direita a oblíqua, textura média, e sem cheiro ou gosto perceptíveis.

Fonte: os autores e densidade de Freitas e Vasconcellos (2019).

2.1 Análise microscópica

As amostras de madeiras foram encaminhadas ao Laboratório de Anatomia, onde a identificação botânica inicial realizada em campo foi confirmada por confrontamento de exemplares da Xiloteca do INPA. Para a análise microscópica, amostras de madeira previamente identificadas foram utilizadas, confeccionando blocos com dimensões aproximadas de 15 mm × 20 mm × 30 mm para a obtenção de cortes transversais em micrótomo. Lâminas histológicas foram preparadas e utilizadas para as medições. O diâmetro dos vasos foi medido em 25 elementos por espécie, utilizando um microscópio Labomed Luxeo 4D Digital Stereozoom (10x) em conjunto com o software Pixel Pro. Para a determinação da frequência dos vasos, foi delimitada uma área de 1 mm², onde foi realizada a contagem do número de vasos presentes, também com o suporte do software Pixel Pro, conforme os padrões estabelecidos para estudos microscópicos de madeira (IAWA, 1989).

2.2 Análise química

2.2.1 Determinação do teor de extrativos totais – etanol/tolueno (ASTM D1105/D1107)

Nesta análise foram realizadas duas extrações com solventes de diferentes polaridades de forma sucessiva, conforme descrito a seguir: 1ª extração: Foram pesados 5,00 g de serragem e transferidas para o cartucho de celulose. Estes são colocados no interior do extrator Soxhlet e adaptado ao balão de fundo chato (300 ml) contendo aproximadamente 180 ml de solução de C₂H₆O – C₆H₅CH₃ (1:2) cada balão. Foram deixados em refluxo até a completa extração, 8 horas, de modo que a solução no interior do Soxhlet não apresente mais coloração. Os cartuchos com amostras foram postos para secar em estufa (100 °C) e armazenados posteriormente em dessecador. O balão com extrato foi levado à concentração e posteriormente seco em estufa, e pesado até peso constante. A primeira extração (TE1%) foi determinada pela Equação 1; 2ª extração: O procedimento anterior é repetido, sendo que o solvente de extração nessa etapa é apenas o C₂H₆O. Ao final é determinado o TE2% (equação 1), e somado os índices das duas extrações (TE1 + TE2), este resultado é referido como teor de extrativos totais.

$$\text{Teor de Extrativos}\% = \frac{P_f - P_i}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

P_i = Peso do balão seco inicial (g);

P_f = Peso do balão com extrativos (g);

P_s = Peso da amostra seca (g).

2.2.2 Determinação da solubilidade em água quente (ASTM D1110)

A serragem extraída no item 2.2.1 foi seca e pesada, para a extração em H₂O. Em um Erlenmeyer 1 L foi transferido à amostra extraída e adicionado aproximadamente 1 L de água destilada fervente e posto em banho-maria por 4 horas, trocando a água de hora em hora. O material é filtrado ao final desse período em cadinhos Gooch (M), e postos para secar em estufa (100 °C) por 24 horas e pesado a seguir, até peso constante. O teor de material solúvel em H₂O quente foi calculado conforme a Equação 2.

$$\text{Sol. água quente\%} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

P1 = Peso da amostra inicial (g);

P2 = Peso amostra após extração (g).

2.2.3 Determinação do teor de lignina (ASTM D1106)

Foi pesada uma amostra de 1,00 g de madeira isenta de extrativos em um béquer, dando-se início ao tratamento com H₂SO₄ a 72%. O meio permaneceu em repouso por 2 horas em banho frio, ao término das quais foram adicionados 560 ml de água. Em seguida, o frasco foi levado ao banho-maria a 100 °C por 4 horas. Após o tempo de reação, as amostras foram filtradas em cadinho de Gooch (M). O material foi lavado com 500 ml de água destilada aquecida e submetido à secagem em estufa a 100 °C por 12 horas, sendo pesado até atingir massa constante para a determinação do teor de lignina por meio da Equação 3.

$$\text{Lignina\%} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

P1 = Peso da amostra inicial (g);

P2 = Peso seco de lignina obtida (g).

2.2.4 Determinação do teor de holocelulose (Ramadan e Nasser, 2008)

A determinação da holocelulose (celulose + hemicelulose) foi realizada com madeira livre de extrativos (1,00 g). Esta serragem sofreu um primeiro tratamento com 20 ml de HNO₃ (3%). O material foi deixado sob refluxo em banho-maria (80 °C) por 30 minutos. Após esse período a solução é filtrada, e o material retido é submetido a um segundo tratamento com 25 ml de NaOH (3%), e levado ao aquecimento para nova digestão. Ao final o resíduo (celulose) é lavado com 50 ml de C₂H₆O, em seguida com 100 ml de solução H₂O - C₂H₆O (1:1), e por fim com água até que apresente meio neutro. A celulose bruta obtida é seca em estufa (100 °C) e depois pesada até peso constante. O teor de holocelulose foi calculado pela Equação 4.

$$\text{Holocelulose\%} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

P1 = Peso da amostra inicial (g);

P2 = Peso seco do resíduo celulólitico obtido (g).

2.2.5 Determinação do resíduo mineral fixo - RMF (ASTM D1102)

Em cadinho de porcelana 1,00 g de serragem foi adicionado e levado à estufa (100 ± 3 °C) por 1 hora, para retirada da umidade. Em seguida, o recipiente é levado a mufla para incineração, iniciando com o aquecimento gradativo até 580–600 °C. Após a incineração o cadinho é pesado até peso constante. O RMF é determinado pela Equação 5.

$$\text{RMF\%} = \frac{P_{\text{cinzas}}}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

P_{cinzas} = Peso da calcinação obtida (g);

P_s = Peso da serragem seca (g).

2.2.6 D Determinação de taninos e outros polifenóis (Barbosa et al., 2006)

A serragem a 40 mesh (2,00 g) foi refluxado com H_2O (100 ml) em banho-maria (90 °C, 60 min.). Em seguida, o extrato foi filtrado e reservado, e os resíduos da madeira foram levados novamente para extrair por mais 60 minutos. Após, o material foi novamente filtrado e acrescentado à primeira fração extrativa, diluindo-se então para uma solução extrativa final de 500 ml (solução-mãe). A seguir, um volume de 100 ml da solução-mãe foi colocado em balão, onde foram adicionados 10 ml de CH_2O 40% (volume/volume) e 5 ml de HCl concentrado. O sistema foi colocado sob refluxo em banho-maria, por 30 minutos, segundo o método de Stiasny para determinação polifenóis totais. O precipitado foi filtrado, lavado com água, seco em estufa e pesado. A alíquota obtida foi extrapolada para o volume total de extrato e foi calculado o teor de polifenóis totais pela Equação 6.

$$\text{Polifenóis totais}\% = \frac{MMT}{PMS} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

MTT = massa total de taninos (g);

PMS = peso seco da madeira (g).

2.3 Análise física e mecânica

2.3.1 Determinação da matéria seca - umidade (ASTM D2016)

Um total de 1,00 g de serragem (60 mesh) foi adicionada ao pesa-filtro e pesado em balança semi-analítica, posteriormente esse material foi levado a estufa a 100 ± 2 °C por 4 horas, ao final desse período o material foi pesado até um peso constante. O teor matéria seca foi calculado usando a Equação 7.

$$\text{Matéria seca}\% = \frac{P_i - P_f}{P_s} - 1 \times 100 \quad (7)$$

Onde:

P_i = Peso da amostra inicial (g);

P_f = Peso da amostra ao final da secagem (g);

P_s = Peso da amostra base-seca (g).

2.3.2 Estimativa da densidade básica - pbas, modulo de elasticidade e ruptura - EM0, fM (Nascimento et al., 2020)

Espectros na região do infravermelho próximo (NIR) foram obtidos a partir das superfícies dos corpos de prova, utilizando um espectrômetro com transformada de Fourier (FT-NIR) da Thermo Fisher Scientific, modelo Antaris II. O sistema, operado pelo software Result Integration, abrange a faixa espectral de 4.000 a 10.000 cm^{-1} , com 16 varreduras por leitura e

resolução de 8 cm⁻¹. Foram realizadas três leituras em cada face da amostra, gerando um espectro médio representativo.

Modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) foram utilizados para prever as propriedades. Esses modelos correlacionaram os espectros NIR com dados obtidos por métodos tradicionais destrutivos, utilizando o software TQ Analyst™. O modelo para predição da ρ_{bas} foi composto das figuras de mérito Rc^2 (coeficiente de determinação/calibração) = 0,91, RMSEC (raiz quadrada do erro médio de calibração) = 0,07 g/cm³, RMSEP (raiz quadrada do erro médio de predição) = 0,10 g/cm³, RPD (relação de desempenho do desvio) = 6,69 e u (incerteza) = 10,02%. Para E_{M0} foi observado Rc^2 = 0,90, RMSEC = 1.250 MPa, RMSEP = 1.910 MPa, RPD = 4,09 e u (incerteza) = 4,60%, enquanto para f_M Rc^2 = 0,89, RMSEC = 16,10 MPa, RMSEP = 28,00 MPa, RPD = 5,82 e u (incerteza) = 10,20%

2.3.3 Determinação da dureza Janka transversal às fibras - fH90 (Araújo, 2007);

Esta constante foi derivada do valor de ρ_{bas} estimado no item anterior e aplicado na equação de regressão (R^2 = 0,89 n = 156), Equação 8.

$$\sqrt{fH90} = 44,812 - 129,76 \times \rho_{bas} + 454,44 \times \rho_{bas}^2 - 239,73 \times \rho_{bas}^3 \quad (8)$$

Onde:

ρ_{bas} = Densidade básica (g/cm³).

2.3.4 Determinação da porosidade (Haygreen e Bowyer, 1996)

A porosidade da madeira é avaliada considerando o volume total de poros (espaços vazios) em relação ao volume total da madeira. Este parâmetro está diretamente relacionado à ρ_{bas} e às propriedades físicas da madeira, como sua capacidade de absorção de líquidos e gases. Uma relação definida a partir da ρ_{bas} e da ρ_{cel} é descrita na Equação 9.

$$Porosidade = \left(1 - \frac{\rho_{bas}}{\rho_{cel}}\right) \times 100 \quad (9)$$

Onde:

ρ_{bas} = Densidade básica (g/cm³);

ρ_{cel} = Densidade da parede celular da madeira (1,5 g/cm³).

2.3.5 Índice de Performance – IP (Longui et al., 2012)

A qualidade acústica da madeira é definida pela relação do E_{M0} e a ρ_{bas} da madeira conforme a Equação 10.

$$IP = x = \frac{\sqrt{E_{M0}}}{\rho_{bas}} \quad (10)$$

Onde:

E_{M0} = Modulo de elasticidade na flexão estática (MPa);

ρ_{bas} = Densidade básica (g/cm³).

2.4 Análise de dados

Foram realizados testes estatísticos sobre os dados brutos das propriedades físicas, mecânicas e químicas para satisfazer os pressupostos de normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos. Foi aplicada a ANOVA e, quando $p \leq 0,05$ indicou a ocorrência de diferença estatisticamente significativa na propriedade avaliada, foi aplicado o teste de Tukey (OriginPro 2024b software - Demon). Foi criada uma matriz de correlação entre as propriedades preditas. Para isso, os dados que não atenderam à suposição de normalidade passaram pelas seguintes transformações de dados, Log10 e Box-Cox, para atender à suposição da análise de correlação de Pearson. Por fim, foi aplicada a estatística multivariada (análise de componentes principais - PCA) para analisar os grupos de madeira, considerando os resultados de caracterização tecnológica (propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

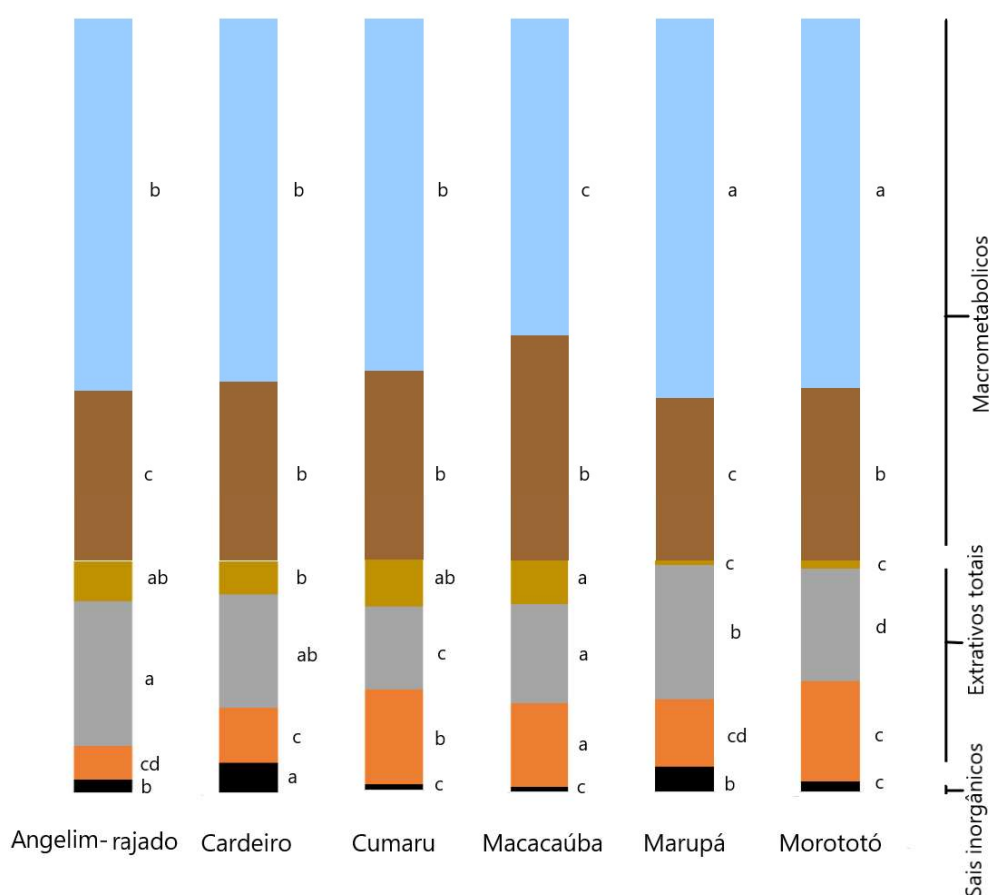
As propriedades químicas, físicas e mecânicas das madeiras amazônicas angelim-rajado (*Pithecellobium racemosum*), cardeiro (*Scleronema micranthum*), cumaru (*Dipteryx odorata*), macacaúba (*Platymiscium ulei*), marupá (*Simarouba amara*) e morototó (*Didymopanax morototoni*) foram caracterizadas neste estudo. Essas propriedades são importantes para classificação e indicação de espécies para a manufatura de instrumentos musicais, considerando que tais produtos exigem um equilíbrio entre rigidez, densidade, estabilidade dimensional, resistência acústica e durabilidade que são influenciados pela composição química (Minato et al., 2010; Sjöström, 2013).

A maior concentração de holocelulose (celulose + hemicelulose) foi detectada para as madeiras de morototó (65,57%) e marupá (64,79%) (Figura 1). Espécies com alta proporção de polissacarídeos estruturais podem apresentar bom desempenho na transmissão sonora e na elasticidade necessária para instrumentos de corda (Bucur, 2023). Quanto a lignina, composto relacionado a rigidez e resistência mecânica, macacaúba se destaca com o maior teor (35,87%), podendo influenciar nas tensões mecânicas, característica fundamental para instrumentos como violões e guitarras, em que a madeira precisa resistir à tração constante das cordas. Em contraste, marupá apresentou baixa concentração de lignina (28%), e esse tipo de madeira é ideal para uso na manufatura de peças para tampos ou partes menos tensionadas (Slooten e Souza, 1987; Longui et al., 2012).

Quanto à concentração dos metabolitos secundários denominados em tecnologia de madeira como extrativos, variaram de 0,11 (marupá) a 2,63% (macacaúba) para taninos e outros polifenóis, e de 1,35 (angelim-rajado) a 5,05% (macacaúba) para compostos extraídos em etanol-tolueno, e para material solúvel em água quente a variação foi de 2,25 (morototó) a 5,94% (macacaúba). A madeira de macacaúba foi a espécie mais rica em extrativos (13,61%), enquanto marupá e morototó assinalaram as menores concentrações (5,30 e 4,44%). Os extrativos são encontrados nas células de parênquimas e preenchendo vasos, podendo ser uma variável problema na acústica de madeiras (Fengel e Weneger, 2003; Mania et al., 2019).

O resíduo mineral fixo (sais inorgânicos) foi quantificado pelo processo de calcinação (600 °C), e a madeira de cardeiro apresentou o maior teor (1,09%), enquanto as outras espécies tiveram concentrações abaixo de 0,66%. A composição química da madeira é uma variável importante na elaboração de novos produtos de madeira visto que pode influenciar significativamente na qualidade do produto final.

Figura 1 – Propriedades químicas de madeiras amazônicas



■ Holocelulose
 ■ Lignina
 ■ Taninos/polifenóis
 ■ Água-quente
 ■ Etanol-tolueno
 ■ Resíduo mineral fixo

Médias seguidas pela mesma letra horizontalmente não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)
 Fonte: os autores.

Os resultados das propriedades anatômicas e físicas das madeiras estudadas são apresentados na Tabela 2. Os resultados destacam variações importantes em relação a densidade básica (ρ_{bas}), diâmetro de vasos e à porosidade. As madeiras de marupá e morototó apresentam baixa ρ_{bas} (0,35 - 0,40 g/cm³), maiores diâmetros de vasos (> 207 μ m) e alta porosidade (77,12% e 73,85%, respectivamente), o que favorece sua aplicação em tampos e fundos de instrumentos musicais de cordas. Essas partes exigem leveza e alta capacidade de vibração, características que tornam essas espécies comparáveis ao abeto (*Picea abies*), madeira tradicionalmente usada para tampos devido à sua leveza e excelente ressonância sonora.

Por outro lado, madeiras de média densidade como o cardeiro ($\rho_{\text{bas}} = 0,56 \text{ g/cm}^3$) combinam maior rigidez estrutural com estabilidade dimensional, sendo adequadas para laterais de instrumentos musicais como violões. As laterais exigem uma combinação de suporte estrutural e leveza, características que essa espécie apresenta em proporções equilibradas. As madeiras de macacaúba e cumaru foram classificadas em alta densidade ($\rho_{\text{bas}} = 0,81 - 0,97 \text{ g/cm}^3$), sendo indicada para aplicações que exigem maior resistência mecânica como por exemplo o modulo de elasticidade.

Tabela 2 – Propriedades anatômicas e físicas de madeiras amazônicas

Madeiras	FV	DV	Matéria seca*	ρ_{bas}	Porosidade*
Angelim-rajado	3,10c (0,98)	98d (10)	87,46b (0,25)	0,80ab (0,07)	47,70c
Cardeiro	4,98b (1,02)	212ab (21)	87,47b (0,40)	0,56c (0,02)	63,40b
Cumaru	20,51a (4,02)	108d (120)	88,12a (0,10)	0,97a (0,09)	36,60d
Macacaúba	19,52a (1,20)	150c (26)	89,97a (0,08)	0,81ab (0,04)	47,06c
Marupá	5,41b (3,21)	245a (72)	86,84bc (0,20)	0,35d (0,06)	77,12a
Morototó	4,01bc (1,25)	207ab (22)	87,13b (0,15)	0,40d (0,02)	73,85a

FV = frequência de vasos, $\text{n}^\circ \text{ mm}^2$, DV = diâmetro de vasos, μm ; * = %; ρ_{bas} = densidade básica, g/cm^3 ; Valor entre parênteses = Desvio padrão; médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade ($p < 0,05$)

Fonte: os autores.

A alta densidade das madeiras estudadas proporciona estabilidade dimensional e resistência ao impacto, o que é essencial para suportar a tensão em instrumentos de cordas, baquetas, arcos de violinos durante a execução musical. Essa madeira apresenta características comparáveis ao pau-brasil (*Paubrasilia echinata*), amplamente utilizado para confecção de arcos de violinos, mas nos últimos estudos tem indicado madeiras tropicais como ipê (*Handroanthus spp.*) como possível substituto, visto alto modulo de ruptura e elasticidade (Bernabei et al., 2010; Fomin, 2017; Longui et al., 2018).

As propriedades mecânicas das madeiras amazônicas são apresentadas na Tabela 3. Entre as madeiras analisadas, o cumaru se destaca como uma das madeiras mais resistentes mecanicamente, com um módulo de elasticidade (E_{M0}) de 16.350 MPa, indicativo de excelente rigidez, uma característica essencial para instrumento que exigem alta tensão sem deformação do material. Além disso, seu módulo de ruptura (f_{M}) de 170 MPa indica alta resistência, garantindo durabilidade. Apesar de sua dureza Janka (f_{H90}) ser relativamente alta, com 16.316 N, o que pode limitar um pouco a ressonância, essa propriedade torna o cumaru adequado para partes que exigem maior resistência ao desgaste, como os braços dos instrumentos (Slooten e Souza, 1987; Lercari et al., 2022).

A macacaúba também apresenta características de alta resistência e rigidez. Com um E_{M0} de 14.500 MPa e um f_M de 150 MPa, ela combina rigidez e resistência em níveis elevados. Sua f_{H90} , de 12.202 N, é alta, mas permanece dentro de um intervalo que permite bom desempenho acústico. Por essas razões, a macacaúba é uma excelente candidata para componentes estruturais de instrumentos, como fundos, em que a rigidez e a resistência mecânica são cruciais. O pau-brasil, tradicionalmente utilizado na confecção de arcos para violino, reafirma sua reputação de excelência. Com um E_{M0} de 15.000 MPa e um f_M de 180 MPa, é uma das madeiras mais resistentes e rígidas avaliadas. Essas propriedades fazem dela uma opção de destaque, tanto para componentes estruturais como para outros usos em instrumentos musicais que exigem alta elasticidade (Mania et al., 2019).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de madeiras amazônicas

Madeiras	E_{M0}	f_M	f_{H90}	IP
Angelim rajado	13.470b (540)	123 b (15)	11.904b (820)	145
Cardeiro	12.750c (710)	103c (11)	5.265c (580)	202
Cumaru	16.350a (1.030)	170a (25)	16.316a (2.015)	131
Macacaúba	14.500b (300)	150ab (18)	12.202b (1.822)	149
Marupá	6.700e (728)	55d (5)	2.006de (189)	234
Morototó	8.700d (370)	71d (20)	2.528d (925)	233
Pau-brasil* (<i>Caesalpinia echinata</i> Lam.)	15.000	180	-	127
Abeto* (<i>Picea abies</i> Karst)	10.700	70	-	220

E_{M0} = módulo de elasticidade, MPa; f_M = módulo de ruptura, MPa; f_{H90} = dureza Janka, N; IP = índice de performance -média; * <https://www.remade.com.br/madeiras>; Valor entre parênteses = Desvio padrão; médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade ($p < 0,05$)

Fonte: os autores.

O índice de performance (IP) das madeiras estudadas, derivados das variáveis E_{M0} e ρ_{bas} varia de acordo com suas propriedades estudadas. Marupá e morototó apresentaram maior IP (233 e 234), destacando-se como madeiras promissora para tampos e fundos. A combinação de ρ_{bas} , E_{M0} e porosidade é determinante para o desempenho das madeiras em instrumentos musicais, o que reforça a importância de selecionar a madeira correta para cada parte do instrumento (Dinulică et al., 2021; Quintavalla et al., 2022).

Quando comparados às madeiras de referência, como o pau-brasil e o abeto, as espécies amazônicas apresentam vantagens e especificações específicas. O pau-brasil, conhecido por sua alta densidade (0,95 g/cm³) e excepcional resistência, tem sido preferido na fabricação de arcos devido à sua especificidade e funcionalidade (Longui et al., 2018). O abeto, por sua vez, é reconhecido por sua estrutura homogênea e leveza (0,40 g/cm³), que proporcionam uma ressonância sonora inigualável para tampos (Halachan et al., 2017). Embora nenhuma das

madeiras amazônicas iguale plenamente essas espécies em desempenho, estudos sugerem que outras madeiras podem oferecer características adequadas para essa aplicação, especialmente quando utilizadas ou combinadas com técnicas modernas (Fomin, 2017; Nascimento et al., 2019).

O estudo demonstra que as seis espécies de madeiras amazônicas analisadas nesta pesquisa apresentam potencial para aplicações específicas na fabricação de instrumentos musicais. As espécies marupá e morototó mostraram-se adequadas para tampos e fundos, enquanto o cardeiro apresentou características favoráveis para laterais. Macacaúba e o cumaru destacaram-se em aplicações que demandam maior resistência mecânica. Embora as madeiras tradicionalmente utilizadas ainda apresentem desempenho superior em determinados aspectos, as espécies amazônicas avaliadas podem ser consideradas como alternativas viáveis, ampliando as opções de matéria-prima para a luteria e possibilitando a diversificação do uso da madeira.

A matriz de correlação apresentada na Figura 2 ilustra as relações entre diferentes variáveis relacionadas às propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas das madeiras avaliadas no estudo. As correlações foram positivas (vermelho) e negativas (azul), classificadas como fortes ($r^2 > 0,70$) e acompanhadas por três níveis de significância: 1, 5 e 10%. O IP apresentou correlação positiva com o diâmetro dos vasos (DV) (0,94) e a porosidade (0,99). Por outro lado, as correlações foram negativas para ρ_{bas} (-0,99), E_{M0} (-0,93), f_M (-0,95), f_{H90} (-0,99) e taninos e outros polifenóis (-0,90).

Esta análise sugere que madeiras com baixa ρ_{bas} , resistência mecânica, taninos, e alta porosidade, e ainda diâmetros de vasos $> 200 \mu m$, têm maior potencial para aplicações em peças cuja a função é a amplificação sonora como tampos de instrumentos. No presente estudo, as madeiras de marupá e morototó reuniram esses atributos. Por outro lado, madeiras com maior ρ_{bas} , E_{M0} , f_M , f_{H90} e teor de taninos apresentaram atributos adequados para partes de instrumentos musicais que requerem maior resistência mecânica. As relações entre as propriedades da madeira e suas potenciais aplicações são bem documentadas na literatura. Por exemplo, estudos mostraram que diferenças na anatomia da madeira, como a presença de raios e parênquima axial, foram conectadas às propriedades acústicas da madeira (Ahvenainen, 2019; Dinulică et al., 2021).

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na Figura 3 visa reduzir a dimensionalidade dos dados, destacando os principais eixos de variação entre as variáveis estudadas e as espécies de madeira amazônica. Os dois componentes principais explicam uma parcela significativa da variabilidade total dos dados (71,63% para o componente 1 e 14,18% para o componente 2), permitindo a identificação das relações entre as propriedades tecnológicas e o IP, bem como o agrupamento das espécies de acordo com suas características.

Figura 2 – Coeficientes de correlação de Pearson a partir das correlações entre as variáveis das propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas da madeiras estudadas

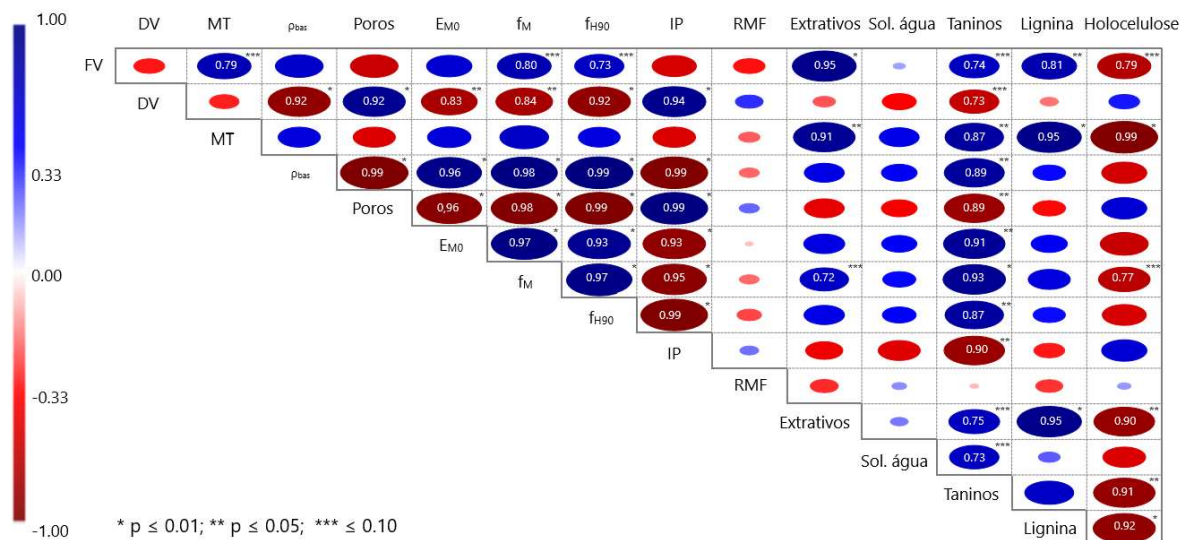
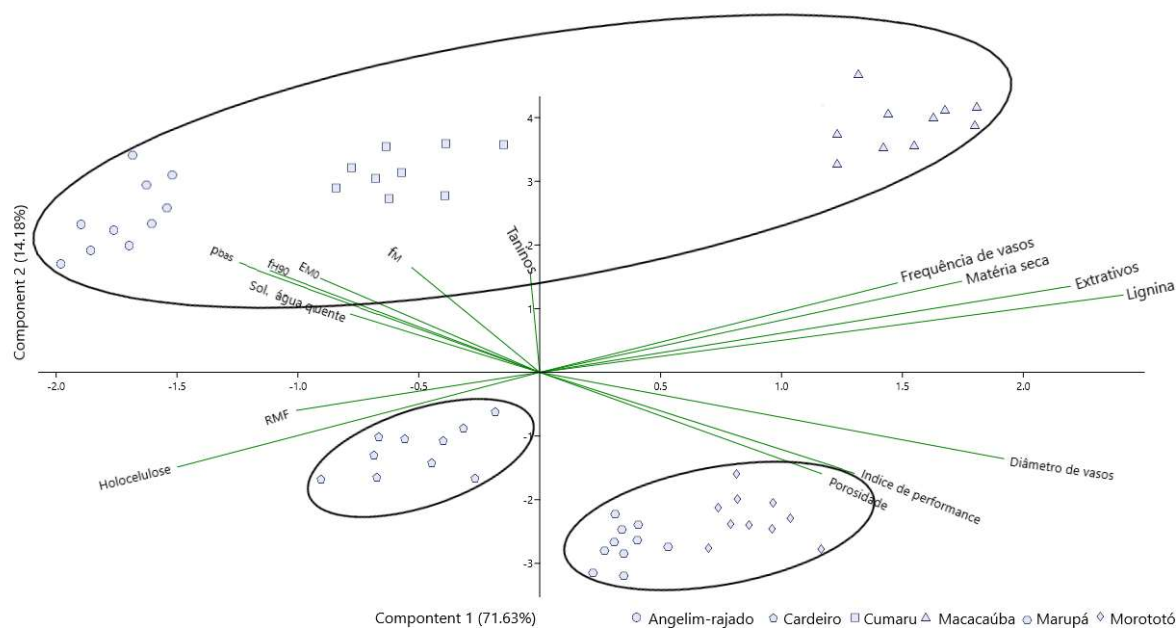


Figura 3 – Análise do componente principal (PCA) das variáveis estudadas



Fonte: os autores.

O componente 1 está fortemente associado às propriedades químicas, como lignina, extrativos e holocelulose, além da porosidade e do IP. Isso sugere que essas variáveis são fundamentais para diferenciar as espécies em termos de seu potencial para a manufatura de instrumentos musicais. Por outro lado, o componente 2 está mais relacionado às propriedades mecânicas, como EM₀, f_M, f_{H90}, além de variáveis anatômicas como diâmetro e frequência dos vasos (DV e FV).

As madeiras de angelim-rajado, macacaúba e cumaru formam um grupo caracterizado principalmente por traços químicos (polifenóis e material solúvel em água quente), além de propriedades físicas e mecânicas. O grupo formado por marupá e morototó é influenciado diretamente pela porosidade e pelo DV, resultando em maiores valores de IP, fator preditivo para indicação de uso na manufatura de instrumentos musicais como violões e violinos (Longui et al., 2012).

A PCA confirma o objetivo do estudo ao evidenciar que as propriedades tecnológicas das madeiras estão diretamente relacionadas ao IP, permitindo a identificação de espécies mais adequadas para a manufatura de instrumentos musicais. A análise destaca que diferentes combinações de características químicas, anatômicas e mecânicas influenciam o potencial de cada espécie, alinhando-se às exigências de qualidade acústica e estrutural dos instrumentos.

4. CONCLUSÃO

O estudo avaliou as propriedades de madeiras amazônicas com potencial para aplicação na manufatura de instrumentos musicais. As características analisadas influenciaram o índice de performance (IP) das madeiras, confirmando sua utilidade como parâmetro preditivo de qualidades acústicas. As espécies marupá e morototó apresentaram alto IP, baixa densidade básica, alta porosidade e diâmetros de vasos superiores a 200 μm , sendo indicadas para tampos e fundos de instrumentos que requerem leveza e maior capacidade de vibração. Por outro lado, as madeiras de cumaru, macacaúba e angelim-rajado exibiram maior densidade, resistência mecânica e teor de lignina, características que as tornam apropriadas para componentes estruturais, como laterais e braços, onde são exigidas rigidez e durabilidade. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para a seleção de materiais na fabricação de instrumentos musicais, contribuindo para o uso eficiente dos recursos florestais disponíveis.

REFERÊNCIAS

- AHVENAINEN, P. Anatomy and mechanical properties of woods used in electric guitars. **IAWA Journal**, v. 40, n. 1, p. 106-S6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/22941932-40190218>.
- ARAÚJO, H.J.B. Relações funcionais das propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 399-416, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards** (Section 4 – Construction, Volume 04.10 – Wood). West Coshohocken, 2021.
- BARBOSA, A.P.; PALMEIRA, R.C.F.; NASCIMENTO, C.S.; FEITOSA, D.S.; CUNHA, M.P.S.C. Leguminosas florestais da Amazônia Central brasileira. I. Prospecção das classes de compostos presentes na casca. **Fitos**, v. 1, p. 47-57. 2006.
- BERNABEI, M.; BONTADI, J.; ROGNONI, G. A dendrochronological investigation of stringed instruments from the collection of the cherubini conservatory in florence, italy.

Journal of Archaeological Science, v. 37, n. 1, p. 192-200, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.09.031>

BRÉMAUD I. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 1, p.807- 818, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.3651233>

BUCUR, V. A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. **Forests**, v. 14, n. 8, p. 1545, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14081545>

ČULÍK, M.; GIERTLIOVÁ, B;ALÁČ, P.; HAJDÚCHOVÁ, I. Decision-making model for the specification of wood as an input for the production of wooden musical instruments. **Central European Forestry Journal**, v. 69, n. 2, p. 69-76, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/forj-2023-0008>

DINULICĂ, F.; STANCIU, M.; SAVIN, A. Correlation between anatomical grading and acoustic–elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments. **Forests**, v. 12, n. 8, p. 1122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12081122>

FENGEL, F.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastruct.** Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

FOMIN, I.M. **A madeira de ipê (*Handroanthus* spp.) para arcos de violino: propriedades e avaliação de desempenho técnico.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

FREITAS, J.A.; VASCONCELLOS, F.J. **Identificação prática de madeiras comerciais da Amazônia.** Manaus: INPA, 2019.

HALACHAN, P.; BIBIAK, M.; SPISIAK, D.; CHUBINSKY, N.A.; TAMBI, A.A.; CHAUZOW, K.V. Physico-acoustic characteristics of spruce and larch wood. **Wood Research**, v. 62, n. 2, p. 235-242, 2017.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science.** 3rd ed. Iowa: Iowa State University Press, 1996.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bull**, v. 10, p. 219–332, 1989.

LERCARI, M.; GONZÁLEZ, S.; ESPINOZA, C.; LONGO, G.; ANTONACCI, F.; SARTI, A. Using mechanical metamaterials in guitar top plates: a numerical study. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8619, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12178619>

LONGUI, E.L.; BRÉMAUD, I.; SILVA JÚNIOR, F.G.; LOMBARDI, D.R. Relationship among extractives, lignin and holocellulose contents with performance index of seven wood species used for bows of string instruments. **IAWA Journal**, v. 33, p. 141–149, 2012.

LONGUI, E.L.; MOUREIRA, J.A.; LOMBARDI, D.R.; SILVA JÚNIOR, F.G.; ALVES, E.S. Potential use of *Libidibia ferrea* and *Poincianella pluviosa* woods for bows of string

instrumen. **European Journal of Wood Products**, v. 76, p. 357–368, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1187-6>

MANIA, P.; MOLIŃSKI, W.; ROSZYK, E.; GÓRSKA, M. Optimization of spruce (*Picea abies* L.) wood thermal treatment temperature to improve its acoustic properties.

Bioresources, v. 15, n. 1, p. 505-516, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.505-516>

MIHĂLCICĂ, M.; GLIGA, V.G.; CAMPEAN, M.; CRETUNC, A.; NAUNCEF, A.M.; STEIGMANN, R. Psycho-acoustic assessment of violins with different anatomical features of wood. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. 15, n. 3, p. 158-163, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.158>

MINATO, K.; KONAKA, Y.; BREMAUD, I.; SUZUKI, S.; OBATAYA, E. Extractives of muirapiranga (*Brosimum* sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. **Journal Wood Sci**, v. 56, p. 41–46, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10086-009-1051-3>

NASCIMENTO, C.C.; COSTA, J.A.; SILVA, G.L.R.C.; NASCIMENTO, C.S.; ARAUJO, R.D. Propagating tension waves in assessing wood quality from two Amazonian tree species. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, p. 434-434, 2019.

NASCIMENTO, C.S.; NASCIMENTO, C.C.; BRASIL, M.M. **NIR models for predicting physico-mechanical properties of Amazonian wood - INPA (version 1.0-20)**. 2020. Disponível em: <http://portal.inpa.gov.br/cotei/2>

QUINTAVALLA, M.; GABRIELLI, F.; CANEVARI, C. The acoustics of traditional italian mandolins and their relation with soundboard wood properties. **International Journal of Wood Culture**, v. 2, n. 1-3, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/27723194-bja10001>

RAMADAN, A.; NASSER, A. Specific gravity, fiber length and chemical components of *Conocarpus erectus* as affected by tree spacing. **Journal of Agriculture and Environment**, v. 7, p. 52-59, 2008.

ROOHNIA, M.; HASHEMI-DIZAJI, S.-F.; BRANCHERIAU, L.; TAJDINI, A.; HEMMASI, A.-H.; MANOUCHEHRI, N. Effect of soaking process in water on the acoustical quality of wood for traditional musical instruments. **Bioresources**, v. 6, n. 2, p. 2055-2065, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.2055-2065>

SJÖSTRÖM E. **Wood chemistry. Fundamentals and applications**. 2nd ed. Espoo: Academic Press, 2013.

SLOOTEN, H.J.V.D.; SOUZA, M.R. **Avaliação das espécies madeiras da Amazonia selecionadas para manufatura de instrumentos musicais**. Manaus: INPA, 1987.

ZAMANINASAB, S.; LASHGARI, A.; ROOHNIA, M.; JAHAN-LATIBARI, A.; TAJDINI, A. Fermentation pretreatment and extraction's effect on the acoustic properties of walnut wood (*Juglans regia*). **BioResources**, v. 18, n. 3, p. 5085–5095, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5085-5095>