

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE
POLINIZAÇÃO ABERTA E ASPECTOS QUÍMICOS E
FÍSICO-MECÂNICOS DA MADEIRA DE PAU-MARFIM
[*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.]**

Antonio Roveri Neto

Biólogo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE
POLINIZAÇÃO ABERTA E ASPECTOS QUÍMICOS E
FÍSICO-MECÂNICOS DA MADEIRA DE PAU-MARFIM
[*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.]**

Discente: Antonio Roveri Neto

Orientador: Dr. Rinaldo Cesar de Paula

Coorientadora: Dra. Maria Inês Tiraboschi Ferro

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para
a obtenção do título de Doutor em
AGRONOMIA (Genética e Melhoramento de
Plantas)**

R873d

Roveri Neto, Antonio

Divergência genética entreprogênes de polinização aberta e aspectos químicos e físico-mecânicos da madeira de pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.] / Antonio Roveri Neto. -- Jaboticabal, 2024

92 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rinaldo Cesar de Paula

Coorientadora: Maria Inês Tiraboschi Ferro

1. Melhoramento florestal. 2. qualidade da madeira. 3. poder calorífico superior. 4. espectroscopia no infravermelho próximo. 5. avaliação não destrutiva. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa revela o valor genético e o potencial de uso do pau-marfim, uma espécie arbórea nativa do Brasil, promovendo práticas sustentáveis que preservam a biodiversidade e fortalecem a economia verde. Ao harmonizar ciência e natureza, ela inspira a conservação florestal e o uso responsável dos recursos, contribuindo para um futuro equilibrado e sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research reveals the genetic value and potential of Pau-Marfim, promoting sustainable practices that preserve biodiversity and strengthen the green economy. By harmonizing science and nature, it inspires forest conservation and the responsible use of resources, contributing to a balanced and sustainable future.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE POLINIZAÇÃO ABERTA E ASPECTOS QUÍMICOS E FÍSICO-MECÂNICOS DA MADEIRA DE PAU-MARFIM
[*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.]

AUTOR: ANTONIO ROVERI NETO

ORIENTADOR: RINALDO CESAR DE PAULA

COORDINADORA: MARIA INES TIRABOSCHI FERRO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RINALDO CESAR DE PAULA (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **RINALDO CESAR DE PAULA**
Data: 26/06/2024 20:54:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. ISRAEL LUIZ DE LIMA (Participação Virtual)
Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) / São Paulo/SP

Documento assinado digitalmente
 **ISRAEL LUIZ DE LIMA**
Data: 26/06/2024 07:37:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUSTAVO VITTI MÔRO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO VITTI MORO**
Data: 26/06/2024 14:43:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. PAULO HENRIQUE MÜLLER DA SILVA (Participação Virtual)
Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) / Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
 **PAULO HENRIQUE MULLER DA SILVA**
Data: 26/06/2024 07:08:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. BRUNO ETTORE PAVAN (Participação Virtual)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócios

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO ETTORE PAVAN**
Data: 26/06/2024 09:48:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

“a

Jaboticabal, 25 de junho de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANTONIO ROVERI NETO – Nascido em 22 de março de 1982, na cidade de São Paulo – SP. Filho de Graça Maria de Moraes Rego e Silva e Antonio Roveri Junior. Zootecnista formado no ano de 2005 e licenciado em Ciências Biológicas no ano de 2010, ambos pela Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), Câmpus de Jaboticabal – SP. Ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), na mesma instituição, em março de 2012, sob a orientação do Prof. Dr. Rinaldo César de Paula, com o projeto “Divergência genética entre árvores matrizes de *Ceiba speciosa* St. Hil. para características de frutos e sementes”. Com a orientação do Prof. Dr. Rinaldo César de Paula e coorientação da Profa. Dra. Maria Inês Tiraboschi Ferro, no curso de doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), adotou como linha de pesquisa, divergência genética entre progênies de polinização aberta e aspectos químicos e físico-mecânicos da madeira de pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.].

“Todo jardim começa com um sonho de amor.
Antes que qualquer árvore seja plantada
ou qualquer lago seja construído,
é preciso que as árvores e os lagos
tenham nascido dentro da alma.

Quem não tem jardins por dentro,
não planta jardins por fora
e nem passeia por eles...”

Rubem Alves

DEDICATÓRIA

À memória eterna dos meus pais Graça Maria e Antonio, cujo amor, apoio e inspiração permeiam cada página desta tese. Que o seu legado perdure para sempre em cada palavra escrita e em cada conquista alcançada.

A minha noiva Éllen, símbolo de amor, apoio e inspiração. Esta tese é dedicada a você, que sempre esteve ao meu lado, incentivando-me e compartilhando cada desafio e triunfo. Obrigado por ser minha fonte de força e alegria. Nosso amor é a motivação por trás de cada palavra escrita.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e inspiração, por guiar-me e fortalecer-me ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus tios Teresinha e Domingos (em memória) e à minha irmã Carla Gabriela, que sempre me incentivaram e apoiaram em toda minha jornada.

Aos meus orientadores, minha gratidão pela paciência, orientação e ensinamentos ao longo do trajeto. Seu comprometimento e sabedoria foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP), ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) e aos amigos do Viveiro de Mudas (Horto), Adevaire e Roberto Carlos.

Ao Instituto de Pesquisas Ambientais, aos Doutores Miguel Luiz Menezes Freitas, Eduardo Luiz Longui e Israel Luiz de Lima, à Estação Experimental de Luiz Antonio e toda a equipe que auxiliou com a coleta de dados e material de estudo, Cícera Rodrigues Lima e Jair Rodrigues do Valle.

Aos membros da banca examinadora Dr. Israel Luiz de Lima, Dr. Gustavo Vitti Moro, Dr. Paulo Henrique Müller da Silva e Dr. Bruno Ettore Pavan, por terem aceitado o convite e pelas contribuições para melhoria deste trabalho.

Ao técnico em informática Jefferson Lordello Polizel do Centro de Métodos Quantitativos (ESALQ/USP), ao professor doutor Fabio Minoru Yamaji e à Anna Júlia Brunheroto Correia, do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade (UFSCAR – Sorocaba).

Aos amigos que contribuíram durante toda a fase experimental, análises, tabulação dos dados e incentivo durante a realização e escrita deste trabalho, Arthur de Paula, Karine Aparecida, Gabrielly Baroni, João Pedro e Giovana Nunes.

... enfim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sou imensamente grato por ter tido a oportunidade de aprender com vocês.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

	página
RESUMO _____	v
ABSTRACT _____	vii
CAPÍTULO 1 - Considerações Gerais _____	01
Referências Bibliográficas _____	10
CAPÍTULO 2 - Divergência genética entre progênies de polinização aberta de pau-marfim [<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.] para caracteres de crescimento e madeira _____	15
Resumo _____	15
Abstract _____	16
Introdução _____	17
Material e Métodos _____	19
Procedência do material avaliado _____	19
Caracteres de crescimento e amostragem das árvores _____	21
Densidade básica e biomassa de madeira _____	22
Caracterização química da madeira _____	23
Análise dos dados _____	23
Análise de agrupamentos de Ward e K-means e de componentes principais _____	24
Resultados e discussão _____	24
Conclusão _____	37
Referências Bibliográficas _____	37
CAPÍTULO 3 - Propriedades da madeira de <i>Balfourodendron riedelianum</i> em função da procedência _____	41
Resumo _____	41
Abstract _____	42
Introdução _____	42
Material e Métodos _____	45
Procedência do material avaliado _____	45

Propriedades físicas da madeira _____	46
Propriedades mecânicas da madeira _____	47
Análise estatística _____	47
Resultados e discussão _____	48
Conclusão _____	54
Referências Bibliográficas _____	55
CAPÍTULO 4 – Potencial bioenergético da madeira de pau-marfim	
[<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl. – Rutaceae] _____	59
Resumo _____	59
Abstract _____	59
Introdução _____	60
Material e Métodos _____	63
Procedência do material avaliado _____	63
Amostragem da madeira _____	63
Densidade, biomassa e caracterização química da madeira _____	64
Poder calorífico superior (PCS) da madeira _____	65
Análise dos dados _____	66
Estimativas de correlação _____	66
Resultados e discussão _____	66
Conclusão _____	74
Referências Bibliográficas _____	74
CAPÍTULO 5 – Determinação de propriedades químicas de madeira de	
<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl. com o uso da reflexão difusa	
de infravermelho próximo _____	78
Resumo _____	78
Abstract _____	79
Introdução _____	80
Material e Métodos _____	82
Procedência do material avaliado _____	82
Avaliação da densidade da madeira e caracterização química da	
madeira _____	83

Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e aquisição dos espectros NIR _____	83
Análise de correlação e construção dos modelos de calibração NIR _____	84
Resultados e discussão _____	85
Conclusão _____	88
Referências Bibliográficas _____	89

Divergência genética entre progênieis de polinização aberta e aspectos químicos e físico-mecânicos da madeira de pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.]

RESUMO – *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. é uma espécie arbórea tropical que ocorre na Mata Atlântica e está em perigo de extinção devido à grande fragmentação do bioma e à exploração de sua madeira. Atualmente, três populações da espécie estão sendo conservadas em um teste de progênieis e procedências implantado na Estação Experimental de Luiz Antonio – SP. O teste é composto por procedências de Alvorada do Sul (Paraná) e de Gália e Bauru (ambas no estado de São Paulo). O objetivo desse trabalho foi avaliar a divergência genética entre as progênieis e procedências de polinização aberta aos 36 anos de idade e determinar os aspectos químicos, físicos e mecânicos da madeira de pau-marfim, bem como o potencial da espécie para produção de energia e o potencial da espectroscopia do infravermelho próximo para determinação dos teores de lignina, celulose e densidade básica da madeira. Foram avaliados o diâmetro à altura do peito, altura total, volume, biomassa do lenho, densidade básica na madeira e teores de lignina e celulose, algumas propriedades físico-mecânicas da madeira e determinado o Poder Calorífico Superior; além de desenvolver modelos de predição dos teores de lignina e celulose e da densidade básica da madeira utilizando espectroscopia do infravermelho próximo (NIR). Observou-se variabilidade genética entre as progênieis para todos os caracteres avaliados, exceto para densidade básica da madeira. De uma forma geral, o efeito de procedência foi não significativo para os caracteres avaliados. As estimativas de herdabilidade individual e da média de progênieis foram altas, à exceção da densidade básica da madeira e do poder calorífico superior. As correlações entre os caracteres variaram conforme os mesmos, tendo-se observado valores de moderada a alta magnitude. Constatou-se pelas propriedades físicas e mecânicas estudadas que a madeira da espécie oriunda de plantio pode ser indicada para usos estruturais que não necessitam de alta resistência, além da construção civil e fabricação de móveis. Também, a madeira de pau-marfim pode ser empregada para fins energéticos. Os resultados obtidos indicam, também, que o teor de lignina e celulose podem ser avaliados por meio da espectroscopia no infravermelho próximo e os valores de coeficientes de determinação e em validação cruzada foram altos para essas

características, mas baixos para densidade básica da madeira. A técnica NIR apresentou-se como uma ferramenta que pode ser utilizada para a determinação das propriedades da madeira desta espécie nativa.

Palavras-chave: Melhoramento florestal, Qualidade da madeira, Poder calorífico superior, Espectroscopia no infravermelho próximo, Avaliação não destrutiva, Análise multivariada.

Genetic divergence between open-pollinated progênies and chemical and physical-mechanical aspects of pau-marfim wood [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.]

ABSTRACT – *Balfourodendron riedelianum** (Engl.) Engl. is a tropical tree species that occurs in the Atlantic Forest and is endangered due to the extensive fragmentation of its biome and the exploitation of its wood. Currently, three populations of the species are being conserved in a progeny and provenance test established at the Luiz Antonio Experimental Station in São Paulo. The test comprises provenances from Alvorada do Sul (Paraná) and Gália and Bauru (both in the state of São Paulo). The objective of this study was to evaluate the genetic divergence among open-pollinated progenies and provenances at 36 years of age and to determine the chemical, physical, and mechanical aspects of ivory wood, as well as the species' potential for energy production and the potential of near-infrared spectroscopy to determine lignin, cellulose, and basic wood density content. Diameter at breast height, total height, volume, wood biomass, basic wood density, and lignin and cellulose content were evaluated, along with some physical and mechanical properties of the wood, and the Higher Heating Value was determined. Additionally, models for predicting lignin and cellulose content and basic wood density using near-infrared spectroscopy (NIR) were developed. Genetic variability was observed among the progenies for all traits evaluated, except for basic wood density. In general, the provenance effect was not significant for the traits evaluated. Estimates of individual and progeny mean heritability were high, except for basic wood density and the Higher Heating Value. Correlations between traits varied depending on the traits, with values ranging from moderate to high magnitude. It was found that the physical and mechanical properties studied suggest that the wood of the species from plantations can be recommended for structural uses that do not require high resistance, as well as for civil construction and furniture manufacturing. Additionally, ivory wood can be used for energy purposes. The results also indicate that lignin and cellulose content can be evaluated using near-infrared spectroscopy, with high coefficients of determination and cross-validation for these characteristics, but low for basic wood density. The NIR

technique proved to be a tool that can be used to determine the properties of this native species' wood.

Keywords: Forest breeding, Wood quality, Higher heating value, Near infrared spectroscopy, Non- destructible technique, Multivariate analysis

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

As florestas naturais têm passado por processos de desmatamento e fragmentação em todo o mundo e, nesse sentido, as florestas tropicais estão entre as mais afetadas, sendo a Mata Atlântica um dos biomas mais impactados no Brasil, restando apenas 12% de sua cobertura original (Quintella et al., 2020). As porções de floresta que restaram, assim como suas espécies, estão sujeitas ao risco de completo desaparecimento (SOS - Mata Atlântica, 2021).

Após a fragmentação de florestas a pequenos remanescentes isolados, ocorre a redução da variabilidade genética das espécies arbóreas, com consequente aumento nas taxas de endogamia, a exemplo da autofecundação e de cruzamentos entre indivíduos aparentados. Como resultado, as gerações subsequentes apresentam perda de diversidade genética e biológica, com impactos diretos no aumento da vulnerabilidade ecológica desses fragmentos, prejudicando a manutenção da biodiversidade (Dos Santos et al., 2016). De acordo com Tambarussi et al. (2015), o desmatamento e a fragmentação exercem impactos severos, uma vez que a diminuição dos habitats em fragmentos pequenos e isolados, inseridos em uma matriz urbana extensa, influencia processos críticos para as populações, tais como crescimento, sobrevivência e reprodução das espécies vegetais, comprometendo assim a preservação da biodiversidade.

Assim, a fragmentação desencadeia uma diminuição na diversidade genética das populações, uma vez que há um aumento nas taxas de autofecundação e cruzamento entre indivíduos relacionados, resultando em gerações com uma proporção maior de indivíduos endogâmicos. Um dos principais resultados da endogamia é a depressão por endogamia, que ocorre devido à fixação de alelos recessivos deletérios, causando efeitos drásticos ao reduzir o vigor reprodutivo, a produtividade, a fertilidade e a viabilidade das sementes, expondo as populações a um alto risco de extinção (Frankhan, 2012).

A maioria dos reflorestamentos e, até mesmo, projetos de restauração e conservação de germoplasma florestal são frequentemente conduzidos sem considerar adequadamente a genética das populações das espécies envolvidas. Geralmente, as sementes são coletadas de uma ou poucas árvores matrizes, e são

plantadas nas áreas destinadas à restauração ou conservação, sem avaliar os impactos genéticos dessas ações. A longo prazo, essa abordagem pode resultar na redução da diversidade genética das populações, levando à deriva genética e, eventualmente, à extinção das espécies envolvidas nos projetos (Sonstebo et al., 2018). Para evitar esses problemas, é crucial implementar estratégias que garantam uma estrutura genética adequada nas populações de germoplasma florestal conservadas.

Nesse contexto, os programas de conservação *ex situ* ganham destaque, uma vez que estudos com espécies arbóreas tropicais têm identificado indícios de redução da diversidade genética e aumento da endogamia em populações fragmentadas. No entanto, essas mudanças podem levar várias gerações para se manifestarem, pois os indivíduos adultos remanescentes ainda representam a população pré-fragmentação (Manoel et al., 2012). A criação de bancos para conservação *ex situ* emerge como uma estratégia crucial para preservar a diversidade genética, viabilizando a manutenção da variabilidade genética em condições artificiais e a conservação de amostras representativas, considerando o tamanho populacional efetivo necessário para iniciar essa nova população. Desse modo, os efeitos da deriva genética amostral, a perda de alelos raros e a depressão por endogamia são mitigados (Moraes e Sebbenn, 2011).

A compreensão da diversidade genética por meio de estudos de divergência é crucial para identificar novas fontes de genes de interesse. A diversidade genética intraespecífica é fundamental para a sustentabilidade e estabilidade do ecossistema, sendo mantida pela divergência entre as plantas de uma mesma espécie. A avaliação da divergência genética do conjunto de genótipos estudados e a identificação dos caracteres que mais contribuem para a variabilidade genética são aspectos importantes. Isso pode ser alcançado por meio da análise de características morfológicas e da utilização de técnicas estatísticas multivariadas (Bispo et al., 2020).

A diversidade genética é crucial para o potencial evolutivo e adaptativo das espécies, permitindo respostas variadas diante das mudanças ambientais. No entanto, essa diversidade é influenciada por fatores como o tamanho e a densidade populacional, bem como pela fragmentação e pelo fluxo gênico. Consequentemente, espécies conservadas *ex situ* podem apresentar diferenças em relação às suas

populações de origem, dependendo do tamanho e do método de coleta das amostras. Portanto, é essencial entender o sistema de cruzamento das espécies, assim como o tamanho efetivo das populações nos bancos de conservação *ex situ*, para compreender como a diversidade genética é distribuída entre as populações amostradas e utilizá-la na coleta de sementes para a restauração de áreas degradadas (Boshier et al., 2015).

Aliado aos programas de conservação de espécies está a preocupação em selecionar populações e indivíduos mais eficientes, com uma capacidade adaptativa superior às condições edafoclimáticas adversas, com o objetivo de incluir genótipos superiores que combinem as melhores características de produtividade, além de estudar a relação genótipo x ambiente, para a obtenção de ganhos genéticos (Navarrete-Campos et al., 2013).

Devido aos avanços registrados nas últimas décadas, é evidente que os programas de melhoramento genético estão ganhando cada vez mais importância dentro das empresas florestais. Os resultados provenientes desses programas estão sendo utilizados como uma estratégia fundamental para a gestão da produtividade florestal. No entanto, é perceptível que a compreensão do potencial do melhoramento florestal como ferramenta de gestão da produtividade ainda é limitada, devido ao conhecimento insuficiente sobre suas contribuições históricas e contemporâneas (Sá e Tambarussi, 2023).

Para a maioria das espécies florestais nativas do Brasil, o melhoramento genético ainda é uma área pouco explorada, muitas vezes limitada à fase de avaliação de procedências e progênies. Especificamente para as espécies destinadas à produção de madeira, os objetivos do melhoramento geralmente incluem a seleção de genótipos que sejam adaptados aos diferentes ambientes de plantio, apresentem alta produtividade e melhor qualidade da madeira, tenham um fuste de melhor qualidade, sejam resistentes às principais pragas, doenças e estresses ambientais, e que possuam variabilidade genética suficiente para garantir sua conservação e a continuidade do processo de melhoramento a longo prazo (Pedrozo et al., 2021).

Os testes de procedências e de progênies são estratégias comprovadamente eficazes no melhoramento de espécies florestais. A partir das informações coletadas nesses testes, é possível estimar parâmetros genéticos e identificar genótipos

promissores para serem utilizados em cruzamentos ou clonagem. Além disso, permitem estabelecer pomares de sementes por mudas por meio do desbaste seletivo de plantas menos produtivas no teste (Rocha et al., 2009).

Para desenvolver estratégias de conservação e uso sustentável, além de programas de coleta de sementes para a restauração ambiental, é crucial avaliar aspectos populacionais como diversidade genética, sistema reprodutivo e fluxo gênico da espécie em questão (Degen e Sebbenn, 2014). Paralelamente, a análise do crescimento/produtividade e da qualidade da madeira permitem identificar o potencial genético da espécie para programas de melhoramento.

Considerando a viabilidade comercial da espécie e um possível programa de melhoramento, a avaliação da qualidade da madeira se torna essencial, pois o objetivo final é garantir a produção de matéria-prima que satisfaça as demandas do mercado consumidor. Entre os atributos relacionados à qualidade da madeira, a densidade básica é um dos mais relevantes e estudados no contexto do melhoramento florestal, já que está relacionada com outras características e é um parâmetro utilizado para classificar a madeira em diferentes segmentos da indústria. Além disso, sua determinação é relativamente simples, apresenta boa correlação com propriedades físicas e mecânicas da madeira e composição celular e, também, possui uma herdabilidade considerável (Vital et al., 2013). No entanto, é importante observar que essa característica pode variar radial e longitudinalmente, entre árvores, espécies, idades, espaçamentos e até mesmo de acordo com o local de plantio ou crescimento (Pereira et al., 2023).

A densidade é uma das propriedades físicas mais estudadas da madeira devido à sua facilidade de determinação e à forte correlação com as propriedades mecânicas. É considerada uma das características mais importantes para a caracterização tecnológica da madeira, uma vez que sua variação tem um impacto significativo na resistência e na estabilidade dimensional do material (Xavier et al., 2022).

Para garantir a segurança e a eficiência na utilização da madeira para fins estruturais, é fundamental compreender suas propriedades físicas e mecânicas. Entretanto, frequentemente a madeira é empregada sem esse conhecimento básico, resultando em mau uso e desperdício do material (Silva, 2013). Assim, é essencial

caracterizar essas propriedades que são cruciais no dimensionamento das estruturas. A falta de conhecimento desses atributos torna impraticável o uso correto da madeira e, portanto, é necessário avaliar as propriedades de resistência e rigidez, adaptando-as às condições específicas de utilização da madeira (Soares et al., 2021).

Em relação às propriedades físicas da madeira a serem avaliadas, destacam-se a densidade aparente e densidade básica como principais parâmetros de utilização, pois se correlacionam diretamente com a maioria das outras propriedades e com a composição celular da madeira, refletindo sua qualidade final e seu comportamento em processos tecnológicos e industriais (Müller et al., 2014). Outra variável física importante é a retratibilidade, que avalia a variação nas dimensões de uma peça de madeira quando há redução do grau de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (Oliveira et al., 2010). Segundo Silva (2002), o conhecimento da retratibilidade é essencial para a correta condução do processo de secagem e para a utilização final do produto, visando minimizar possíveis defeitos na madeira.

Em relação às propriedades mecânicas da madeira, destacam-se como as mais investigadas a resistência aos esforços de compressão, flexão e cisalhamento. O estudo dessas propriedades é fundamental para determinar adequadamente a aplicação da madeira em diversas utilizações, especialmente naquelas que exigem maior resistência e rigidez (Araujo, 2007).

De acordo com Miranda et al. (2012) as propriedades mecânicas da madeira variam de acordo com as particularidades de cada espécie e o ambiente em que se encontram, portanto, os valores dessas propriedades tendem a oscilar em torno de médias. Assim, a escolha de uma espécie de madeira específica para determinado uso deve ser baseada na avaliação individual de suas propriedades mecânicas.

Estudos indicam que a combustão direta da madeira é o método mais simples e econômico de obtenção de energia (Quirino et al., 2004). Essa vantagem torna o uso da madeira para fins energéticos atrativo, embora seja necessária uma caracterização adequada. Segundo Vale et al. (2000), a escolha de uma madeira para fins energéticos deve considerar, entre outros aspectos, seu poder calorífico e seu potencial para produção de biomassa. O poder calorífico é uma das propriedades mais importantes da madeira como combustível, pois mede a eficiência energética e serve

como um indicador crucial da capacidade calorífica de uma determinada espécie (Barros et al., 2012).

A qualidade dos produtos derivados da madeira é determinada pelo conjunto de suas características anatômicas, químicas, físicas e mecânicas. A madeira serrada, proveniente de várias espécies florestais, é amplamente comercializada. No entanto, muitas vezes é utilizada sem uma caracterização e identificação adequadas de suas propriedades, o que pode resultar em uso impróprio (Molina et al., 2016).

Diversas pesquisas têm sido conduzidas utilizando métodos ou ensaios não destrutivos com o objetivo de simplificar os processos de classificação da madeira, eliminando a necessidade de equipamentos laboratoriais específicos e acelerando o processo. Alguns desses métodos incluem ensaios de vibração transversal e ultrassom. Autores como Faydi et al. (2017), Segundinho et al. (2018) e Braun Júnior e Santos (2019) exploraram essas técnicas, como alternativas para determinar a rigidez à flexão.

Para minimizar as intervenções na madeira, a utilização de testes não destrutivos, como velocidade de pulso ultrassônico (VPU), resistografia, extração de parafuso ou penetrômetro, proporciona resultados confiáveis de medições *in situ*. Esses métodos são empregados para avaliar o estado de conservação de elementos estruturais de madeira e, através deles, é possível estimar parâmetros como densidade, tensão de ruptura e módulo de elasticidade, auxiliando na tomada de decisões sobre reutilização ou substituição, de acordo com os requisitos do projeto (Oroza et al., 2022).

Entre as técnicas não destrutivas, a Espectroscopia de Reflectância no Infravermelho Próximo (NIR) destaca-se como uma abordagem rápida, precisa e aplicável a uma ampla variedade de amostras (Muniz et al., 2012). Além disso, não requer o uso de reagentes químicos, é parcialmente imune a erros do operador e pode ser realizada com uma preparação mínima da amostra. No que diz respeito à análise da qualidade da madeira, o NIR emerge como um método não invasivo capaz de prever suas propriedades químicas (Pecoraro et al., 2015), anatômicas (Hein et al., 2012), físicas (Rosso et al., 2013) e mecânicas (Kelley et al., 2004). Essa tecnologia também permite determinar a relação lignina siringil/guaiacil (Ramadevi et al., 2016) e os teores de holocelulose e lignina total (Zhou et al., 2015, 2016). Esse tipo de

análise é de grande importância para os programas de melhoramento genético, pois muitas vezes não é viável abater árvores que representam material genético único e valioso para o avanço das gerações (Estopa, 2017).

Balfourodendron riedelianum Engl. (Engl.), conhecido popularmente como pau-marfim dentre outros nomes comuns (Figura 1), é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica, secundária tardia, que pode atingir até 35 m de altura e um diâmetro de tronco, avaliado a 1,30 m do solo, comumente denominado como Diâmetro à Altura do Peito (DAP), de 100 cm. É uma árvore longeva, possui flores hermafroditas e polinizadas por pequenos insetos, enquanto suas sementes são dispersas pelo vento, um processo conhecido como anemocoria (Carvalho, 2004). A espécie ocorre na Argentina, Paraguai e Brasil, onde ocorre naturalmente na Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, Floresta Ombrófila Mista e Densa abrangendo os estados do Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Pirani et al., 2020). Sua madeira tem grande valor econômico, sendo empregada na construção civil, marcenaria, em projetos paisagísticos e na recuperação de áreas degradadas (CNCFLORA, 2023).

De acordo com Ortega (1995) o pau-marfim é uma espécie classificada como semi-heliófila ou esciófila. Embora em seus estágios iniciais possa tolerar sombreamento de intensidade média, é moderadamente tolerante ao frio quando jovem. Em florestas naturais, as árvores adultas são capazes de suportar temperaturas de até -8°C. A espécie possui crescimento lento a moderado, podendo atingir a maior produtividade volumétrica aos 26 anos (Garrido et al., 1982).



Figura 1. Indivíduo adulto de *Balfourodendron riedelianum*, detalhe suas folhas, flores e frutos. Fonte: http://www1.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlasv3/esp_balfou.php

Infelizmente, devido à exploração intensiva de sua madeira e à fragmentação do bioma Mata Atlântica, essa espécie está na lista das espécies ameaçadas de extinção (IUCN, 2019).

Considerando o potencial da espécie para fins comerciais e, um programa de melhoramento, a determinação da qualidade da madeira torna-se imprescindível, uma vez que o objetivo final é garantir a produção de matéria prima que atenda às demandas do mercado consumidor. Por se tratar de uma das espécies da flora nativa com grande valor econômico, *B. riedelianum* vem sendo alvo de alguns estudos genéticos, como o realizado por Aguiar et al. (2019) em que desenvolveram marcadores microssatélites para a espécie. Kubota et al. (2015) estudando caracteres quantitativos de interesse silvicultural em dois testes de procedências e progênies localizados no estado de São Paulo, constataram que parte da variação genética detectada se encontra distribuída entre plantas dentro de progênies e parte da variação é de origem genética.

Até o momento, há pouca informação disponível a respeito da base genética das populações brasileiras de *B. riedelianum*. Nesse sentido, o estudo de divergência genética entre e dentro de populações de pau-marfim envolvendo diferentes caracteres, como crescimento, composição química e propriedades físico-mecânicas da madeira e o potencial de uso de métodos não destrutivos para avaliação de propriedades tecnológicas da madeira, a exemplo da reflexão difusa de infravermelho próximo (NIR), serão úteis para o manejo de populações da espécie contribuindo em programas de melhoramento, uso sustentável e conservação.

Para a realização deste estudo foram utilizados dados de um teste de procedências e progênies de polinização aberta de *B. riedelianum* (pau-marfim), a partir de uma área implantada em 1986, na Estação Experimental de Luiz Antônio, no município de Luiz Antônio (SP), pertencente à Fundação Florestal em parceria com o Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) do estado de São Paulo. O teste, como um todo, é composto por três procedências (Alvorada do Sul, Paraná; Gália e Bauru, São Paulo, Brasil) e foram avaliadas 19 progênies por procedência. Aos 36 anos de idade, após avaliação do diâmetro à altura do peito (DAP, tomada a 1,30 m do solo) em todo o experimento, foram amostradas árvores de diferentes progênies/procedências para determinação do crescimento e produtividade, da densidade básica da madeira e

outras propriedades físicas e mecânicas, composição química pelo método tradicional e por espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) e do poder calorífico, de forma a estudar o potencial da espécie para diferentes usos.

O estudo teve como base as seguintes hipóteses:

- I) há variabilidade genética entre procedências e progênes de polinização aberta de pau-marfim para caracteres de crescimento e da madeira;
- II) as propriedades físicas e mecânicas da madeira diferem entre as procedências;
- III) a variação genética presente na população influencia as características da madeira que determinam seu potencial calorífico;
- IV) é possível estabelecer correlações entre os espectros de NIR da serragem da madeira de pau-marfim e os teores de lignina e de celulose, densidade básica da madeira, medidas por métodos tradicionais de laboratório.

Dessa forma, os objetivos deste estudo foram:

- I) avaliar a divergência genética entre progênes de polinização aberta de *B. riedelianum*, a partir de caracteres de crescimento e da madeira;
- II) determinar a densidade aparente, densidade básica e variação dimensional da madeira;
- III) determinar a compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, módulo de elasticidade e módulo de ruptura;
- IV) estabelecer os valores bioenergéticos e determinar o poder calorífico da espécie como matéria-prima para bioenergia;
- V) investigar as características químicas da madeira de pau-marfim e desenvolver modelos de predição dos teores de lignina e de celulose e da densidade básica da madeira de maneira rápida, simples, confiável e não destrutiva, a partir de amostras de madeira moídas, utilizando espectroscopia do infravermelho próximo (NIR).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar BI, Gandara FB, Freitas MLM, Moraes MLT, Kageyama, PY, Sebbenn, AM (2019). Validation of microsatellite loci for *Balfourodendron riedelianum* through analysis of Mendelian inheritance, genetic linkage, and genotypic linkage disequilibrium. **Silvae Genetica** 68:81-84.

Araújo HJB (2007). Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta** 37 (3):399-416. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v37i3.9937>

Barros SVS, Nascimento CC, Azevedo CP (2012). Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no Amazonas: alternativa para produção de lenha. **Floresta** 42:725-732.

Bispo RB, Dardengo, J de FE, Bispo, RB, Bispo, RB, Rossi, AAB (2020). Divergência genética entre genótipos de *Mauritia flexuosa* L. f. por meio de morfometria de frutos e sementes. **Nativa** 8:585–590. DOI:<https://doi.org/10.31413/nativa.v8i4.8622>.

Boshier D, Broadhurst L, Cornelius J, Gallo L, Koskela J, Loo J, Petrokofsky G, Clair B (2015). Is local best? Examining the evidence for local adaptation in trees and its scale. **Environmental Evidence** 20: 1-10.

Braun Junior W, Santos LL (2019). Correlação das Propriedades Elásticas e Dinâmicas de Três Espécies Nativas de Madeira. **Revista Científica FAESA**, ISSN 2316-7327. 15:52-70.

Carvalho PER (2004). Pau-marfim, *Balfourodendron riedelianum*. **Circular técnica Embrapa Florestas** 93:1-11

CNCFLORA (2012). *Balfourodendron riedelianum* in **Lista Vermelha da flora brasileira** versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Balfourodendronriedelianum>>. Acesso em 11 julho 2023.

Degen B, Sebbenn AM (2014). Genetics and Tropical Forest. In: Pancel L., Köhl M. **Tropical Forest handbook** 1:1-30.

Dos Santos AR, Ribeiro CAAS, De Oliveira Peluzio, et al. (2016). Geotechnology and landscape ecology applied to the selection of potential Forest fragments for seed harvesting. **Journal of environmental management** 183:1050-1063. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.073>.

Estopa, R. A. (2017). **Fenotipagem via nir e predição genômica em *Eucalyptus benthamii*** (Tese de doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Faydi Y, Brancheriau I, Pot G, et al. (2017). Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. ISSN 1930-2126. **Bio Resources** 12:5913-5927.

Frankham R (2012). How closely does genetic diversity in finite populations conform to predictions of neutral theory? Large deficits in regions of low recombination. **Heredity** 168: 167–178.

Garrido MA De O, Nogueira JCB, Garrido LM Do AG (1982). Características silviculturais do pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum* Engl.) Silvicultura em São Paulo, v.16 A, pt. 2, p. 1081- 1085, 1982. **Edição de Anais do Congresso Nacional sobre Essências Nativas**, Campos do Jordão, SP.

Hein PRG, Lima JT, Trugilho PF, Chaix G (2012). Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. **Floresta e Ambiente**, 19(2), p.194-199. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.023>.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN. (2019). **Red List of Threatened Species**. 1998: e.T32987A9741568. Version 2015-4. Available at: <<https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>>. Acessado em novembro de 2020.

Kelley SS, Rials TG, Groom LR, So CL (2004). Use of near infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods. **Holzforschung** 58(3):252-260. <http://dx.doi.org/10.1515/HF.2004.039>.

Kubota TYK, Moraes MA, Silva, ECB, Pupin S, Aguiar AV, Moraes MLT, Freitas ML, Sato AS, Machado JAR, Sebbenn AM (2015). Variabilidade genética para caracteres silviculturais em progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* (Engler), **Scientia Forestalis** 43:407-415

Manoel RO, Alves PF, Dourado CL, Gaino APSC, Freitas MLM, Moraes MLT, Sebbenn A.M (2012). Contemporary pollen flow, mating pattern and effective population size inferred from paternity analysis in a small fragmented population of the neotropical tree *Copaifer alangsdorffii* Desf. (Leguminosae - Caesalpinioideae). **Conservation Genetics** 13:613–623

Miranda MC, Castelo PAR, Miranda DLC, Rondon EV (2012). Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Parkia gigantocarpa* ducke. **Ciência da Madeira** 03:55-65

Molina JC, Calil Neto C, Christoforo AL (2016). Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de *Manilkara huberi* para o emprego em madeira laminada colada, **Ambiente Construído** 16:221-227.

Moraes MLT, Sebbenn AM (2011). Pollen dispersal between isolated trees in the Brazilian Savannah: a case study of the neotropical tree *Hymenaea stigonocarpa*. **Biotropica** 43:192–199.

Müller BV, Rocha MP, Cunha AB, Nicoletti MF (2014). Avaliação das Principais Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Floresta e Ambiente** 21(4):535-542.

Muñiz GIB, Washington LEM, Carneiro ME, Viana LC (2012). Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal** 22:865-875.

Navarrete-Campos D, Bravo L, Rubilar R, Emhart V, Sanhueza R. (2013). Drought effects on water use efficiency, freezing tolerance and survival of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus globulus* × *nitens* cuttings. **New Forests** 44:119-134. 10.1007/s11056-012-9305-0.

Oliveira JTS, Tomazello Filho M, Fiedler NC (2010) Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Árvore** 34 (5):929-936. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000500018>

Oroza H, Alayo EB, Mendez RE (2022). Avaliação não destrutiva das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração. **Revista ALCONPAT** 12 (2):263-278. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

Ortega LS de (1995). Temperamento de luz de los arboles del alto Paraná y potencial de regeneración forestal. **Ka'aguy** 11:16-20

Pecoraro E, Pizzo B, Alves A, Macchioni N, Rodrigues JC (2015). Measuring the chemical composition of water logged decayed wood by near infrared spectroscopy. **Microchemical Journal** 122:176-188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2015.05.005>.

Pedrozo CA, Cruz SL, Gonçalves DA, Santos FA (2021). Melhoramento genético de *Tachigali vulgaris*: teste de procedências e progênies em Roraima. **Anais do I Workshop Online Florestas de Tachigali vulgaris**.

Pereira FB, Boshier DH, Rossini BC, Marino CL, Freitas MLM, Silva EV, Melchert GF, Sperotto J, Tambarussi EV (2023). Estimativas de parâmetros genéticos para crescimento em progênies de duas procedências de *Roupala montanavar. brasiliensis* (proteaceae). **Revista Instituto Floresta** 35:113-123. <http://doi.org/10.24278/2178-5031.202335107>

Pirani JR, Groppo M, Dias P (2020) Rutaceae in Flora do Brasil 2020 em construção. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: [HTTP://florado.brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343](http://florado.brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343). Acesso em 12 de dezembro de 2020.

Quintella F, Da Rosa CA, Feijo A (2020). A Updated and annotated checklist of recent mammals from Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 92. Doi: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191004>.

Quirino WF, Vale AT, Andrade APA, Abreu VLS, Azevedo ACS (2004). Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia** 1:173-182.

Ramadevi P, Hegde DV, Varghese M, Kamalakannan R, Ganapathy S P, Gurumurthy DS (2016). Evaluation of lignin syringyl/guaiacyl ratio in *Eucalyptus camaldulensis* across three diverse sites based on nearinfrared spectroscopic calibration modelling with five *Eucalyptus* species and its impact on Kraft pulpyield. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 24(6):529-536. <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.1251>.

Rocha RB, Rocha MDGB, Rocha D, Torres D, Novaes RML (2009). Teste de procedência e progênie de angico vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg) visando o estabelecimento de pomar de sementes. **Biota** 2:139-143.

Rosso S, Muniz GIB, Matos JLM, Haselein CR, Hein PRG, Lopes MC (2013). Density of *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden using nearinfrared spectroscopy. **Cerne** 19(4):647-652. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000400015>

Sá LF, Tambarussi EV (2023). Melhoramento genético como estratégia de gestão da produtividade. **Revista Instituto Florestal** 35:99-112.

Segundinho PGA, Oliveira RGE, Gonçalves FG, Lopes NF, Alves RC, Azevedo MS (2018). Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509833392>. **Ciência Florestal** 28:1163.

Silva JC (2002). **Caracterização da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira** (tese de doutorado). Curitiba: Universidade Federal do Paraná

Silva LVMS (2013). **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de mogno africano (Khaya ivorensis A. Chev.)** (monografia). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Soares LSZR, Silva DAL, Panzera TH (2021). Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente. **Revista Matéria** 26(3):1-13.

Sonstebo JH, Tollefsrud MM, Myking T, Steffenrem A, Nilsen AE, Edvardsen OM, El-Kassaby YA (2018). Genetic diversity of Norway spruce (*Picea abies*(L.) Karst.) seed orchard crops: Effects of number of parents, seed year, and pollen contamination. **Forest Ecology and Management** 411:132-141.

SOS - Mata Atlântica (2021). Amazônia tem áreas de cobertura florestal em situação tão crítica quanto a mata atlântica, bioma mais devastado do país. **Notícias** - 2021. Disponível: <https://www.sosma.org.br/noticias/amazonia-tem-areas-de-cobertura-florestal-em-situacao-tao-critica-quanto-a-mata-atlantica-bioma-mais-devastado-do-pais>.

OzhouTambarussi EV, Boshier D, Vencovsky R, Freitas MLM, Sebbenn AM (2015). Paternity analysis reveals significant isolation and near neighbour pollen dispersal in small *Cariniana legalis* Mart. Kuntze populations in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecology and Evolution** 5:4735–5147.

Vale AT, Brasil MAM, Leão AL (2000). Caracterização da madeira e da casca de *Sclerolobium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético. In: Agrener 2000: 3 **Encontro de Energia no Meio Rural, 2000**. Campinas. Anais... Campinas: NIPE/CAMPINAS.v. 01. p. 18 - 19.

Vital BR, Carneiro, ACO, Pereira BLC (2013). Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos, F.; Colodette, J. L.; Queiroz, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. 1:321-354.

Xavier CN, Neves Junior OF, Carvalho AM (2022). Propriedades físicas das madeiras de quatro espécies tropicais. **Open Science Research VII** 7:119-128.

Zhou C, Jiang W, Via BK, Chetty P M, Swain T (2016). Monitoring the chemistry and monosaccharide ratio of *Eucalyptus dunnii* wood by nearinfrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 24(6):537-548. <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.1254>.

CAPÍTULO 2 - Divergência genética entre progênes de polinização aberta de pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.] para caracteres de crescimento e madeira

RESUMO – *Balfourodendron riedelianum* é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica ameaçada de extinção devido à exploração de madeira e fragmentação de habitats. Sua madeira possui alto valor econômico, usada na construção civil, marcenaria, paisagismo e reflorestamento, contudo, há pouco conhecimento sobre a base genética dessa espécie. Nesse sentido, este trabalho avaliou a divergência genética entre progênes de polinização aberta de *B. riedelianum*, a partir de caracteres de crescimento e da madeira. Os dados foram obtidos de um experimento implantado no município de Luiz Antônio (SP), com 40 famílias de polinização aberta de *B. riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências. Foram avaliados o diâmetro à altura do peito, altura total, volume, biomassa do lenho, densidade básica da madeira e teores de lignina e celulose. Os dados foram submetidos inicialmente à análise de *deviance*, posteriormente, à análise multivariada pelo método hierárquico de agrupamento de Ward e não hierárquico de *K-means* (K-médias) e à análise de componentes principais a partir da matriz de correlação. Observou-se variabilidade genética entre progênes para todos os caracteres avaliados, exceto para densidade básica da madeira. O efeito da procedência foi não significativo para os caracteres avaliados. As estimativas de herdabilidade individual e da média de progênes foram altas, à exceção da densidade básica da madeira. Pelo método de Ward, as progênes foram divididas em 4 grupos, sendo que o grupo 4 foi superior em relação ao crescimento e à produção, já o grupo 2 ficou caracterizado pelas progênes de menor teor de celulose e o maior em lignina, o grupo 3 apresentou maior teor de celulose e o grupo 1, o de menor crescimento/produtividade. No método de *K-means*, os quatro grupos formados diferenciaram-se pouco daqueles obtidos no método de Ward, porém apresentaram características mais bem definidas. A análise de componentes principais revelou que volume, altura e diâmetro possuem alto poder discriminatório no primeiro componente, enquanto a densidade da madeira e teores de lignina e celulose são os principais fatores no componente 2. As progênes com

características superiores foram consistentemente identificadas nos três métodos de agrupamento. Esse tipo de abordagem pode ser empregado em estratégias de melhoramento para selecionar progênies superiores, visando atender a diferentes objetivos do programa de melhoramento.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Melhoramento florestal; Análise multivariada.

Genetic divergence among pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.] open pollinated progenies for growth and wood traits

ABSTRACT – *Balfourodendron riedelianum* is a tree species endemic to the Atlantic Forest, threatened with extinction due to wood exploitation and habitat fragmentation. Its wood has high economic value, used in civil construction, carpentry, landscaping, and reforestation. However, there is little knowledge about the genetic basis of this species. In this context, this study evaluated the genetic divergence among open-pollinated progenies of *B. riedelianum* based on growth and wood characteristics. The data were obtained from an experiment established in the municipality of Luiz Antônio (SP), with 40 open-pollinated families of *B. riedelianum* at 36 years of age, from three provenances. Diameter at breast height, total height, volume, wood biomass, basic wood density, and lignin and cellulose contents were assessed. The data were initially subjected to deviance analysis, followed by multivariate analysis using Ward's hierarchical clustering method and non-hierarchical K-means clustering, and principal component analysis based on the correlation matrix. Genetic variability was observed among progenies for all evaluated characteristics, except for basic wood density. The provenance effect was not significant for the evaluated traits. Estimates of individual and progeny mean heritability were high, except for basic wood density. Using Ward's method, the progenies were divided into four groups, with group 4 being superior in growth and production. Group 2 was characterized by progenies with lower cellulose content and higher lignin content, group 3 had higher cellulose content, and group 1 had the lowest growth/productivity. In the K-means method, the four formed groups differed slightly from those obtained by Ward's method but had more well-defined

characteristics. Principal component analysis revealed that volume, height, and diameter have high discriminatory power in the first component, while wood density and lignin and cellulose contents are the main factors in the second component. Superior progenies were consistently identified in all three clustering methods. This type of approach can be employed in breeding strategies to select superior progenies, aiming to meet different objectives of the breeding program.

Keywords: Wood quality; Forest improvement; Multivariate analysis

INTRODUÇÃO

As florestas naturais têm passado por processos de desmatamento e fragmentação em todo o mundo e, nesse sentido, as florestas tropicais estão entre as mais afetadas, sendo a Mata Atlântica um dos biomas mais impactados no Brasil, restando apenas 12% de sua cobertura original (Quintella et al., 2020). As porções de floresta que restaram, assim como suas espécies, estão sujeitas ao risco de completo desaparecimento (SOS - Mata Atlântica, 2021).

Após a fragmentação de florestas a pequenos remanescentes isolados, ocorre a redução da variabilidade genética das espécies arbóreas, com consequente aumento nas taxas de endogamia, a exemplo da autofecundação. Como resultado, as gerações subsequentes apresentam perda de diversidade genética e biológica, com impactos diretos no aumento da vulnerabilidade ecológica desses fragmentos (Dos Santos et al., 2016).

Fatores como o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico têm contribuído para o aumento da fragmentação de habitats naturais. Ações antrópicas e outros fatores têm comprometido o ambiente natural e suas relações, levando à degradação e eliminação de habitats de maneira acelerada (Goudie, 2018). Diante desse cenário, é essencial implementar medidas que visem à conservação dos recursos naturais, com o objetivo de preservar a diversidade e minimizar os impactos ambientais causados pela atividade humana. Para isso, é crucial compreender o

potencial genético e produtivo das espécies, assim como os métodos de conservação *ex situ*, tais como o uso de bancos de sementes, criopreservação ou jardins botânicos, visando o resgate e preservação das espécies em risco de extinção (Silva et al., 2018; IBGE, 2021) bem como o possível uso dessa variabilidade genética em programas de melhoramento.

Balfourodendron riedelianum Engl. (Engl.), conhecido popularmente como pau-marfim dentre outros nomes comuns, é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica, que pode atingir até 35 m de altura e um diâmetro de tronco, a 1,30 m do solo, de 100 cm. Suas flores são hermafroditas e polinizadas por pequenos insetos, enquanto suas sementes são dispersas pelo vento, um processo conhecido como anemocoria (Carvalho, 2004). A espécie apresenta ampla distribuição geográfica: do estado de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul, estendendo-se ao Paraguai e Argentina (Pirani et al., 2020). Sua madeira tem grande valor econômico, sendo empregada na construção civil, marcenaria, em projetos paisagísticos e na recuperação de áreas degradadas (CNCFLORA, 2013). Infelizmente, devido à exploração intensiva de sua madeira e à fragmentação do bioma Mata Atlântica como um todo, essa espécie está na lista das espécies ameaçadas de extinção (IUCN, 2019).

Para o desenvolvimento de estratégias de conservação e uso sustentável em programas de coleta de sementes para a restauração ambiental, é de suma importância avaliar características populacionais como a diversidade genética, o sistema reprodutivo e o fluxo gênico da espécie em consideração (Degen e Sebbenn, 2014). Aliado a isso, a avaliação do crescimento/produktividade e da qualidade da madeira, possibilita a determinação do potencial genético da espécie para uso em programas de melhoramento.

Considerando o potencial da espécie para fins comerciais e, no contexto de um programa de melhoramento, a determinação da qualidade da madeira torna-se imprescindível, uma vez que o objetivo final é garantir a produção de matéria prima que atenda às demandas do mercado consumidor. Dentre os caracteres relacionados à qualidade da madeira, a densidade básica é um dos mais importantes e estudados no melhoramento florestal, pois tem relações com outros caracteres sendo, por isso, um parâmetro utilizado para classificar a madeira nos diversos segmentos da atividade industrial. Além disso, é de fácil determinação, apresenta boa correlação

com as propriedades físicas e mecânicas da madeira e composição celular e, também, tem herdabilidade relativamente alta (Vital et al., 2013). No entanto, deve-se atentar, pois é uma característica que pode sofrer variações no sentido radial e longitudinal, bem como entre árvores, entre as espécies, idade, espaçamento, e até mesmo com o local de plantio e, ou de crescimento (Pereira et al., 2023).

Até o momento, há pouca informação disponível a respeito da base genética das populações brasileiras de *B. riedelianum*. Nesse sentido, a implantação e avaliação de testes de progênies e de procedências são essenciais, pois fornecem informações sobre a variabilidade genética da espécie e contribuem diretamente com as novas demandas do setor florestal brasileiro. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a divergência genética entre progênies de polinização aberta de *B. riedelianum*, a partir de caracteres de crescimento e da madeira.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedência do material avaliado

Foram utilizados dados de um teste de procedências e progênies de polinização aberta de *B. riedelianum* (pau-marfim), a partir de uma área implantada em 1986, na Estação Experimental de Luiz Antônio, no município de Luiz Antônio (SP) (Figura 1), pertencente à Fundação Florestal em parceria com o Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) do estado de São Paulo. Durante o inverno, os níveis de precipitação são significativamente mais baixos em comparação com os verificados no verão. O clima é considerado Aw de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, com 22,5 °C de temperatura média, com variação de 19 a 24 °C. A precipitação anual é de 1286 mm, com variação de 21 mm em julho a 246 mm em janeiro (CLIMATE-DATA.ORG, 2023).

O teste é composto por três procedências (Alvorada do Sul, no Paraná; Gália e Bauru, em São Paulo, Brasil) e foram avaliadas 19 progênies por procedência (Figura 2). O desenho experimental foi o delineamento em blocos completos

casualizados, com 6 repetições e parcelas lineares de cinco plantas, no espaçamento 3 x 3 m, totalizando 1.710 plantas (Figura 3).

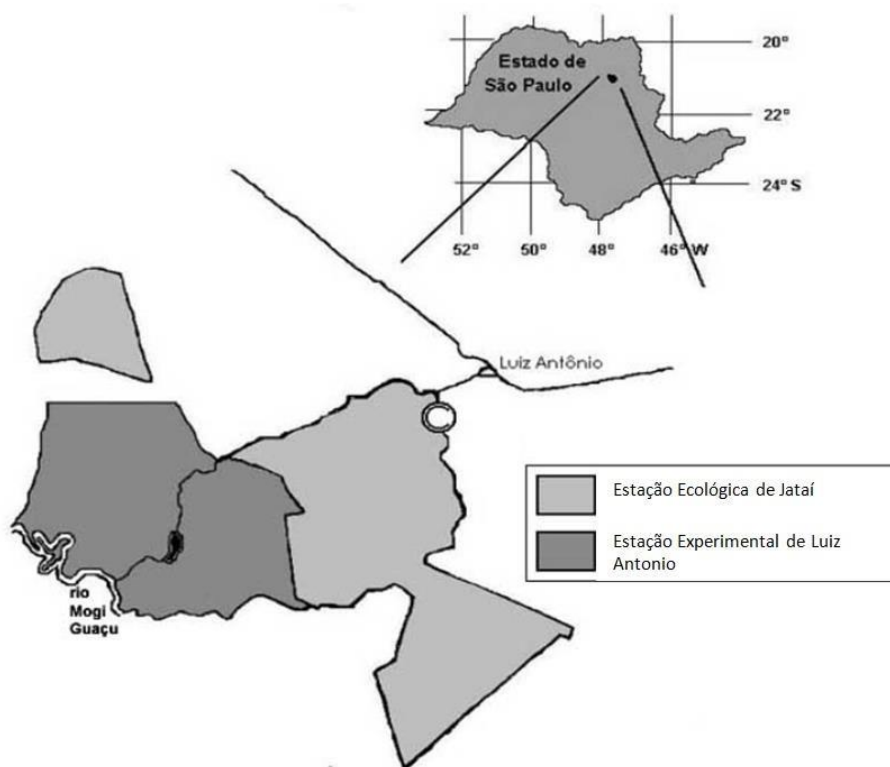


Figura 1. Localização geográfica da Estação Experimental de Luiz Antônio (EELA) no município de Luiz Antônio, estado de São Paulo, Brasil.



Figura 2. Localização geográfica das cidades de Alvorada do Sul, estado do Paraná (azul) e das cidades de Gália e Bauru, ambas no estado de São Paulo (verde).



Figura 3. Ensaio de procedências e progênes de *Balfourodendron riedelianum* (A) e Desbaste seletivo das árvores (B).

Caracteres de crescimento e amostragem de árvores

Avaliou-se o diâmetro a 1,30 m do solo, comumente denominado de diâmetro à altura do peito (DAP, em cm), com uma suta graduada em mm, a altura total (ALT, em m), com um relascópio de Bitterlich, e a sobrevivência (SOB, em %) das árvores no teste.

Com base na análise dos dados de DAP, e de forma a representar a variabilidade genética do teste, foram amostradas 40 progênes, sendo 27 dessas com valores genéticos positivos (superiores) e 13 com valores genéticos negativos (inferiores) e destas 40 progênes, foram amostradas e abatidas 3 árvores, totalizando 120 árvores amostradas. Essas três árvores pertenciam, na sua quase totalidade, a repetições diferentes no teste original, exceto em situações em que o número de plantas sobreviventes por progênie não era suficiente. Essas três árvores faziam parte daquelas que seriam desbastadas, considerando-se uma seleção de 40% das plantas superiores por progênie. Das 40 progênes amostradas, 9 são da procedência de Alvorada do Sul, sendo que 6 apresentavam valores genéticos positivos e 3 com valores genéticos negativos; 14 eram da procedência de Gália, das quais 11 apresentavam valores genéticos positivos e 3 com valores genéticos negativos e, 17

eram da procedência de Bauru, sendo destas 10 com valores genéticos positivos e 7 com valores genéticos negativos.

Nas árvores abatidas foram amostrados seis discos com aproximadamente 5 cm de espessura. Um dos discos foi amostrado na altura do DAP e os demais representando os seguintes percentuais do comprimento do fuste (altura comercial, correspondente ao comprimento desde a base até um diâmetro mínimo de 4 cm): 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% (topo).

Em todos os discos amostrados, foram realizadas duas medições perpendiculares para determinação dos diâmetros médios com e sem casca. A partir do comprimento e diâmetro dos toretes entre os pontos de amostragem foram determinados os volumes (m³/árvore) com (VCC) e sem (VSC) casca, empregando a fórmula de Smalian, conforme descrito por Soares et al. (2006).

$$V_{fuste} = \frac{\pi}{8} 1,3(d_{0\%}^2 + DAP^2) + \frac{\pi}{8} l_1(DAP^2 + d_{25\%}^2) + \frac{\pi}{8} l_2[d_{25\%}^2 + d_{100\%}^2 + 2(d_{50\%}^2 + d_{75\%}^2)]$$

Em que:

d0%, d25%, d50%, d75% e d100% = diâmetros avaliados a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (do comprimento do fuste);

DAP = diâmetro à altura do peito (avaliado a 1,30 m do solo);

l1 = Comprimento entre o DAP e 25% do fuste (variável de árvore para árvore);

l2 = Corresponde a 25% do comprimento do fuste de cada árvore abatida.

Densidade básica e Biomassa de Madeira

Para a avaliação da densidade básica da madeira (DBM), os discos (obtidos conforme descrito no tópico anterior) foram devidamente identificados e encaminhados para o Laboratório de Sementes e Melhoramento Florestal para secagem. De cada disco foram retiradas amostras, em forma de cunha, para a determinação da densidade básica da madeira, pelo método da imersão em água. A densidade básica média da madeira foi obtida a partir dos vários pontos de amostragem ao longo do fuste, conforme descrito por Vital (1984).

A biomassa do lenho (BIOML, kg árvore⁻¹) foi obtida pelo produto entre o volume sem casca (VSC, m³ árvore⁻¹) e DBM (kg m⁻³).

Caracterização química da madeira

Amostras compostas de madeira obtidas de cada disco foram picadas e moídas em moinho tipo Willey, para determinação de constituintes químicos. Anteriormente à determinação dos teores de lignina e de celulose, amostras da madeira moída foram submetidas ao processo de eliminação dos extrativos. Para tanto, foram usados 5 g de amostra seca de madeira de cada progênie e colocadas dentro de um Erlenmeyer, onde foi adicionada água quente. A água foi eliminada e substituída por outra, repetindo-se o procedimento até que a solução ficasse incolor. Após essa extração em água, as amostras foram levadas à extração em solução com tolueno e álcool etílico (1:2 v/v) e, posteriormente colocadas em filtro de papel e levadas à bomba de vácuo para uma última lavagem e pré-secagem. As amostras nos filtros de papel foram levadas para a estufa de secagem a 65 °C por 12 horas. Após esse procedimento a amostra ficou pronta para quantificação dos teores de lignina e celulose.

Teor de Lignina (LIG, %) - após eliminação dos extrativos, o teor de lignina foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986) usando-se amostras de 0,3 g de madeira moída.

Teor de Celulose Total (CEL, %) - determinado pelo método do ácido nítrico, conforme procedimento descrito em Santos e Sansígolo (2000).

Análise dos dados

Os dados obtidos foram analisados de acordo com modelos mistos e análise de *deviance*, com o uso do software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007), a partir do modelo:

$$Y = Xr + Zg + Wb + e$$

Em que: y é o vetor dos dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral; g é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios); b é o vetor dos efeitos de procedências (assumidos como aleatórios); e é o vetor de resíduos (aleatórios).

A partir dos valores genotípicos por progênie estimou-se as correlações entre os diferentes caracteres.

Análise de Agrupamentos de Ward e K-means e de Componente Principais

De posse dos valores genotípicos das famílias, procedeu-se os cálculos de distâncias e, posteriormente, às análises de agrupamento das progênies, de modo a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os grupos formados, pelo método hierárquico de Ward.

O agrupamento pelo método não hierárquico K-means foi aplicado para agrupar as famílias em K grupos, onde o valor de K foi pré-definido com base no número de grupos identificados no agrupamento hierárquico de Ward.

A análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada com a finalidade de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de variabilidade entre as famílias.

Na ACP o número de componentes principais foi definido de forma a explicar pelo menos 70% da variabilidade observada nos dados.

Essas análises foram realizadas com os softwares Python (Python Software Foundation, 2023) e Statistica 7.0 (StatSoft, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito de progênies foi significativo ($p < 0,01$) para todos os caracteres, exceto para densidade básica da madeira (DBM). Já o efeito de procedências foi não significativo ($p > 0,05$) para todos os caracteres, indicando a baixa influência da origem das sementes sobre os caracteres na idade avaliada e condições experimentais. Com isso, as estimativas de herdabilidade individual (h^2g) e da média de progênies (h^2m) foram de alta magnitude ($> 30\%$) para a maioria dos caracteres, menos para densidade básica da madeira (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de ‘Deviance’ (valores LRT – teste de razão de verossimilhança) e estimativas dos parâmetros genéticos para diferentes caracteres avaliados em progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade.

Efeito	DAP	ALT	VCC	VSC	DBM	BIOML	CEL	LIG
Progênies	32,04**	12,37**	21,01**	20,75**	0,50 ^{ns}	19,43**	208,02	125,16
Procedência	1,53 ^{ns}	1,73 ^{ns}	2,94 ^{ns}	2,79 ^{ns}	1,53 ^{ns}	3,81 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,48 ^{ns}
σ^2g	3,0598	2,7292	0,0016	0,0013	0,0001	486,6946	11,6823	3,9721
σ^2proc	0,7267	0,7360	0,0006	0,0005	0,0001	238,4790	0,0151	0,3489
σ^2e	2,5409	5,1259	0,0020	0,0016	0,0010	636,6964	0,4948	0,5325
σ^2f	6,3273	8,5911	0,0042	0,0033	0,0011	1361,8700	12,1923	4,8535
h^2g	0,4836 +- 0,1796	0,3177 +- 0,1455	0,3819 +- 0,1596	0,3822 +- 0,1596	0,0640 +- 0,0653	0,3574 +- 0,1544	0,9582 +- 0,2527	0,8184 +- 0,2336
h^2proc	0,1148	0,0857	0,1506	0,1452	0,0590	0,1751	0,0012	0,0719
h^2mp	0,7832	0,6150	0,7103	0,7081	0,1795	0,6963	0,9861	0,9572
Ac_prog	0,8850	0,7842	0,8428	0,8415	0,4236	0,8345	0,9930	0,9784
CVe%	10,22	13,80	30,09	30,86	4,98	31,08	1,55	3,35
Média Geral	15,59	16,40	0,1475	0,1282	0,6309	81,171	45,30	21,80

DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca (m³ árvore⁻¹); VSC: volume comercial sem casca (m³ árvore⁻¹); DBM: densidade básica da madeira (Kg cm⁻³); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore⁻¹); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%); σ^2g : variância genotípica; σ^2proc : variância entre procedências; σ^2e : variância residual; σ^2f : variância fenotípica; h^2g : herdabilidade de parcelas individuais dos efeitos genotípicos; h^2proc : herdabilidade de procedência; h^2mp : herdabilidade média; Ac_prog: acurácia da seleção; CVe%: coeficiente de variação experimental. **, ^{ns} - Valores significativos (p<0,01) e não significativos (p>0,05) pelo teste χ^2 .

Sebbenn et al. (2007), estudando esse mesmo teste aos 21 anos de idade, encontraram estimativas de herdabilidade em nível de média de progênies inferiores ao observado no presente estudo, para todos os caracteres de crescimento. Isso pode ser devido à mortalidade de progênies com características inferiores, pois, a seleção natural pode favorecer o desenvolvimento de algumas progênies e prejudicar outras.

Esses resultados indicam que as diferenças genéticas entre os indivíduos têm um papel importante na variação das características, mas os fatores ambientais exercem influência, como pode ser notado em diversas espécies florestais, principalmente considerando a idade avançada do teste (Reis et al., 2023). As estimativas de herdabilidade obtidas neste estudo indicam um controle genético significativo sobre os caracteres analisados, o que torna o processo de seleção mais facilitado (Cruz et al., 2020).

As estimativas da acurácia da seleção (Ac_{clon}) seguiram a mesma tendência das estimativas de herdabilidade (Tabela 1), o que indica maior confiabilidade na seleção de progênies superiores a partir dos caracteres: diâmetro à altura do peito (DAP), altura (ALT), volume com (VCC) e sem casca (VSC), biomassa do lenho (BIOML) e teores de celulose (CEL) e lignina (LIG). Com isso, pode-se considerar para esses caracteres, que há relação forte entre o fenótipo observado e o valor genético verdadeiro. Em outras palavras, indica que a avaliação fenotípica dos indivíduos reflete sua constituição genética subjacente, com implicações positivas no melhoramento genético, pois a acurácia é diretamente proporcional ao ganho genético, sendo assim, quanto maior a acurácia na avaliação de um indivíduo, maior é a confiança na avaliação e no valor genético predito deste indivíduo (Resende e Alves, 2021).

As estimativas das correlações entre os valores genotípicos dos caracteres avaliados foram positivas e de alta magnitude ($r > 0,78$) para os caracteres de crescimento (DAP, altura, volume e biomassa). Já para as características da madeira (densidade e teores de lignina e celulose), as correlações foram baixas (Figura 4). Oliveira et al. (2021), analisando clones de *Eucalyptus* spp., também encontraram alta correlação genética entre os caracteres DAP, altura e volume, demonstrando que é possível realizar seleção indireta com vista ao ganho em volume por meio do caráter DAP.

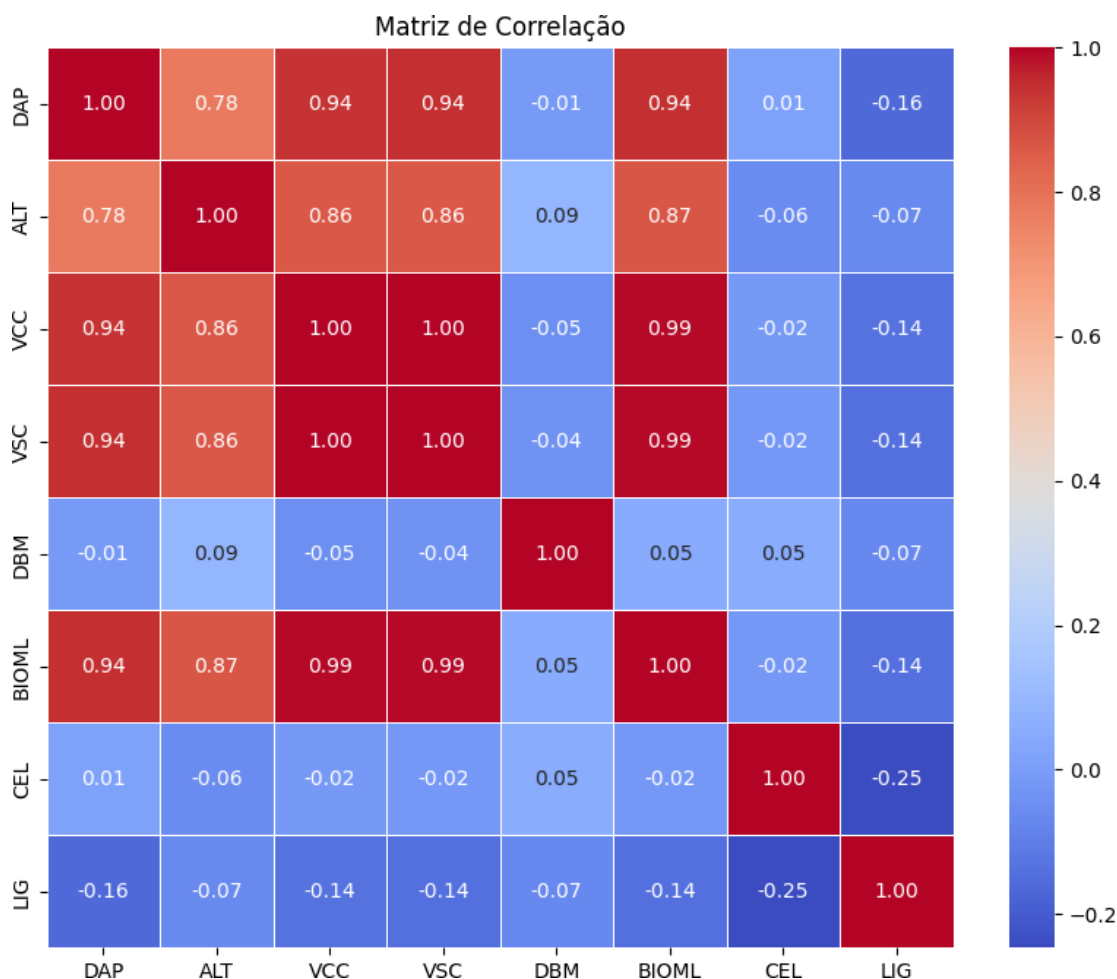


Figura 4. Mapa de calor das correlações dos valores genotípicos das progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências. DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG – teor de lignina (%).

A correlação é uma medida estatística que indica a relação entre dois caracteres e descreve como as variações em um estão associadas às variações em outro. Assim, correlação positiva significa que os dois caracteres variam na mesma direção, seja em termos de aumento ou de redução. Na correlação negativa, à medida que um caráter aumenta, o outro tende a diminuir, ou seja, se movem em direções opostas. No entanto, é importante ressaltar que correlação não implica causalidade, mesmo que dois caracteres estejam correlacionados não significa necessariamente que um exerce efeito sobre o outro, exceto quando ocorre pleiotropia (Kiernan, 2014).

A forte correlação entre altura (ALT), diâmetro (DAP), volume (VCC e VSC) e biomassa (BIOML), indica que esses caracteres de crescimento possuem uma correspondência muito forte. Além disso, estão associados ao fato de que as árvores crescem em diâmetro à medida que aumentam de altura e, conseqüentemente, em volume e biomassa de madeira. Pereira et al. (2023), em seu estudo com plantas jovens de carvalho-brasileiro (*Roupala brasiliensis*), encontraram correlação fenotípica muito forte, enquanto a genética foi forte, o autor ressalta que, dado a tenra idade das plantas, o recomendável é estimar estas correlações em diferentes idades em experimentos de campo.

Quanto aos caracteres da madeira (densidade básica, lignina e celulose) existe correlação baixa e negativa. Soares et al. (2014) trabalhando com híbridos de eucalipto encontraram valores semelhantes, com correlação intermediária e positiva entre lignina e densidade, mas negativa entre lignina e celulose.

Ao avaliar o mapa de dispersão dos valores genotípicos, para as 40 progênies de polinização aberta de *B. riedelianum* nota-se que os valores genotípicos da DBM, LIG e CEL não apresentam tendência definida e correlacionada com os demais caracteres, indicando a ausência de correlação linear entre esses caracteres. Por outro lado, para os demais caracteres avaliados, observa-se novamente correlação forte e positiva (Figura 5).

Na Tabela 2 são apresentadas as médias genotípicas das procedências, para os oito caracteres avaliados. É possível observar que Alvorada do Sul possui as progênies com as melhores características e maiores médias, enquanto Bauru possui as menores, assim como relatado por Amorim et al. (2020). Ressalta-se, contudo, no presente estudo que as diferenças entre as procedências foram não significativas.

Observando o mapa de distância Euclidiana, nota-se que as maiores dissimilaridades entre as progênies ocorreram naquelas pertencentes às procedências 1 (Alvorada do Sul) e 3 (Bauru) (Figura 6). Isso ocorreu, pois as progênies provenientes de Alvorada do Sul (PR) possuem características superiores às de Bauru (SP), a qual possui as progênies com características inferiores aos demais.

Já, as progênies provenientes de Gália (SP), apresentaram características intermediárias, ora se assemelhando mais às de Alvorada do Sul, ora às de Bauru. Esses resultados diferem dos obtidos por Aguiar et al. (2019) que, aplicando o

mesmo teste para essas progênies aos 27 anos de idade, observaram inferioridade nas progênies de Bauru.

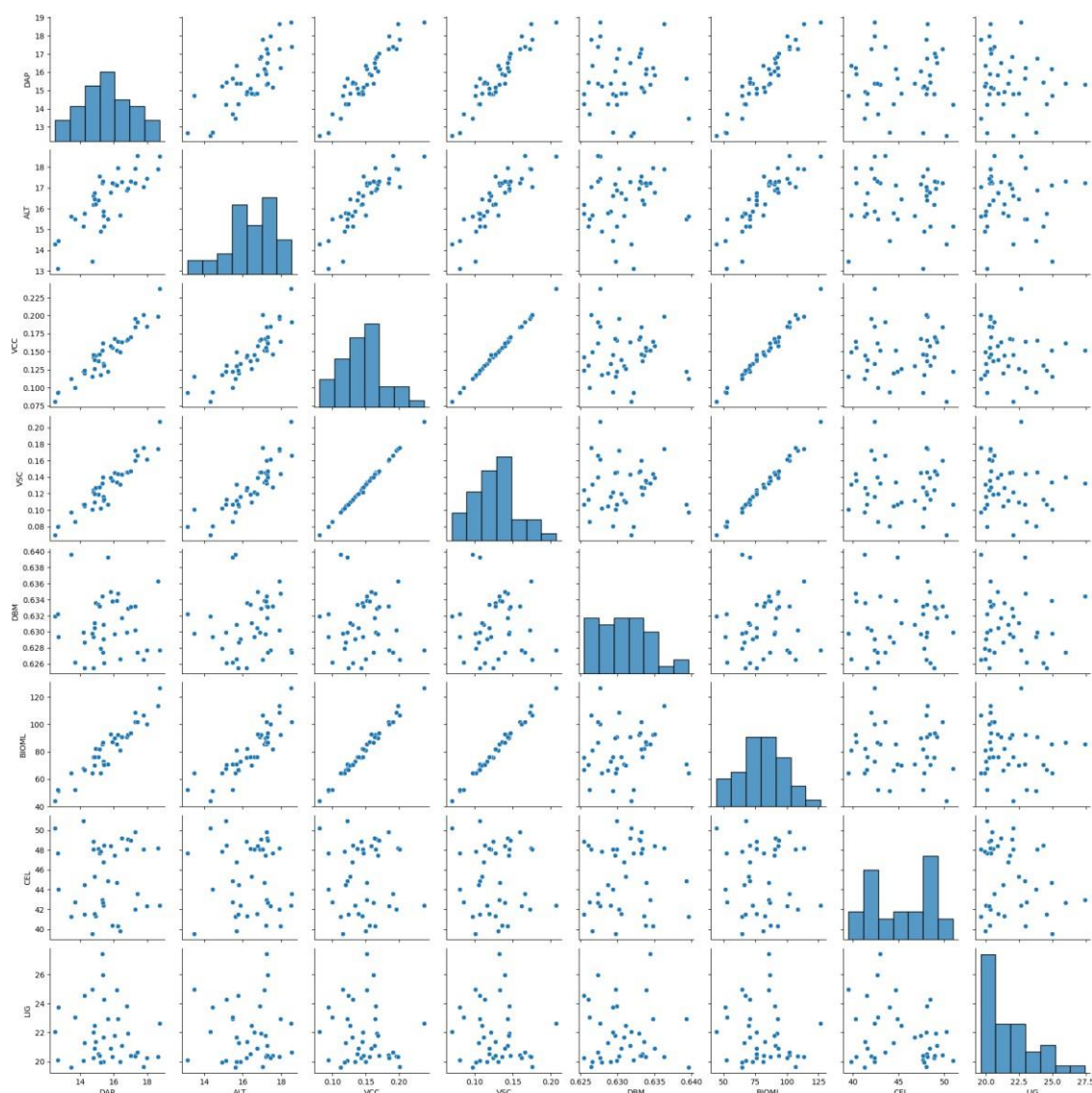


Figura 5. Mapa de dispersão dos valores genotípicos dos caracteres avaliados em 40 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências. DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%).

Tabela 2. Médias genotípicas dos caracteres avaliados em cada uma das procedências, em 40 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade

Procedência	Caracteres							
	DAP	ALT	VCC	VSC	DBM	BIOML	CEL	LIG
Alvorada do Sul	15,98	16,67	0,1543	0,1344	0,632	84,632	46,10	22,41
Gália	15,49	16,43	0,1465	0,1273	0,631	80,688	45,03	21,69
Bauru	15,48	16,24	0,1446	0,1256	0,630	79,738	45,09	21,58

DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%).

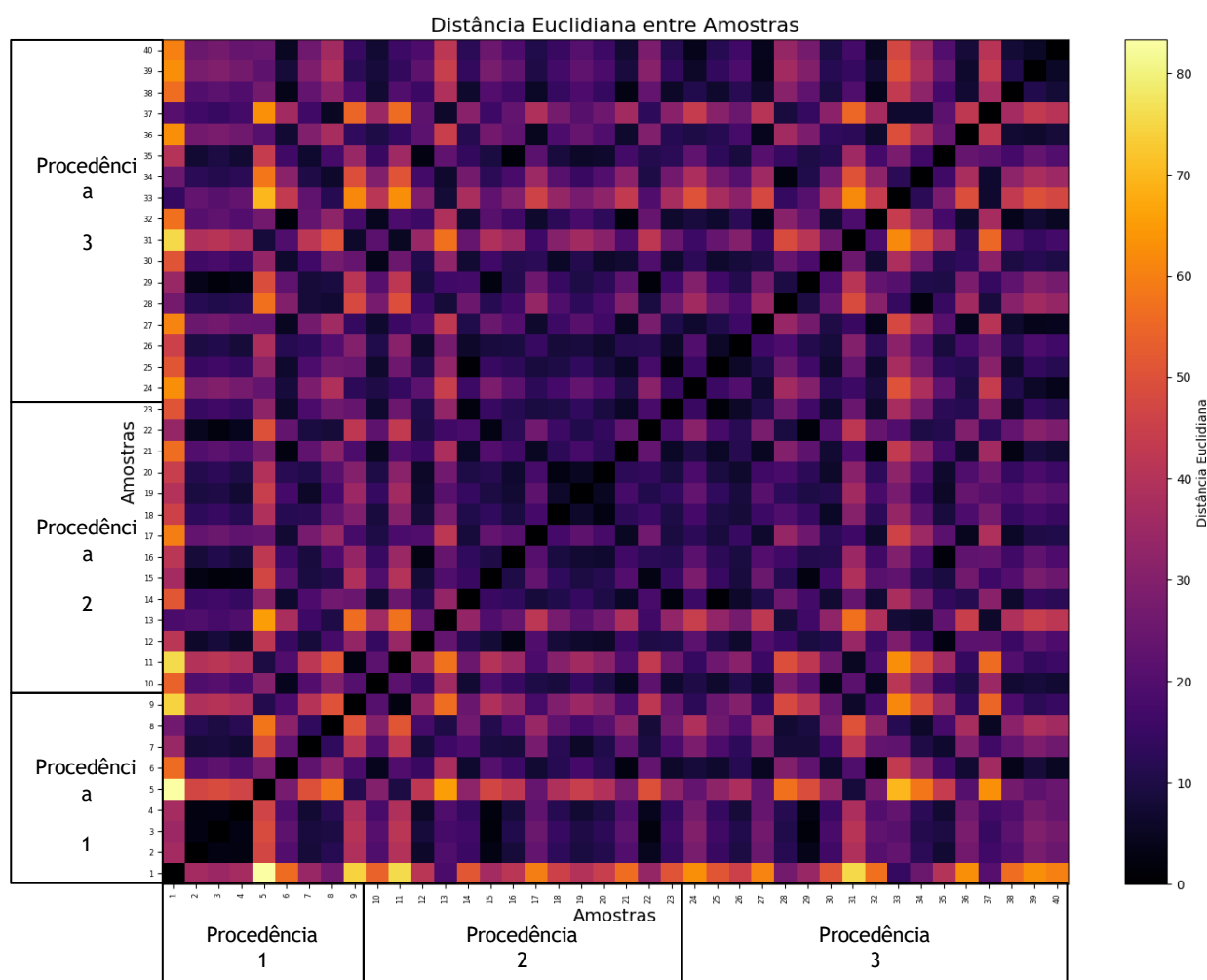


Figura 6. Matriz de distância Euclidiana obtida a partir de oito caracteres avaliados em progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências.

Na análise de agrupamento pelo método de agrupamento de Ward houve a formação de quatro grupos, considerando-se as mudanças no padrão de agrupamento (Figura 7). O primeiro grupo (Grupo 1) foi o mais numeroso, constituído por 16 progênies (5, 6, 9, 11, 14, 17, 21, 23, 24, 27, 31, 32, 36, 38, 39 e 40), ou seja, 40% das progênies avaliadas, o Grupo 2 representa 22,5% das progênies avaliadas, com 9 progênies em sua formação (7, 10, 12, 16, 18, 19, 20, 30 e 35), o Grupo 3 com 10 progênies (2, 3, 4, 8, 15, 22, 25, 26, 29 e 33) representa 25% das progênies em estudo e o Grupo 4, com 5 progênies (1, 13, 28, 34 e 37) detém 12,5% das progênies.

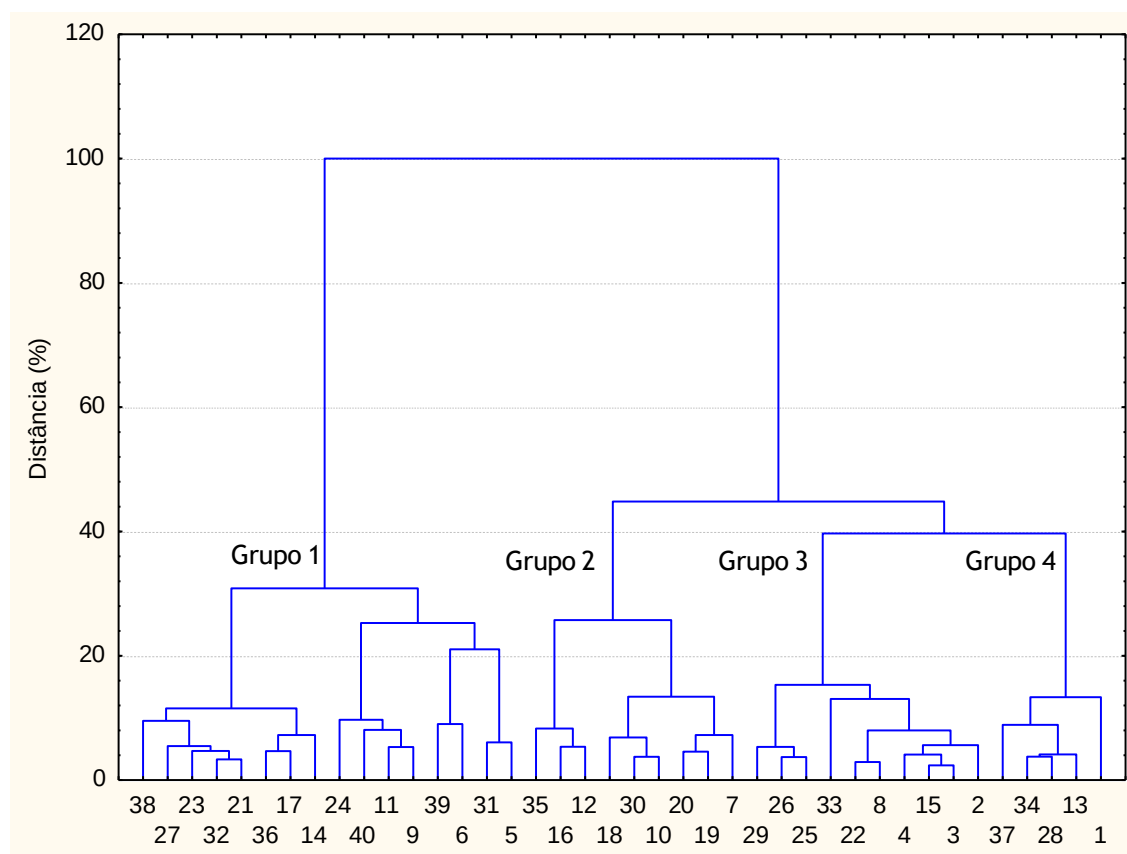


Figura 7. Dendrograma de Ward, baseado na Distância Euclidiana entre 40 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum*, pertencentes a três procedências, avaliadas quanto a oito caracteres aos 36 anos de idade.

Considerando-se as médias genotípicas dos caracteres em cada grupo formado pelo método de Ward, observa-se que não há diferença entre os grupos para DBM. Desconsiderando-se a DBM, os quatro grupos formados são distintos entre si, o Grupo 1 apresenta as menores médias para os caracteres de crescimento e produtividade e o segundo maior valor para os teores de lignina e celulose; o Grupo 2, possui o menor teor de celulose e o maior de lignina e é o

segundo menos produtivo e de menor crescimento, ficando atrás apenas do Grupo 1. O Grupo 3, possui o maior teor de celulose e a maior DBM, sendo o segundo de maior crescimento e produtividade; o Grupo 4 possui as maiores médias para crescimento e produtividade, a menor DBM e teor de lignina e valores intermediários de celulose (Tabela 3, Figura 7).

Tabela 3. Médias genotípicas dos caracteres avaliados em cada um dos grupos formados pelo método de Ward, em 40 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum*, pertencentes a três procedências, avaliadas aos 36 anos de idade.

Grupo	DAP	ALT	VCC	VSC	DBM	BIOML	CEL	LIG
1	14,42	15,29	0,1198	0,1033	0,6302	65,64	45,49	22,07
2	15,62	16,82	0,1502	0,1310	0,6316	83,33	41,79	22,65
3	16,52	17,15	0,1658	0,1446	0,6323	92,41	48,49	21,17
4	17,84	17,90	0,2021	0,1766	0,6279	108,82	43,67	20,71

DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%).

No método não-hierárquico de *K-means* (Figura 8), o número de grupos foi pré-definido a partir do agrupamento de Ward. Houve alteração na composição dos grupos entre os dois métodos, mas de certa forma, confirmando a consistência do padrão de agrupamento das progênies.

Pode-se inferir através dos resultados obtidos nesse agrupamento, que fica evidente a superioridade do Grupo 4 no agrupamento de *K-means* para os caracteres de crescimento (DAP, altura, volume e biomassa) e o menor teor de celulose, concordando com os resultados obtidos entre progênies individualmente e pelo agrupamento de Ward. Observa-se, também, que o Grupo 3, como o segundo de maior DBM e em teor de lignina, é o de menores médias para os demais caracteres; já os Grupos 1 e 2 possuem características intermediárias para a maioria dos caracteres, mas o Grupo 1 possui o maior teor de celulose e o Grupo 2 o maior teor de lignina.

Das 13 progênies do Grupo 1, definido pelo método de *K-means*, 9 pertencem ao Grupo 1 de Ward, além de incluir uma progênie (25) do Grupo 3 e três progênies do Grupo 2 de Ward. O Grupo 2 de *K-means* tem 14 progênies, e possui uma correspondência com os Grupos 2 e 3 de Ward, com os quais compartilha 6 e 7 progênies, respectivamente, além de uma progênie do Grupo 1

de Ward. As seis progênies que constituem o Grupo 3 de K-means estão inseridas no Grupo 1 de Ward e o Grupo 4 de K-means contém as 5 progênies do Grupo 4 além de 2 progênies do Grupo 3 de Ward (Figuras 4 e 5). Diante disso, pode-se considerar pela alta correspondência entre os métodos de agrupamento de Ward e de K-means.

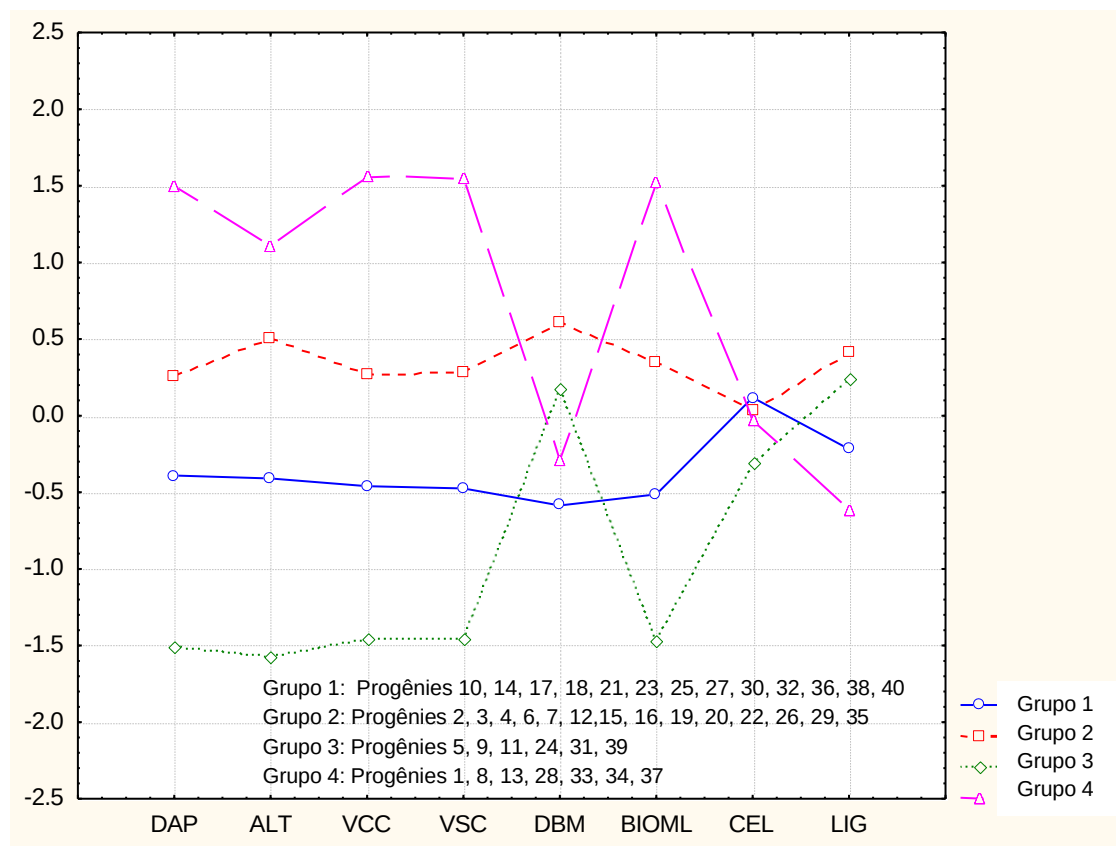


Figura 8. Caracterização dos grupos pelo método de K-means formados a partir da avaliação de oito caracteres em 40 famílias de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências. DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%).

Na dispersão das progênies a partir da análise de componentes principais (Figuras 9 e 10), os três primeiros componentes (CP1, CP2 e CP3) explicam 87,3% da variância total sendo, portanto, representativos para o estudo da divergência por meio do padrão de dispersão da variabilidade. DAP, ALT, BIOML, VCC e VSC apresentam grande poder discriminatório no CP1, no CP2, os teores de celulose (CEL) e de lignina (LIG) são os de maior poder discriminatório e, portanto, esse

componente está relacionando à composição química da madeira, porém CEL e LIG atuam de forma oposta. O CP3 é representado pela DBM, com maior poder discriminatório.

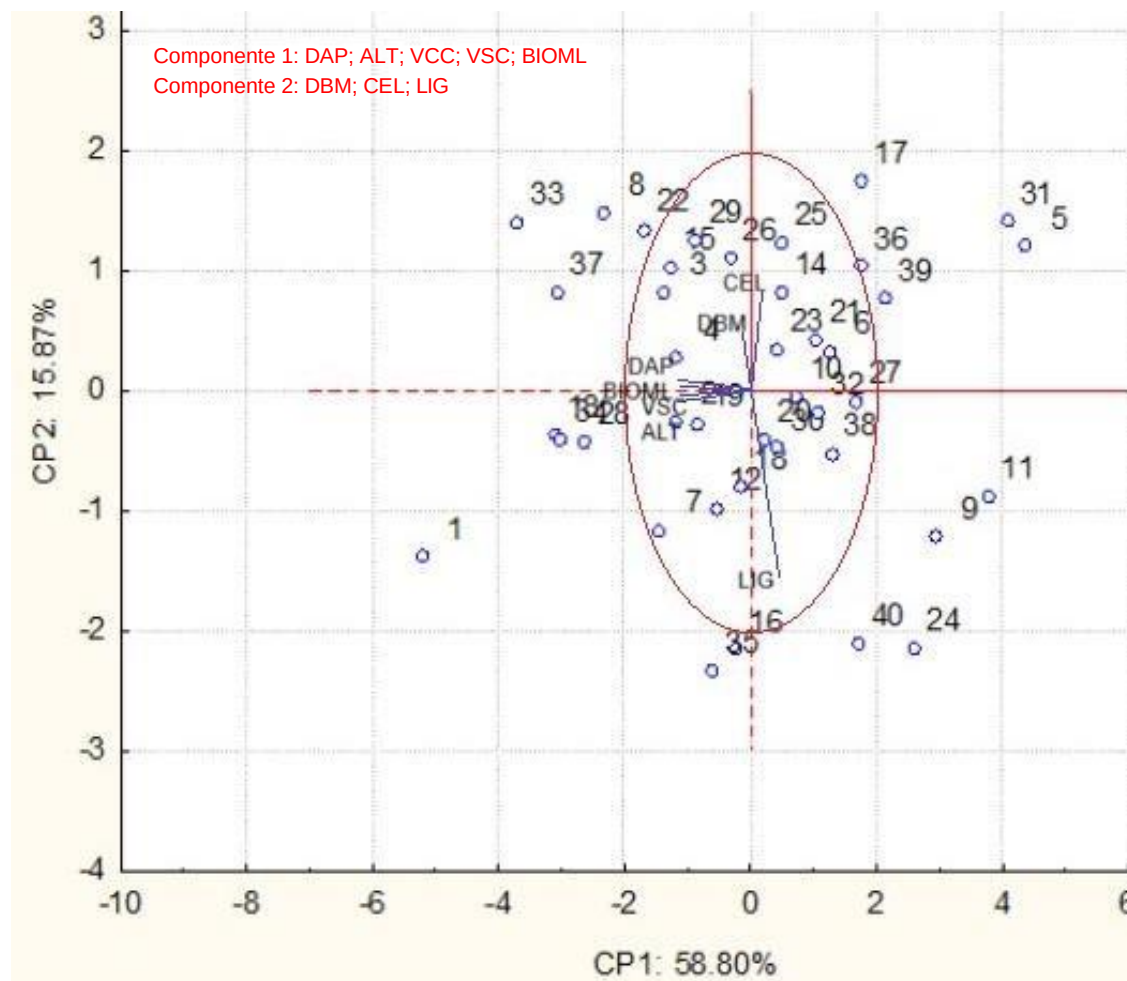


Figura 9. Gráfico biplot com a dispersão de 40 famílias de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências para os oito caracteres avaliados nos componentes principais 1 e 2 (CP1/CP2). DAP: Diâmetro à Altura do Peito (cm); ALT: altura total (m); VCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); VSC: volume comercial sem casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%).

Os caracteres que se destacaram para os três componentes principais desempenham papel crucial na seleção das progênies mais promissoras, no caso de utilização em programas de melhoramento. As características mais fortemente correlacionadas com o CP1 estão relacionadas ao crescimento e produtividade, conforme comentado anteriormente, tornando-o um componente principal associado à seleção de progênies mais produtivas. Caso o interesse seja priorizar o teor de lignina, deve-se selecionar progênies localizadas na parte inferior à direita da Figura 9, pois possuem os maiores teores de lignina. No entanto, é necessário cautela nas tomadas de decisões, pois, as correlações entre crescimento e

características da madeira podem variar com a população e local (Chen et al., 2018).

As progênies localizadas dentro da elipse (Figuras 9 e 10) têm comportamentos intermediários, com poucas diferenças significativas entre si, tornando-as mais generalistas. Por outro lado, as que se encontram fora da elipse se destacam por características específicas e, por esse motivo, merecem atenção especial nos programas de melhoramento. Assim, buscando-se associar simultaneamente maiores valores de DBM, deve-se priorizar para seleção as progênies localizadas preferencialmente na parte superior à esquerda em CP3 (Figura 10), ou seja, as progênies 7 e 33, que também têm boa produtividade. Deste modo, estas progênies são as promissoras e com potencial de aumentar a média genotípica desses dois caracteres.

Para que se consiga selecionar indivíduos com boa produtividade em biomassa e maiores teores de celulose, deve-se priorizar aquelas progênies localizadas na parte superior e à esquerda da Figura 9 (progênies 8, 22, 33 e 37), pois associam esses caracteres de interesse. Essas progênies compõem o grupo 4 na análise pelo método de *K-means* (Figura 8) e os grupos 3 e 4 pelo método de Ward (Figura 7).

Diferentes métodos de análise multivariada foram utilizados para comparar os resultados, a fim de identificar com maior precisão as progênies com desempenhos semelhantes e divergentes. O número de grupos formados em estudos de divergência genética é influenciado por diversos fatores, incluindo a técnica de formação dos grupos, a medida de distância e o método de agrupamento utilizados, bem como o germoplasma considerado em termos de número de acessos e a variabilidade genética presente, além do número e tipo de caracteres avaliados. Todos os grupos formados, independentemente do método de agrupamento adotado, foram constituídos por progênies das diferentes procedências, evidenciando o pequeno efeito da fonte de sementes para os caracteres estudados nas condições do teste. Também, os métodos foram consistentes na composição dos grupos e na identificação das progênies superiores.

Apesar do pequeno número de grupos identificados, há relativa variabilidade genética entre as progênies estudadas. Isso permite inferir que as progênies analisadas, mesmo aquelas pertencentes a uma mesma procedência,

apresentam baixo grau de parentesco, o que é uma característica relevante em programas de melhoramento genético, uma vez que a seleção de indivíduos mais distintos e com maior diversidade genética pode ser mais desafiadora nesse contexto específico. Assim, foi possível observar diferenças significativas entre as famílias, no entanto, não entre as procedências, indicando a importância de maiores esforços para amostrar mais famílias dentro de populações da espécie.

CONCLUSÕES

A divergência genética entre as 40 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* está relacionada às características de crescimento e da madeira, mas não à densidade básica da madeira.

Os caracteres avaliados não são influenciados pela fonte ou procedência das sementes.

Os grupos de progênies identificados podem ser empregados em estratégias de melhoramento a fim de selecionar progênies com características superiores, visando obter ganhos genéticos em produtividade e qualidade sem prejudicar a densidade básica da madeira, de acordo com os objetivos específicos do programa de melhoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, BI, Gandara, FB, Freitas, MLM, Moraes, MLT, Kageyama, PY, Sebbenn, AM (2019) Validation of microsatellite loci for *Balfourodendron riedelianum* through analysis of Mendelian inheritance, genetic linkage, and genotypic linkage disequilibrium. **Silvae Genetica** 68:81-84.

Amorim EP, Melo RAP, Longui EL, Yamaji FM (2020) Potencial bioenergético das madeiras de *Balfourodendron riedellianum* (Engl.) Engl. aos 30 anos e *Peltophorum dubium* (spreng.) taub. aos 32 anos provenientes de plantios homogêneos. **Revista do Instituto Florestal** 32:117–127, 2020. DOI: 10.24278/2178-5031.202032201. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/article/view/60>. Acesso em: 27 abr. 2024.

Carvalho PER (2004) Pau-marfim, *Balfourodendron riedelianum*. **Circular técnica Embrapa Florestas** 93:1-11.

Chen S, Weng Q, Li F, Li M, Zhou C, Gan S (2018) Genetic parameters for growth and wood chemical properties in *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* hybrids. **Annals of Forest Science** 75(1):2-11. <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-018-0694-x>.

CLIMATE-DATA. ORG. (2023) **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/sao-paulo/luis-antonio-34805/>

CNCFLORA (2013) *Balfourodendron riedelianum* in **Lista Vermelha da flora brasileira** versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Balfourodendronriedelianum>>. Acesso em 11 julho 2023.

Cruz SL, Pedrozo CA, Oliveira VXA, Silva AM, Resende MDV, Gonçalves DA (2020) Parâmetros genéticos e seleção inicial de procedências e progênies de taxi-branco (*Tachigali vulgaris*) em Roraima. **Ciência Florestal** 30:258-269.

Degen B, Sebbenn AM (2014) Genetics and Tropical Forest. In: Pancel L., Köhl M. **Tropical Forest handbook** 1:1–30.

Dos Santos AR, Ribeiro CAAS, De Oliveira Peluzio, et al. (2016) Geotechnology and landscape ecology applied to the selection of potential Forest fragments for seed harvesting. **Journal of environmental management** 183:1050-1063. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.073>.

Gomide JL, Demuner BJ (1986) Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel** 47:36-38.

Goudie AS (2018) The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present and Future. **John Wiley& Sons**.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN (2019) **Red List of Threatened Species**. 1998: e.T32987A9741568. Version 2015-4. Available at: <<https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>>. Acessado em Novembro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (2021) **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (Pevs 2021)**. disponível em: [<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html>], acesso em 12 de maio de 2023. 2021.

Kiernan D (2014) Chapter 7: Correlation and Simple Linear Regression in. KIERNAN, DIANE. **Natural Resources Biometrics**. Attribution – Non Commercial –Share Alike CC BY-NC-SA.

Oliveira LGM, Marques A, Lopes E D, Gonçalves JF, Martins NS, Pena CAA, Arbex DC, Laia ML (2021) Produtividade, adaptabilidade e estabilidade genotípica de clones de *Eucalyptus spp.* e *Corymbia spp.* em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, 49(131):e3664. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.21>

Pereira BLC, Carvalho AMMLC, Oliveira AC, Santos LC, Carneiro ACO, Magalhães MA (2023) Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal** 26:545-557. 2016.<https://doi.org/10.1163/22941932-bja10118>.

Pereira FB, Boshier DH, Rossini BC, Marino CL, Freitas MLM, Silva EV, Melchert GF, Sperotto J, Tambarussi EV (2023) Estimativas de parâmetros genéticos para crescimento em progênies de duas procedências de *Roupala montanavar. brasiliensis* (proteaceae). **Revista Instituto Florestal** 35:113-123. <http://doi.org/10.24278/2178-5031.202335107>

Pirani JR, Groppo M, Dias P (2020) Rutaceae in Flora do Brasil 2020 em construção. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: [HTTP://florado.Brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343](http://florado.Brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343). Acesso em 12 de dezembro de 2020.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION (2023) Python Language Site: Documentation, 2023. Página de documentação. Disponível em: <https://www.python.org/doc/>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

Quintella F, Da Rosa CA, Feijo, A (2020) Updated and annotated checklist of recent mammals from Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 92. Doi: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191004>

Reis CAF, Santos AM, de AssisTF (2023) **Contexto mundial do melhoramento genético da teca**.

Resende MDV (2007). **SELEGEN-REML/BLUP**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas, 259p.

Resende MDV, de Alves RS (2021) Genética: estratégias de melhoramento e métodos de seleção. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 3. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1131863>

Santos CR, Sansígolo CA (2000) Métodos não-normatizados para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-AQ. **Iberoamerican Congress on Pulp andPaper**, 13p.

Sebbenn AM, Freitas MLM, Zanatto ACS, Moraes E, Moraes MA (2007) Conservação ex situ e pomar de sementes em banco de germoplasma de *Balfourodendron riedelianum*. **Revista Instituto Florestal** v19:101-112.

Silva LFL, De Souza DC, Resende, LV, Gonçalves WM (2018) Manejo de recursos genéticos vegetais. **Anais Da Academia Pernambucana De Ciência Agronômica** 15(1):109–126. Recuperado de <https://journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/1824>

Soares CPB, Paula Neto F, Souza AL (2006) **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p

Soares VC, Bianchi ML, Truguilho PF, Pereira AJ, Höfler J (2014) Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto, **Revista Árvore** 38:543-549.

SOS - Mata Atlântica (2021) Amazônia têm áreas de cobertura florestal em situação tão crítica quanto a mata atlântica, bioma mais devastado do país. **Notícias** - 2021. Disponível: <https://www.sosma.org.br/noticias/amazonia-tem-areas-de-cobertura-florestal-em-situacao-tao-critica-quanto-a-mata-atlantica-bioma-mais-devastado-do-pais>

StatSoft Inc. (2004) STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 7.

Vital BR (1984) **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 21p. (Boletim técnico,1)

Vital BR, Carneiro, ACO, Pereira BLC (2013) Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos, F.; Colodette, J. L.; Queiroz, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais** 1:321-354.

CAPÍTULO 3 – Propriedades da madeira de *Balfourodendron riedelianum* em função da procedência

RESUMO – A madeira de *Balfourodendron riedelianum* é moderadamente pesada e adequada para uso na construção civil, marcenaria e produção de painéis, de forma que essa espécie tem potencial para ser utilizada em plantios comerciais. No entanto, estudos de qualidade da madeira de *B. riedelianum* oriunda de áreas de plantios ainda são incipientes. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades da madeira de *B. riedelianum* em função de três procedências (Alvorada do Sul-PR, Gália e Bauru, SP) plantadas em Luiz Antônio, SP. Após 36 anos do plantio, abateram-se 60 árvores, 20 de cada procedência. De cada árvore abatida foi retirada uma tora de 1 m de comprimento da base da mesma, e obtidas amostras para avaliar as seguintes características físico-mecânicas da madeira: densidade básica, densidade aparente, retração volumétrica, coeficiente de anisotropia, resistência à compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento paralela às fibras, módulo de ruptura e módulo de elasticidade. Constatou-se que nenhuma das características avaliadas foi influenciada pela procedência das sementes. Em termos de seleção de árvores de *B. riedelianum* para utilização da madeira, embora não haja diferenças significativas das propriedades da madeira entre procedências, essas características podem ser importantes quando se pretende produzir produtos madeireiros que requerem pouca variabilidade em propriedades em função da qualidade da madeira pretendida.

Palavras-chave: madeira nativa; densidade da madeira; resistência mecânica; qualidade da madeira.

Properties of *Balfourodendron riedelianum* wood according on origin

ABSTRACT – *Balfourodendron riedelianum* wood is moderately heavy and excellently suited for use in civil construction, carpentry, and panel production, so this species has the potential to be used in commercial plantations. However, studies on the quality of *B. riedelianum* wood from plantation areas are still incipient. Therefore, the objective of this work was to characterize the properties of *B. riedelianum* wood according to three origins (Alvorada do Sul-PR, Gália and Bauru, SP) planted in Luiz Antônio, SP. After 36 years of planting, 60 trees were felled, 20 from each source. From each felled tree, a 1 m long log was removed from its base and samples were obtained to evaluate the following physical-mechanical properties of the wood: basic density, apparent density, volumetric shrinkage, anisotropy coefficient, resistance to compression parallel to the fibers, shear strength parallel to the fibers, modulus of rupture and modulus of elasticity. None of the characteristics evaluated were influenced by the origin of the seeds. In terms of selecting *B. riedelianum* trees for wood use, although there are no significant differences in wood properties between origins, these characteristics can be important when intending to produce wood products that require little variability in properties depending on wood quality. intended.

Keywords: native wood; wood density; mechanical resistance; wood quality.

INTRODUÇÃO

O desmatamento emergiu como uma preocupação ambiental primordial em nações abundantemente florestadas, como Tailândia, Indonésia e Brasil. O que uma vez foi um fenômeno marginal cresceu para uma escala alarmante, afetando a vegetação, a qualidade do ar, a capacidade de absorção e reflexão atmosférica, a permeabilidade do solo e os corpos d'água que sustentam nosso planeta (Cabral, 2013). O ano de 2020 registrou um recorde no desmatamento no Bioma Amazônia, sendo o maior dos últimos 10 anos, com um aumento de 30% em comparação com 2019, quando foram derrubados 6.200 km² (IMAZON, 2024).

No Brasil, a Mata Atlântica foi o primeiro bioma a sofrer com a ameaça do desmatamento, que teve início com a chegada dos europeus. Desde então, atividades como a extração do Pau-brasil, agricultura e pecuária intensiva têm sido constantes nesse bioma. Contudo, foi no século XX que o desmatamento e a exploração madeireira atingiram níveis mais alarmantes, reduzindo a extensão da Mata Atlântica para apenas 12% de sua cobertura original (Santos et al., 2020).

Uma das formas de recuperar as áreas degradadas é através da interferência humana utilizando o reflorestamento com espécies nativas e, com isso, garantir a reversão do desmatamento e a proteção das florestas e da biodiversidade do ecossistema, gerando atividades lucrativas e sustentáveis, além de produzir diversos produtos madeireiros ou não-madeireiros, bem como serviços que contribuem diretamente para a economia do país como um todo. A madeira é um recurso renovável e um dos mais importantes materiais para uso industrial, sendo que retém carbono, é biodegradável, permite uma grande variedade de aplicações e requer pouca energia na manufatura (Carvalho, 2021).

Segundo Ganem (2017), dada a capacidade de adaptação da vegetação às condições do solo e do clima, o manejo florestal sustentável emerge como uma alternativa viável para a recuperação das espécies. Além disso, ele pode simultaneamente assegurar a segurança alimentar e complementar a renda das famílias que dependem desses recursos naturais.

Uma das espécies nativas que tem grande potencial para ser utilizada em reflorestamento ambiental e plantios comerciais é *Balfourodendron riedelianum*. Trata-se de uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica, com potencial para alcançar até 35 m de altura e um diâmetro de tronco, a 1,30 m do solo, de 100 cm. Suas flores são hermafroditas e polinizadas por pequenos insetos, enquanto suas sementes são dispersas pelo vento (Carvalho, 2004). Sua distribuição geográfica abrange uma vasta área no Brasil, desde o estado de Minas Gerais até o Rio Grande do Sul, estendendo-se, também, até o Paraguai e Argentina (Pirani et al., 2020).

Reconhecida por sua madeira de excelente qualidade, essa espécie é utilizada na construção civil, marcenaria, em projetos paisagísticos e na recuperação de áreas degradadas (CNCFLORA, 2023). A madeira apresenta coloração branca ou levemente amarelada sem demarcação bem definida, enquanto o cerne é branco-palha-amarelado, escurecendo para amarelo-pálido-

uniforme. Apresenta superfície lisa, medianamente lustrosa, textura fina e grã geralmente regular, a madeira é moderadamente pesada sendo que a densidade aparente varia entre 800 e 900 kg m⁻³. Entretanto, a madeira tem baixa resistência ao apodrecimento e ao ataque de agentes xilófagos (Mainieri e Chimelo, 1989). Devido à exploração intensiva da madeira de pau-marfim e à fragmentação do bioma Mata Atlântica como um todo, a espécie foi incluída na lista de espécies ameaçadas de extinção (IUCN, 2019).

A madeira oriunda de plantios comerciais pode ser uma alternativa para ser usada na construção civil. No entanto, apesar do evidente potencial para essa finalidade e a demanda por construções de novas casas, o uso de madeira para habitação no Brasil é praticamente insignificante quando comparado aos edifícios tradicionais de alvenaria. Uma das dificuldades do uso seria o custo da fabricação de produtos madeireiros devido à escassez de madeira proveniente de florestas plantadas, com poucos fornecedores de madeira serrada estrutural (Araújo et al., 2018).

No presente trabalho, foram amostrados 60 indivíduos de *Balfourodendron riedelianum* com 36 anos de idade, oriundos de três procedências de sementes (Alvorada do Sul, PR; Gália, SP e Bauru, SP), plantadas na Estação Experimental de Luiz Antônio, em Luiz Antônio, SP. A hipótese analisada é que as árvores que crescem no mesmo local, mas de diferentes origens de sementes, manterão sua estrutura de madeira com base na informação genética moldada pelas condições climáticas do local de origem, apesar dos fatores abióticos presentes no ambiente de plantio. Assim, as propriedades físicas e mecânicas da madeira, mesmo tendo em conta a plasticidade devido às condições climáticas, devem refletir as diferenças entre as procedências. Para testar esta hipótese, os objetivos deste estudo foram determinar a densidade aparente, densidade básica e variação dimensional da madeira, e determinar a compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, módulo de elasticidade e módulo de ruptura. A principal contribuição e novidade deste trabalho residem na seleção de amostras de madeira de *Balfourodendron riedelianum* oriunda de plantio em função de diferentes procedências. Este é um importante resultado de gestão, pois é possível inferir o potencial de utilização industrial da madeira de acordo com seus requerimentos.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedência do material avaliado

Foram utilizados dados de um teste de procedências e progênies de polinização aberta de *B. riedelianum* (pau-marfim), a partir de uma área implantada em 1986, na Estação Experimental de Luiz Antônio, no município de Luiz Antônio (SP), pertencente à Fundação Florestal em parceria com o Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) do estado de São Paulo. A unidade localiza-se na latitude de 21°40' S, longitude de 47°49' W e altitude de 6.100 m. Durante o inverno, os níveis de precipitação são significativamente mais baixos em comparação com os verificados no verão. O clima é considerado Aw de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, com 22,5 °C de temperatura média, com variação de 19 a 24 °C. A precipitação anual é de 1286 mm, com variação de 21 mm em julho a 246 mm em janeiro (CLIMATE-DATA.ORG, 2023).

O teste é composto por três procedências (Alvorada do Sul, no estado do Paraná; Gália e Bauru, em São Paulo, Brasil) e foram avaliadas 19 progênies por procedência. O desenho experimental foi o delineamento em blocos completos casualizados, com 6 repetições e parcelas lineares de cinco plantas, no espaçamento 3 x 3 m, totalizando 1.710 plantas.

Para este estudo, aos 36 anos de idade, foram selecionadas 60 árvores, sendo 20 de cada uma das três procedências, cujos dados dendrométricos médios encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Procedência, idade, diâmetro à altura do peito (DAP) a 1,30 m do solo e altura total (ALT) das árvores de *Balfourodendron riedelianum*.

Tratamento	Procedência	Idade (anos)	DAP (cm)	ALT (m)
1	Alvorada do Sul-PR	36	16,91 (2,43)	17,50 (2,71)
2	Gália-SP	36	15,13 (1,88)	16,53 (2,19)
3	Bauru-SP	36	14,96 (2,59)	15,39 (3,25)

Obs.: Os valores entre parênteses são desvio padrão.

Antes da derrubada das árvores foi marcada a direção norte em cada uma delas. Das árvores escolhidas foi tomada a primeira tora, a partir da base, com 1 m de comprimento, adequadamente identificadas e marcadas. Posteriormente, essas

toras foram transportadas para a serraria da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, SP, onde foram desdobradas.

Em cada uma das toras desdobradas foram tiradas uma prancha central 7 cm de espessura. Das pranchas foram retirados sarrafos de 4 cm x 4 cm x 1 m, dos quais foram retirados os corpos de prova específicos para cada um dos ensaios físico-mecânico, realizados no Laboratório de Engenharia da Madeira da ESALQ/USP.

As variáveis estudadas foram densidade básica, densidade aparente, retração volumétrica, coeficiente de anisotropia, resistência à compressão, cisalhamento, módulos de ruptura e de elasticidade, conforme descrito abaixo.

Propriedades físicas da madeira

a) Densidade aparente (ρ_{ap})

Amostras de 2 x 2 x 3 cm foram obtidas dos sarrafos e secas até atingirem 12% de umidade, para a obtenção da densidade aparente. As dimensões das amostras foram aferidas com paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 cm, e a massa do corpo de prova foi obtida em balança digital semi-analítica, com sensibilidade de 0,01 g, seguindo as normas NBR 7190-3 adaptada (ABNT 2022).

b) Densidade básica (BD)

Para a obtenção da densidade básica foram utilizadas amostras de 3 x 2 x 5 cm e usado o método da balança hidrostática conforme NBR 11941 (ABNT 2003).

c) Variação dimensional da madeira

As retrações volumétricas (β_v), radial (β_r), tangencial (β_t) e o coeficiente de anisotropia (β_t/β_r) foram determinados utilizando-se de amostras 3 x 2 x 5 cm, conforme a norma NBR 7190-3 (ABNT 2022). O coeficiente de anisotropia foi obtido da relação da relação entre a retração tangencial e radial.

Propriedades mecânicas da madeira

Todos os ensaios mecânicos foram feitos com amostras secas, em ambiente com temperatura normalizada, até atingirem 12% de umidade, condição de referência padrão, de acordo com a recomendação da NBR7190-1 (ABNT 2022).

a) Compressão paralela às fibras (f_{c0})

Para se obter a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), foram utilizados corpos de prova de 2 x 2 x 3 cm, obtidos de cada sarrafo, num total de 60 unidades. Ensaios de compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaio, segundo a norma NBR 7190-3 adaptada (ABNT 2022).

b) Cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Na obtenção da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) foram utilizados corpos de prova com dimensões nominais de 2 x 2 x 3 cm, com 4 cm² na área de cisalhamento, de acordo com a norma NBR 7190-1 adaptada (ABNT 2022).

c) Flexão estática

Para resistência da madeira à flexão estática foram utilizados corpos de prova de 2 x 2 x 35 cm, obtidos de cada sarrafo. Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal de ensaio com velocidade de aplicação de carga de 10 MPa. Foi utilizada uma combinação da norma NBR 7190 (ABNT 1997), NBR 7190-1 (ABNT 2022) e a ASTM D143–94 (ASTM 1994), com dimensões (b x h) de 2 x 2 cm, para seção transversal e 30 cm de vão livre (L). Os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) em resistência à flexão estática foram obtidos simultaneamente.

Análise estatística

Para a análise estatística dos dados, inicialmente testou-se a homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett e a distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, ambos a 5% de significância. Posteriormente, foi feito o teste F de análise de variância obedecendo-se o delineamento experimental inteiramente ao acaso para estudo das propriedades da madeira. Utilizou-se o teste de Tukey para comparação de médias quando o teste F foi significativo a 5%.

Também foram feitas análises descritivas, teste de correlação de Pearson, e análise de regressão linear simples. As análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk, os resíduos foram considerados normais para todas as variáveis em estudo. Também pelo teste de Bartlett as variâncias foram consideradas homogêneas. Os resultados das análises de variâncias demonstraram que, com exceção do coeficiente de anisotropia ($\beta_t\beta_r$), a densidade básica (BD), densidade aparente (ρ_{ap}), retração volumétrica (β_v), resistência à compressão (f_{co}) e ao cisalhamento (f_{vo}) paralelo às fibras, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) não diferiram significativamente entre as procedências (Tabela 2; Figuras 1 e 2).

O valor médio da densidade básica foi 658 kg.m^{-2} e, portanto, a madeira de pau-marfim pode ser considerada de densidade média (Andrade e Jankowsky, 2015). Esse valor é semelhante ao observado por Mainieri e Chimelo (1989) e Lima et al. (2011), porém, inferior a 730 kg m^{-3} verificado por IPT (2023). A densidade aparente apresentou valor médio de 858 kg m^{-3} , semelhante ao obtido por Amorim et al. (2020), Assad et al. (2020) e IPT (2023). A retração volumétrica apresentou valor médio de 18,32%, sendo considerada alta por Carvalho (1996), e superior aos valores obtidos por Mainieri e Chimelo (1989) e IPT (2023). O coeficiente de anisotropia de 2,03 pode ser considerado alto, comparativamente ao observado por IPT (2023), estando essa madeira sujeita aos efeitos das variações dimensionais (Carvalho 1996), (Tabela 2; Figura 1).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para densidade básica (BD, kg.m^{-3}), densidade aparente (ρ_{ap} , kg.m^{-3}), retração volumétrica (β_v , %), coeficiente de anisotropia ($\beta_t\beta_r$), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0} , MPa), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0} , MPa), módulo de ruptura (MOR, MPa) e módulo de elasticidade (MOE, MPa) em madeira de *Balfourodendron riedelianum* de três procedências, aos 36 anos de idade.

Causa de variação	GL	Quadrado médio							
		BD	ρ_{ap}	β_v	$\beta_t\beta_r$	f_{c0}	f_{v0}	MOR	MOE
Procedência	2	2240 ^{ns}	7010 ^{ns}	10,82 ^{ns}	8748*	5,17 ^{ns}	4,41 ^{ns}	147,87 ^{ns}	449297 ^{ns}
Resíduo	57	1082	3813	4,95	1352	42,49	5,11	276,74	7354457
Média		658	858	18,32	2,03	60,28	18,95	129,49	9882
CV _e (%)		5,00	7,00	12,14	18,65	10,81	11,92	12,84	27,44

Em que: ^{n.s.} = não significativo ao nível 5% pelo teste F. CV_e = coeficiente de variação experimental.

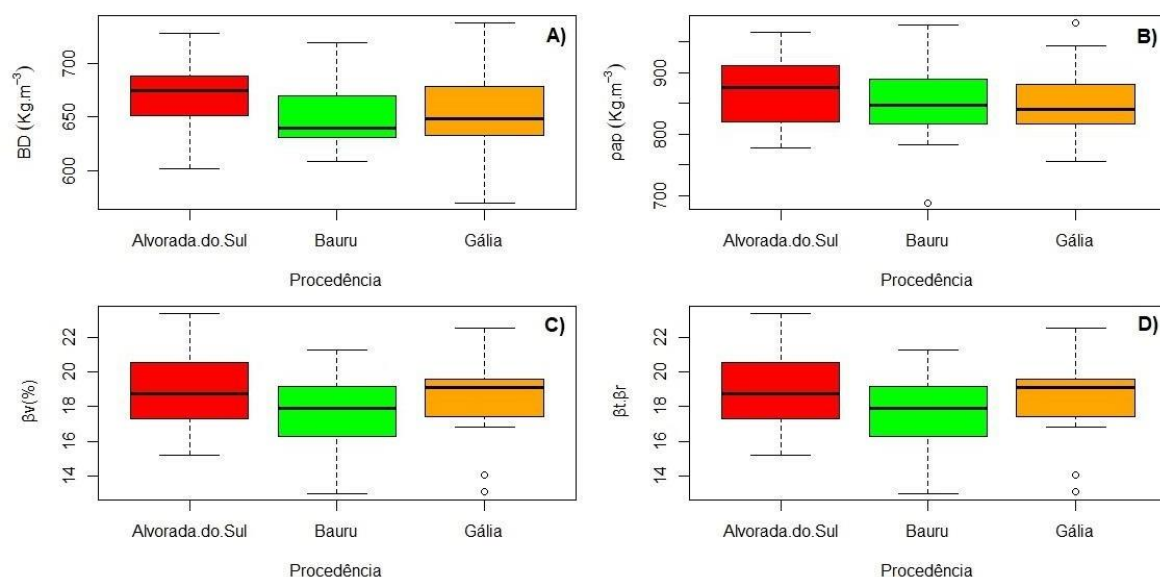


Figura 1. Box plots de densidade básica [BD] (A), densidade aparente [ρ_{ap}] (B), retração volumétrica [β_v] (C) e coeficiente de anisotropia [β_t, β_r] (D), da madeira de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, em função da procedência das sementes.

De acordo com Almeida (2019), entre as diversas propriedades da madeira, a densidade aparente destaca-se como uma das mais importantes, pois serve como um indicador confiável de outras propriedades relevantes para o dimensionamento de projetos de estruturas de madeira. As classes de resistência das madeiras são determinadas com base na resistência característica à compressão paralela às fibras, que é significativamente influenciada pela densidade aparente (Duarte et al., 2020).

Além da densidade, a retratibilidade é uma propriedade física crucial que pode afetar e limitar significativamente o uso de certas espécies de madeira em produtos específicos. Devido ao caráter anisotrópico da madeira, as variações dimensionais ocorrem de maneira diferente nas direções radial, tangencial e longitudinal. Portanto, é essencial determinar tanto a retração volumétrica total quanto as variações dimensionais lineares (Dias et al., 2017).

Outro parâmetro relevante é o coeficiente de anisotropia, que é a relação entre a retração tangencial e a radial. Segundo Gonçalves et al. (2009), esse índice é importante porque ajuda a prever o comportamento da madeira durante a secagem, indicando a maior ou menor propensão a defeitos como empenamentos, rachaduras e colapsos.

Os resultados obtidos quanto aos parâmetros de retração volumétrica e

coeficiente de anisotropia indicam que a espécie em estudo possui homogeneidade longitudinal em suas propriedades físicas. De acordo com Tomasi et al. (2013), essas características proporcionam maior estabilidade à madeira e reduz a propensão ao empenamento e fendilhamento.

Os valores de resistência à compressão e do módulo de ruptura (MOR) verificados (Tabela 2, Figura 2) são maiores do que os observados por Assad et al. (2020) e IPT (2023), e da resistência ao cisalhamento é semelhante, no entanto, o valor médio do módulo de elasticidade (MOE) é inferior ao obtido por Assad et al. (2020) e IPT (2023).

O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são parâmetros essenciais geralmente medidos em testes de flexão estática. Eles são cruciais para a caracterização tecnológica da madeira, pois avaliam a resistência do material quando submetido a uma força aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça (Scavanaca Jr e Garcia, 2004).

Pode-se verificar também que os valores de algumas das propriedades físico-mecânicas obtidas são maiores, e outras menores, do que o observado por Mainieri e Chimelo (1989) e IPT (2023), que avaliaram a madeira de populações naturais. Quando comparamos a madeira oriunda de florestas plantadas verificamos que os valores de densidade da madeira são semelhantes, porém a resistência mecânica variou de acordo com o tipo de esforço mecânico.

De acordo com os resultados da densidade aparente, resistência à compressão e cisalhamento, a madeira de *Balfourodendron riedelianum* pode ser considerada pertencente à classe D50 de resistência da madeira NBR 7190-1 (ABNT 2022), com resistências característica de compressão paralela às fibras de 60 MPa. Nesta classe são classificadas as madeiras das espécies *Hymenolobium paetrum* (angelim-pedra), *Aspidosperma* sp. (peroba-mica) e *Ocotea* sp. (louro-preto) entre outras, que são utilizadas comercialmente, atualmente, no Brasil. Assim sendo, pode-se considerar que a madeira de pau-marfim oriunda de floresta plantada é indicada para uso estrutural, que não necessita de alta resistência, na construção civil, e na fabricação de móveis e painéis à base de madeira. Essa mesma indicação da madeira de pau-marfim foi feita por Assad et al. (2020).

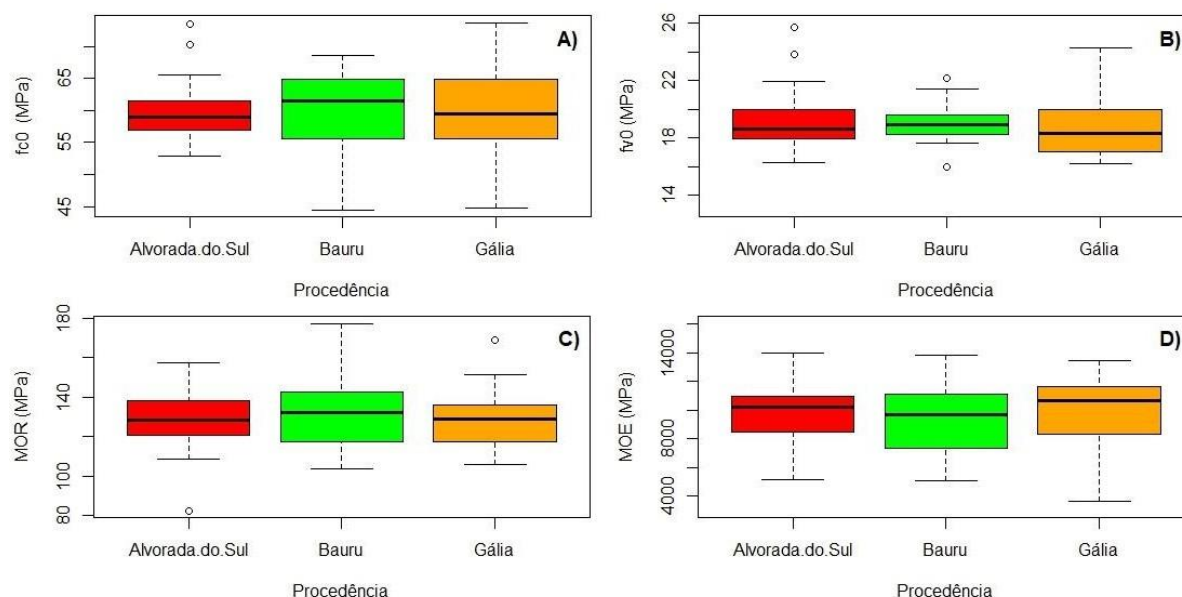


Figura 2. Box plots de resistência à compressão [f_{c0}] (A) e ao cisalhamento [f_{v0}] (B), do módulo de ruptura - MOR (C) e de elasticidade - MOE (D) da madeira de *Balfourodendron riedelianum*, aos 36 anos de idade, em função da procedência das sementes.

Em relação às procedências, observou-se que essas não influenciaram nas propriedades físico-mecânicas da madeira de pau-marfim, sendo que isso pode ser um indício que esse fator tenha pouca influência nas propriedades da madeira, ou essa influência tenha sido diluída com o passar do tempo. Em um estudo com esse mesmo material, com idade de 24 anos, foi constatado que a procedência Alvorada do Sul apresentava densidade básica maior do que as outras procedências, resultado que foi atribuído ao maior crescimento em diâmetro e altura naquela idade (Lima et al., 2011).

Outro fator que pode explicar a não diferença das propriedades da madeira entre as procedências, é o fato de que em madeiras de folhosas, a origem genética dos materiais tem forte controle nas propriedades da madeira (Vidaurre et al., 2011). Este conceito pode ser usado na seleção de matrizes para produção de madeira para atender as necessidades das indústrias e dos usuários finais, abrindo-se novas perspectivas para o melhoramento genético, na medida em que as características desejadas passarão a ser prospectadas dentro da variabilidade natural disponível nos diferentes germoplasmas (Santos et al., 2020).

No entanto, a falta de variações significativas nas propriedades das madeiras entre as três procedências pode ser importante no uso industrial, pois há casos em que é necessário o uso de madeira com características o mais uniforme

possível para produzir produtos de qualidade.

Para a procedência Alvorada do Sul, as melhores correlações positivas foram entre a densidade aparente e a compressão paralela, e a densidade aparente e o cisalhamento (Figura 3A). Na procedência Bauru, as melhores correlações foram entre a densidade aparente e a compressão paralela, e entre MOR e MOE (Figura 3B). Já para a procedência Gália, a densidade aparente e a compressão paralela, e entre MOR e MOE apresentaram as melhores correlações positivas, à semelhança do observado para a procedência de Bauru. Também para essa procedência, tanto o MOR quanto o MOE apresentaram boa correlação negativa com a retração volumétrica (Figura 3C).

A única boa correlação positiva observada em todas as procedências foi a relação entre densidade aparente e compressão paralela. Esse comportamento diferente das relações entre as propriedades da madeira em função de diferentes materiais genéticos também foi observado em estudo com populações de *Pinus caribaea* por Lima et al. (2023).

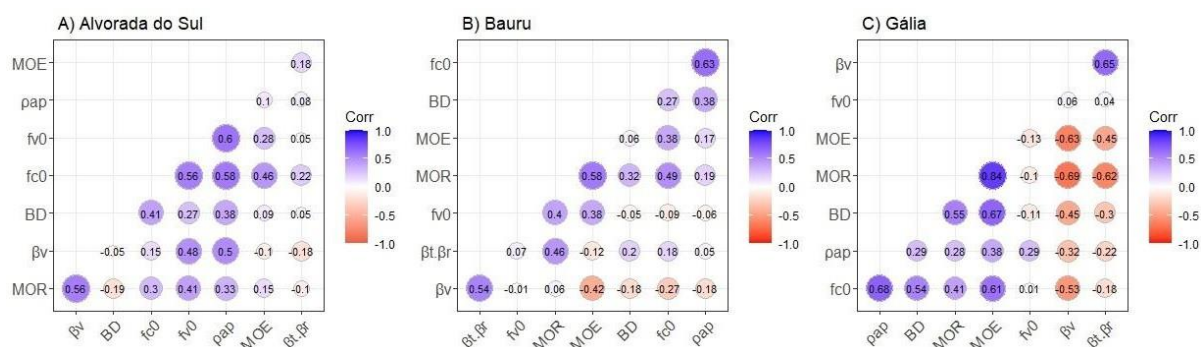


Figura 3. Coeficiente de correlação de Pearson entre as propriedades físico-mecânicas da madeira de *Balfourodendron riedelianum*, aos 36 anos de idade, em função da procedência das sementes (A- Alvorada do Sul, PR; B - Bauru, SP e C - Gália, SP). Obs.: Correlações negativas e positivas são representadas nas cores vermelho e azul, respectivamente. A magnitude de todas as correlações é representada pela intensidade da cor. Densidade aparente (pap), densidade básica (BD), retração volumétrica (β_v), coeficiente de anisotropia ($\beta_t.\beta_r$, sendo β_r : retração radial (β_r) e β_t : retração tangencial), compressão paralela (fc0), cisalhamento (fv0), módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).

Também foi realizado um estudo de regressões para explicar melhor essas correlações obtidas, para cada procedência (Figuras 4 e 5).

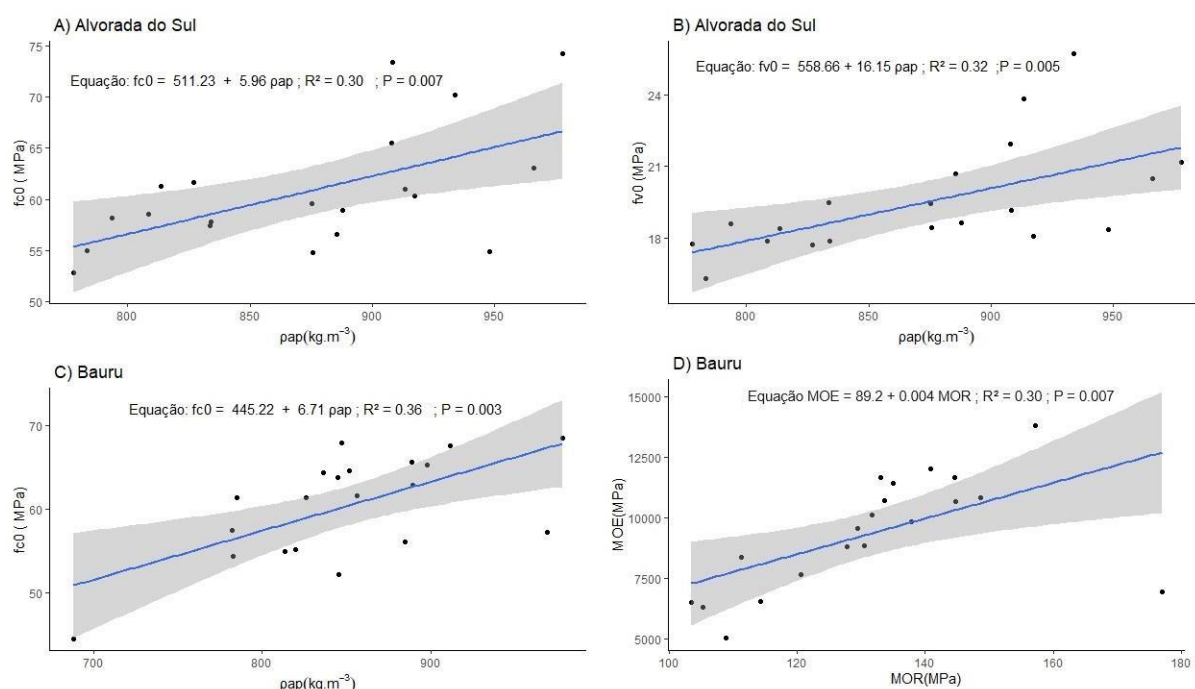


Figura 4. Relações entre Densidade aparente (pap) e compressão paralela ($fc0$) [a] e densidade aparente (pap) e cisalhamento ($fv0$) [b], para a procedência Alvorada do Sul-PR, e entre densidade aparente (pap) e compressão paralela ($fc0$) [c] e módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) [d] para a procedência de Bauru-SP.

Para as melhores correlações obtidas em cada procedência foram testados o modelo de regressão linear. O melhor que teve uma boa acurácia foi o observado para relação entre MOE e MOR, para a procedência Gália (Figura 5B). Para outras equações obtidas, as variações presentes entre as propriedades foram explicadas por coeficiente de determinação (R^2) em torno de 30 a 45%, ou seja, explicam apenas pequena parte da relação existente entre essas variáveis (Figura 4 e 5).

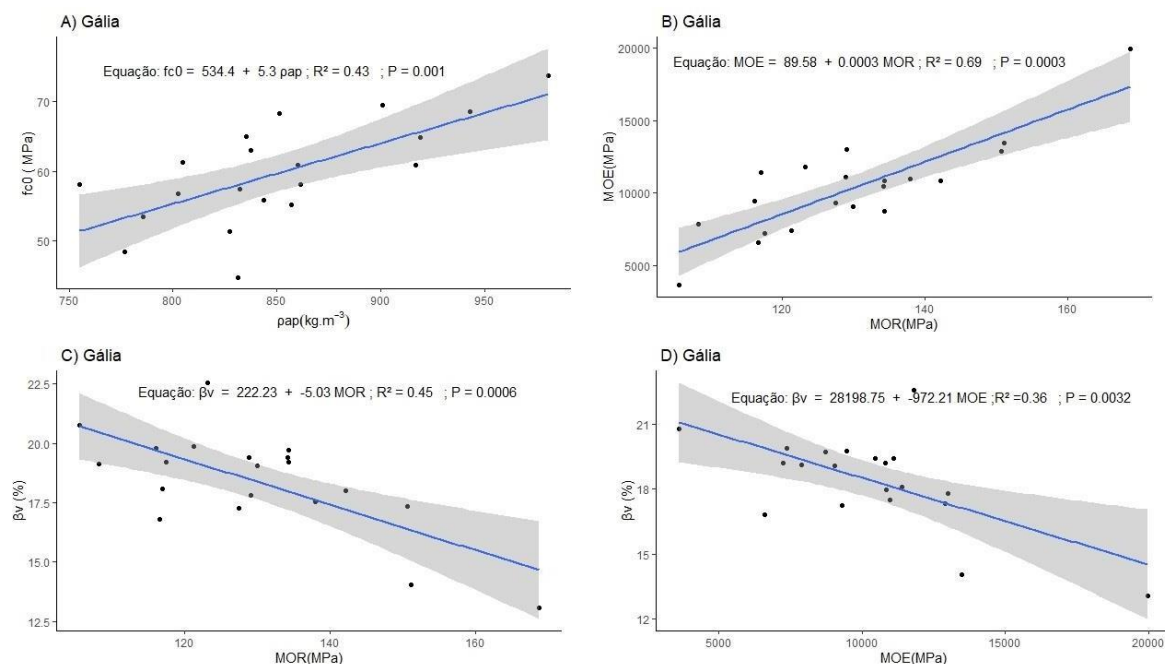


Figura 5. Relações entre Densidade aparente (pap) e compressão paralela (fc0) [a], módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) [b], retração volumétrica (βv) e módulo de ruptura (MOR) [c] e retração volumétrica (βv) e módulo de ruptura (MOR) [d], para a procedência Gália- SP.

No entanto, já foi comprovado que há forte relação entre a densidade e as propriedades mecânicas, onde as maiores densidades implicaram em maiores resistências mecânicas, o que pode limitar o uso de madeiras leves em relação às madeiras classificadas como pesadas, no que diz respeito às aplicações que exigem maior resistência mecânica (Talgatti et al., 2018). Em um estudo com várias espécies nativas, a melhor relação observada foi entre a resistência à compressão e ao cisalhamento, com R^2 em torno de 80% (Almeida et al., 2023). Em um estudo com a madeira oriunda de floresta plantada de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, foi constatado um bom ajuste de equações originadas para predição das propriedades mecânicas da madeira em função da densidade aparente sendo obtidos coeficientes de determinação superiores a 70% (Modes et al., 2020).

CONCLUSÕES

Nossa hipótese de que às condições climáticas do local de origem das sementes deveriam refletir diferenças nas propriedades físicas e mecânicas da

madeira entre as procedências foi negada, pois essas propriedades não variavam significativamente entre as procedências. Isso pode sugerir que as plantas se adaptaram bem ao local de plantio, e que a ausência de diferença nas dimensões das árvores, altura e diâmetro à altura do peito, podem ter colaborado, em parte, para a ausência de diferença nas propriedades.

Em termos de seleção de árvores para posterior uso da madeira, embora não haja diferenças significativas das propriedades analisadas entre as três procedências, o uso de madeira com características mais uniformes possível pode ser útil para produzir produtos que requerem pouca variabilidade.

As relações entre as propriedades da madeira têm comportamentos diferentes em função das procedências, com exceção da relação entre a densidade aparente e a resistência à compressão.

Pode-se indicar a madeira de *Balfourodendron riedelianum* oriunda de plantios para usos estruturais que não necessitam de alta resistência, além da construção civil e fabricação de móveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida AS, Criscuolo G, Almeida TH, Christoforo AL, Chahud E, Branco LAMN, Pinheiro RV, Lahr FAR (2019) Influence of CCA-A preservative on physical-mechanical properties of brazilian tropical woods. **Bio Resources** 14:3030-3041. DOI: 10.15376/biores.14.2.3030-3041.

Almeida JPB, Wolenski ARV, Rodrigues EFC, Araujo VAD, Panzera TH, Campos CID, Molina JC, Christoforo AL, Lahr FAR (2023) Characteristic strengths in the compression and in the static bending as parameters to estimate characteristic shear strength for timber design. **Revista Árvore** 47, e4708. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9088202300000008>.

Amorim EP, Melo RAP, Longui EL, Yamaji FM (2020) Potencial bioenergético das madeiras de *Balfourodendron riedellianum* (Engl.) Engl. aos 30 anos e *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. aos 32 anos provenientes de plantios homogêneos. **Revista do Instituto Florestal** 32:117-127. <http://dx.doi.org/10.24278/2178-5031.202032201>.

Andrade AD, Jankowsky IP (2015) **Pisos de madeira: características de espécies brasileiras**. Piracicaba: ANPM, 2015. 184p.

Assad AAV, Ballarin AW, Freitas MLM, Longui EL (2020) Effect of provenances on wood Properties of *Balfourodendron riedelianum*. **Madera y Bosques** 26:1-24.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941: (2003) **Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: (1997) **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190-1: (2022) **Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190-3: (2022) **Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022.

Araujo VA, Vasconcelos JS, Morales EAM, Savi AF; Hindman, D.P.et al. (2020) Difficulties of wooden housing production sector in Brazil. **Wood Material Science & Engineering** 15:87-96. doi:10.1080/1748 0272.2018.1484513.

Cabral CSR (2013) **Impactos econômicos da limitação do desmatamento no Brasil**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2013.

Carvalho A. (1996) Denominações convencionais para propriedades da madeira. In: CARVALHO, A. **Tecnologia das indústrias da madeira III** – Na2. Vol. I. Lisboa. 1996. 5 p. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/jqomarcelo/tim3/tim3_tp1_na2.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

Carvalho JPF (2021) A silvicultura próxima da natureza e a valorização da floresta nativa do Brasil. In: PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; SANTANA, J.M.S. (Org.). **Silvicultura Tropical - o potencial madeireiro e não madeireiro das espécies tropicais**. ed.1, Sorocaba: Editora dos Autores, 2021. p. 146-163.

Carvalho PER (2004) Pau-marfim, *Balfourodendron riedelianum*. **Circular técnica Embrapa Florestas** 93:1-11.

CLIMATE-DATA.ORG. (2023) **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/sao-paulo/luis-antonio-34805/>

CNCFLORA. (2023) *Balfourodendron riedelianum* in **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2** Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Balfourodendronriedelianum>>. Acesso em 11 julho 2023.

Dias ACC, Marchesan R, Almeida VC, Monteiro TC, Moraes CB de (2017). Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)** 9(1): 37-44. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.

Duarte BB, Lahr FAR, Curvelo AAS, Christoforo AL (2020). Correlation between density and porosity from ten species of tropical wood. **Journal Of Engineering Research And Application** 10:30-32, mar. 2020b. DOI: 10.9790/9622-1003023032.

Ganem RS (2017) Caatinga: estratégias de conservação. **Estudo técnico**. 105p.

Gonçalves FG, Oliveira JTS, Della Lucia RM, Nappo ME, Sartório RC (2009). Densidade e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Árvore** 33:277-288.

IMAZON (2024) - **Derrubada da floresta de janeiro a maio foi a menor dos últimos seis anos, passando de 1.542 km² em 2023 para 822 km² em 2024**. Disponível em: <[INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN. \(2019\) RedListofThreatenedSpecies. 1998: e.T32987A9741568. Version 2015-4. 2019. Availableat: <<https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>>. Acessado em novembro de 2020.](https://imazon.org.br/imprensa/desmatamento-na-amazonia-tem-140-mes-consecutivo-de-reducao/#:~:text=A%20derrubada%20da%20floresta%20nos,imagens%20de%20sat%C3%A9lite%20desde%202008.>. Acesso em: 27 de junho de 2024.</p>
</div>
<div data-bbox=)

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP - IPT. (2023) **Informações sobre madeiras: pau-marfim**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=70. Acesso em: 06 out. 2023.

Lima IL, Ranzini M, Fioruci WJ, Bucci LA, Longui EL, Zanata M, Garcia JN (2023) Physical and mechanical wood Properties of two varieties of *Pinus caribaea*. **Research, Society and Development** 12:1-11.

Mainieri C, Chimelo JP (1989) Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, 1989. 418p.

Modes KS, Júnior GB, Vivian MA, Santos LMH (2020). Propriedades físico-mecânicas da madeira sólida de *Schizolobium amazonicum*. **Advances in Forestry Science** 7(2):989-995.

Pirani JR, Groppo M, Dias P (2020) Rutaceae in Flora do Brasil 2020 em construção. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: [HTTP://florado-brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343](http://florado-brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343). Acesso em 12 de dezembro de 2020.

R CORE TEAM. R: (2019). **A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

Santos LD, Schlindwein SL, Fantini AC, Henkes, JA, Belderrain MCN (2020) Dinâmica do desmatamento da mata atlântica: causas e consequências. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** 9:378–402. DOI: 10.19177/rgsa.v9e32020378-402. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8339.. Acesso em: 29 abr. 2024.

Scavanaca Jr L, Garcia JN (2004) Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis** 1:120-129.

Talgatti M, Silveira AG, Santini EJ, Gorski L; Baldin T, Valcorte G (2018) Propriedades físicas e mecânicas da madeira de clones de eucalipto. **Scientia Agraria Paranaensis** 17:442-442.

Tomasi J de C, Tramontina J, Tres J, Chechi L, Trevisan R (2013) Propriedades físicas da madeira de *Ateleia glazioviana* baill. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA** 9:1824-1832

Vidaurre G, Lombardi LR, Oliveira JTDS, Arantes MDC (2011) Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente** 18:469-480. doi 10.4322/floram.2011.066.

CAPÍTULO 4 - Potencial bioenergético da madeira de pau-marfim [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. - Rutaceae]

RESUMO – Nos últimos anos, o estímulo à utilização da biomassa florestal como fonte de energia tem sido impulsionado por diversas razões ambientais, econômicas e energéticas. Do ponto de vista ambiental, há uma urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a dependência de fontes não renováveis e preservar as florestas nativas. Uma alternativa para agregar valor e reduzir os impactos causados pelos resíduos de madeira é sua utilização na produção de energia. O presente estudo objetivou avaliar o potencial da madeira de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (pau-marfim) como matéria-prima para bioenergia. Em um teste de procedências e progênies de polinização aberta de pau-marfim, foram selecionadas 14 progênies. Em três repetições dessas progênies, foi determinado o Poder Calorífico Superior, bem como os teores de lignina e de celulose, a densidade básica e a biomassa de madeira. Os dados foram submetidos à análise de *deviance*/modelos mistos e obtidas correlações entre os caracteres avaliados. Foram constatadas diferenças entre as progênies, mas não entre as procedências para os caracteres avaliados. As correlações entre os caracteres foram expressivas. A espécie apresentou valores favoráveis para ser empregada para fins energéticos.

Palavras-chave: árvores nativas, qualidade da madeira, poder calórico superior

Bioenergetic potential of pau-marfim wood [*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. - Rutaceae]

ABSTRACT – In recent years, the incentive to use forest biomass as an energy source has been driven by several environmental, economic and energy reasons. From an environmental point of view, there is an urgency to reduce greenhouse gas emissions, reduce dependence on non-renewable sources and preserve native

forests. An alternative to adding value and reducing the impacts caused by wood waste is its use in energy production. The present study aimed to evaluate the potential of *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (pau-marfim) wood as a raw material for bioenergy. In a test of open-pollinated provenances and progenies of pau-marfim, 14 progenies were selected. In three replications of these progenies, the Higher Calorific Value was determined, as well as the lignin and cellulose contents, the basic density and the wood biomass. The data was subjected to deviance/mixed model analysis and correlations were obtained between the evaluated characters. Differences were found between the progenies, but not between the provenances for the evaluated characters. The correlations between the characters were significant. The species presented favorable values to be used for energy purposes.

Keywords: native trees, wood quality, higher heating value

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estímulo à utilização da biomassa florestal como fonte de energia tem sido impulsionado por diversas razões ambientais, econômicas e energéticas. Do ponto de vista ambiental, há uma urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a dependência de fontes não renováveis e preservar as florestas nativas (FAO, 2011). Pelo lado econômico e energético, o único recurso natural e renovável vasto o suficiente que pode ser usado como substituto para combustíveis fósseis, capaz de promover maior segurança energética, é a biomassa (Dias, 2024).

No Brasil, a matriz energética a partir de fontes renováveis atinge cerca de 46,1% da matriz energética total, tais como energia hidráulica, biocombustíveis e biomassa (Sarkodie, 2019). O país possui um grande potencial para a produção de biomassa devido a condições climáticas e localização geográfica favoráveis, infraestrutura de serviços para projetos de bioenergia, alta produtividade e políticas nacionais que regulamentam o tratamento e destinação de resíduos (EPE, 2020).

Diversos segmentos da indústria têm optado por fontes de energia oriundas da biomassa florestal em detrimento dos combustíveis fósseis como opção de

energia renovável (Ribeiro et al., 2024). A energia gerada pela combustão de lenha e carvão vegetal representa 9% do consumo energético brasileiro. Entre as vantagens do seu consumo, destaca-se o fato de ser um combustível renovável com impacto nulo sobre o efeito estufa (MME, 2023).

A determinação do poder calorífico é crucial na seleção de espécies para energia, pois está ligado à quantidade de energia liberada durante a queima. Essencialmente, é a energia em forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira (Carneiro et al., 2013).

Apesar do interesse de longa data nas espécies florestais nativas, pouca atenção tem sido dada às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. No entanto, avaliar a qualidade da madeira é essencial para otimizar a conversão energética, seja na queima direta ou na produção de carvão vegetal (Silva et al., 2014). Para uma maior eficiência na produção de energia a partir da madeira, é crucial considerar várias características de sua composição química, além da densidade. Os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais são variáveis entre as espécies e influenciam significativamente na escolha adequada da madeira como fonte energética (Trugilho, 2012).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2022), a cobertura florestal do Brasil é composta por florestas naturais e plantadas, abrangendo uma extensão total de 497,93 milhões de hectares. As florestas naturais predominam nessa área, totalizando 488 milhões de hectares, destacando-se principalmente a Floresta Amazônica. Além disso, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022) a área de florestas plantadas, no Brasil, era de 9,93 milhões de hectares.

O setor florestal gerou aproximadamente 52 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2018 (IBÁ, 2019). Embora os resíduos de madeira maiores sejam utilizados para várias finalidades específicas, os de menor tamanho, como a serragem, podem representar um desafio ambiental para as empresas (Chichorro e Batista, 2017). Devido à falta de um destino adequado, muitos desses resíduos são simplesmente acumulados e, em vários estágios de decomposição, causam problemas de poluição do solo e do lençol freático. Muitas vezes, são queimados a céu aberto ou entram em combustão espontânea, resultando também na poluição do ar (Dias, 2012).

Uma alternativa para agregar valor e reduzir os impactos causados pelos resíduos de madeira é sua utilização na produção de energia o que pode apresentar diversas vantagens, incluindo mudança na matriz energética, aumento da geração de renda, redução das emissões de gases de efeito estufa, diminuição do volume de resíduos depositados no ambiente e redução de custos (Ríos-Badrán, 2020).

Balfourodendron riedelianum Engl. (Engl.), conhecido como pau-marfim, é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica, alcançando até 35 m de altura e um diâmetro de tronco de até 100 cm a 130 cm do solo (Carvalho, 2004). Com uma ampla distribuição geográfica, esta espécie é encontrada do estado de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul, estendendo-se até o Paraguai e Argentina (Pirani et al., 2020). Apesar de sua madeira ter grande valor econômico, sendo utilizada na construção civil, marcenaria, em projetos paisagísticos e na recuperação de áreas degradadas (CNCFLORA, 2023), *B. riedelianum* está ameaçado de extinção devido à exploração intensiva de sua madeira e à fragmentação do bioma Mata Atlântica (IUCN, 2019). Esta espécie apresenta grande potencial para ser utilizada em plantios de maneira sustentável, fornecendo madeira de excelente qualidade para diferentes usos. Sua madeira possui coloração branca ou levemente amarelada, sua superfície é lisa e medianamente lustrosa, com textura fina e grã regular. Apesar de sua moderada densidade, variando entre 800 e 900 kg.m⁻³, a madeira apresenta baixa resistência ao apodrecimento e ao ataque de agentes xilófagos (Mainieri e Chimelo 1989).

Pesquisas envolvendo resíduos florestais de espécies nativas da Amazônia têm demonstrado o potencial desses materiais para serem utilizados em bioenergia. A partir de estudos sobre os resíduos de um ciclo de corte, revelaram uma densidade básica variando de 0,33 a 0,98 g cm⁻³ e um Poder Calorífico Superior variando de 4617.651 kcal kg⁻¹ a 4794.959 kcal kg⁻¹ (Moutinho, 2016). Esses valores indicam uma excelente adequação para o uso na indústria energética, estando em conformidade com os padrões observados para espécies como *B. riedelianum*.

No presente trabalho foram avaliados indivíduos de 36 anos de *B. riedelianum* plantados na Estação Experimental de Luiz Antônio, constituintes de um teste de procedências e progênies de polinização aberta de pau-marfim. Assim, o presente estudo objetivou avaliar o potencial da madeira da espécie como

matéria-prima para produção de bioenergia, a partir da determinação do poder calorífico em amostras de madeira moída.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedência do material avaliado

Foram utilizados dados de um teste de procedências e progênies de polinização aberta de *B. riedelianum* (pau-marfim), a partir de uma área implantada em 1986, na Estação Experimental de Luiz Antônio, no município de Luiz Antônio (SP) e pertencente à Fundação Florestal em parceria com o Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) do estado de São Paulo. A precipitação média histórica do município é de 1.286 mm, com temperatura média anual de 22,5 °C, com variação entre 19,3 a 24,3 °C, temperaturas mínimas entre 14,2 e 20,5 °C e temperaturas máximas entre 24,9 e 29,8 °C (CLIMATE-DATA.ORG, 2023).

O teste foi composto por materiais obtidos a partir de três procedências de sementes (Alvorada do Sul, no estado do Paraná; Gália e Bauru, em São Paulo, Brasil) e foram avaliadas 19 progênies por procedência. O desenho experimental foi o delineamento em blocos completos casualizados, com 6 repetições e parcelas lineares de cinco plantas, no espaçamento 3 x 3 m, totalizando 1.710 plantas.

Inicialmente foram avaliados em todo o teste, o diâmetro a 1,30 m do solo, comumente denominado de diâmetro à altura do peito (DAP, em cm), a altura total (ALT, em m) e a sobrevivência (SOB, em %) das árvores no teste.

Amostragem da madeira

Com base na análise dos dados de DAP, e de forma a representar a variabilidade genética do teste, foram amostradas 40 progênies, sendo 27 dessas com valores genéticos positivos (superiores) e 13 com valores genéticos negativos (inferiores) e destas 40 progênies, foram amostradas e abatidas 3 árvores, totalizando 120 árvores amostradas.

Nas árvores abatidas foram amostrados seis discos com aproximadamente 5 cm de espessura, um dos discos foi amostrado na altura do DAP e os demais representando os seguintes percentuais do comprimento do fuste (altura comercial,

correspondente ao comprimento desde a base até um diâmetro mínimo de 4 cm): 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% (topo).

Em todos os discos amostrados, foram realizadas duas medições perpendiculares para determinação dos diâmetros médios com e sem casca. A partir do comprimento e diâmetro dos toretes entre os pontos de amostragem foram determinados os volumes (m³/árvore) com (VCC) e sem (VSC) casca, empregando a fórmula de Smalian, conforme descrito por Soares et al. (2006).

$$V_{fuste} = \frac{\pi}{8} 1,3(d_{0\%}^2 + DAP^2) + \frac{\pi}{8} l_1(DAP^2 + d_{25\%}^2) + \frac{\pi}{8} l_2[d_{25\%}^2 + d_{100\%}^2 + 2(d_{50\%}^2 + d_{75\%}^2)]$$

Em que:

d0%, d25%, d50%, d75% e d100% = diâmetros avaliados a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (do comprimento do fuste);

DAP = diâmetro à altura do peito (avaliado a 1,30 m do solo);

l1 = Comprimento entre o DAP e 25% do fuste (variável de árvore para árvore);

l2 = Corresponde a 25% do comprimento do fuste de cada árvore abatida.

O volume de casca foi determinado pela diferença entre o volume com e sem casca.

Densidade, biomassa e caracterização química da madeira

Para a avaliação da densidade da madeira, os discos (obtidos conforme descrito no tópico anterior) foram devidamente identificados e encaminhados para o Laboratório de Sementes e Melhoramento Florestal para secagem. Dos discos foram obtidas amostras, em forma de cunha, para a determinação da densidade básica da madeira (DBM), pelo método da imersão em água. A densidade básica média da madeira foi obtida a partir dos vários pontos de amostragem ao longo do fuste, conforme descrito por Vital (1984).

A biomassa do lenho (BIOML, kg árvore⁻¹) foi obtida a partir do produto entre os valores de VSC e DBM.

Amostras compostas de madeira obtidas de cada disco foram picadas e moídas em moinho tipo Willey, para determinação de constituintes químicos. Anteriormente à determinação dos teores de lignina e de celulose, amostras da madeira moída foram submetidas ao processo de eliminação dos extrativos. Para

tanto, foram usados 5 g de amostra seca de madeira de cada progênie e colocadas dentro de um Erlenmeyer, onde foi adicionada água quente. A água foi eliminada e substituída por outra, repetindo-se o procedimento até que a solução ficasse incolor. Após essa extração em água, as amostras foram levadas à extração em solução com tolueno e álcool etílico (1:2 v/v) e, posteriormente colocadas em filtro de papel e levadas a bomba a vácuo para uma última lavagem e pré-secagem. As amostras nos filtros de papel foram levadas para a estufa a 65°C por 12 horas. Após esse procedimento a amostra ficou pronta para quantificação dos teores de lignina e celulose.

Teor de Lignina (LIG, %) - após eliminação dos extrativos, o teor de lignina foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986) usando-se amostras de 0,3 g de madeira moída.

Teor de Celulose Total (CEL, %) - determinado pelo método do ácido nítrico, conforme procedimento descrito em Santos e Sansígolo (2000).

Poder calorífico superior (PCS) da madeira

Por uma questão de custo e capacidade de processamento e de determinação, a partir dos dados de densidade e de biomassa da madeira das 40 progênies amostradas inicialmente, foram selecionadas 14 progênies (5 progênies da procedência de Alvorada do Sul, 2 de Gália e 7 progênies de Bauru) com características mais divergentes (com as maiores e menores médias quanto a essas duas características) e, destas famílias, foram amostradas 3 árvores/progênie, para a determinação do poder calorífico superior.

A análise de poder calorífico superior (PCS) das amostras de madeira moída foi realizada na Universidade Federal de São Carlos, campus de Sorocaba, no Laboratório de Pesquisa em Biomassa e Bioenergia.

O poder calorífico superior foi determinado com as amostras previamente secas em estufa (0% de umidade), obedecendo à norma ASTM D5865-9813 utilizando o calorímetro e bomba calorimétrica IKA Modelo C200.

Análise dos dados

Os dados obtidos para as 14 progênies relativos à densidade básica (DBM) e biomassa da madeira (BIOML), teores de lignina (LIG) e de celulose (CEL) e do poder calorífico superior (PCS) foram analisados de acordo com modelos mistos e uma tabela de análise de *deviance*, obtendo-se estimativas de parâmetros genéticos, com o uso do software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007), a partir do modelo:

$$Y = Xr + Zg + Wb + e$$

Em que: y é o vetor dos dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral; g é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios); b é o vetor dos efeitos de procedências (assumidos como aleatórios); e é o vetor de resíduos (aleatórios).

Estimativas de correlação

Determinou-se a associação entre as características da madeira e do Poder Calorífico Superior (PCS), pela estimativa de correlações de Pearson, utilizando-se o software Python (Python Software Foundation, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito de progênies foi não significativo ($p > 0,05$) para densidade básica da madeira (DBM) e poder calorífico superior (PCS), assim como o efeito de procedências também foi não significativo ($p > 0,05$) para todos os caracteres, indicando a baixa influência da origem das sementes sobre os caracteres na idade avaliada e condições experimentais. Com isso, as estimativas de herdabilidade individual (h^2g) e da média de progênies (h^2m) foram de baixa magnitude ($< 30\%$) para DBM e PCS e de alta magnitude para os demais caracteres (Tabela 1). Resultados similares foram obtidos por Moura et al. (2013) em estudo com pequizeiro (*Caryocar brasiliense* Camb.), por Silva (2015) com canafístula (*Peltophorum dubium*) e por Rocha et al. (2009), com baru (*Dipteryx alata*). Os resultados obtidos sugerem a viabilidade de alcançar progresso genético

significativo e, de forma geral, as 14 progênies estudadas, mesmo em número relativo baixo, demonstram potencial para seleção, com base nas considerações de Santos et al. (2018).

Para DBM e PCS, as estimativas de herdabilidade indicam baixo controle genético, uma vez que a variância e o coeficiente de variação experimental foram baixos. É possível que a idade mais avançada das árvores tenha contribuído para esses resultados, assim como observado por Tambarussi et al. (2018).

As estimativas de acurácia da seleção (Ac_{clon} ; Tabela 1), de forma semelhante ao observado para as herdabilidade, indicam confiabilidade na seleção de progênies superiores a partir da biomassa do lenho (BIOML) e dos teores de celulose (CEL) e lignina (LIG), pois quanto maior a acurácia na avaliação de um indivíduo, maior é a confiança na avaliação e no valor genético predito deste indivíduo (Resende e Alves, 2021).

Os coeficientes de variação ambiental ($CVe\%$; Tabela 1) variaram de 0,88% para o poder calorífico superior a 31,09% para biomassa do lenho. De acordo com a classificação de Pimentel-Gomes (2000), esses valores são baixos para os teores de lignina e celulose, densidade básica da madeira e poder calorífico ($<10\%$) e muito alto para biomassa ($>30\%$).

Os valores de CVe , no entanto, estão dentro da faixa considerada normal para experimentos de campo envolvendo espécies florestais (Nogueira et al., 2019), e indicam uma boa precisão experimental em condições de campo, permitindo a identificação e seleção de genótipos superiores (Costa et al., 2015). Conforme destacado por Silva (2015), a idade em que as avaliações são realizadas pode influenciar a magnitude do coeficiente de variação ambiental (CVe), uma vez que os indivíduos em estágios iniciais de crescimento tendem a apresentar um desenvolvimento bastante irregular, o qual se estabiliza ao longo do tempo.

Tabela 1. Análise de *Deviance* (valores LRT – teste de razão de verossimilhança) e estimativas dos parâmetros genéticos para os caracteres da madeira em progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade.

Efeito	DBM	BIOML	CEL	LIG	PCS
Progênies	0,50 ^{ns}	19,43 ^{**}	208,02 ^{**}	125,16 ^{**}	0,00 ^{ns}
Procedência	1,53 ^{ns}	3,81 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,48 ^{ns}	1,93 ^{ns}
σ^2g	0,0001	486,6946	11,6823	3,9721	208,6256
σ^2proc	0,0001	238,4790	0,0151	0,3489	4619,6343
σ^2e	0,0010	636,6964	0,4948	0,5325	27716,7775
σ^2f	0,0011	1361,8700	12,1923	4,8535	32545,0375
h^2g	0,0640 ± 0,0653	0,3574 ± 0,1544	0,9582 ± 0,2527	0,8184 ± 0,2336	0,0064 ± 0,0349
h^2proc	0,0590	0,1751	0,0012	0,0719	0,1419
h^2mp	0,1795	0,6963	0,9861	0,9572	0,0220
Ac_prog	0,4236	0,8345	0,9930	0,9784	0,1486
CVe%	4,9761	31,0859	1,5528	3,3466	0,8826
Média Geral	0,6309	81,1714	45,2991	21,8043	4509,2399

DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%); PCS: Poder Calorífico Superior (Kcal kg^{-1}); σ^2g : variância genotípica; σ^2proc : variância entre procedências; σ^2e : variância residual; σ^2f : variância fenotípica individual; h^2g : herdabilidade individual; h^2proc : herdabilidade de procedência; h^2mp : herdabilidade média; Ac_prog: acurácia da seleção; CVe%: coeficiente de variação experimental. **, ^{ns} - Valores significativos ($p < 0,01$) e não significativos ($p > 0,05$) pelo teste χ^2 .

Confirmando os resultados acima, nas amostras de madeira moída de *B. riedelianum*, os valores de poder calorífico superior (Tabela 2), assim como para os demais caracteres foram semelhantes nas três procedências. Amorim et al. (2020), avaliando esse mesmo teste aos 30 anos de idade observaram que o PCS foi inferior nas procedências de Alvorada do Sul e Galia, em relação às procedências de Bauru, que apresentou o maior poder calorífico. É fato que as propriedades da madeira podem variar com a idade das árvores (Carneiro et al., 2014) e, em geral, árvores mais jovens possuem menores valores de poder calorífico. Contudo, mesmo considerando os resultados obtidos por Amorim et al. (2020) quando o teste

tinha 30 anos, ainda assim, os resultados foram próximos dos obtidos no presente estudo.

Tabela 2. Médias genotípicas dos caracteres avaliados em cada uma das procedências, em 14 progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade

Procedência	Caracteres				
	DBM	BIOML	CEL	LIG	PCS
Alvorada do Sul/PR	0,642	93,573	46,03	22,73	4496,03
Gália/SP	0,624	76,107	43,00	21,93	4488,07
Bauru/SP	0,627	76,461	44,35	20,41	4524,72

DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%), PCS: poder calorífico superior (kcal kg^{-1}).

As estimativas das correlações entre os valores genotípicos dos caracteres avaliados, foram negativas para PCS x Lignina e PCS x Densidade, e positivas para PCS x biomassa do lenho e PCS x celulose, porém de baixa e média magnitude, respectivamente. A correlação negativa entre DBM e lignina com o poder calorífico pode ser explicada pelo fato da haver diferenças entre o comprimento das fibras ao longo da madeira, afetando, assim, a sua geração de calor. Ainda, a biomassa apresentou correlação negativa e média com lignina e negativa e baixa com DBM (Figura 1). E, como já era esperado, há uma relação negativa entre lignina e celulose. A correlação entre lignina x DBM foi negativa e baixa, contrariando as afirmações de Santos et al. (2018) de forte correlação entre essas duas características.

As estimativas das correlações entre os valores genotípicos dos caracteres avaliados nas 14 progênies indicam baixa associação entre os mesmos, o que pode ter ocorrido pela variabilidade não significativa observada para DBM e o PCS (Tabela 2) e por ter sido usada apenas um pequeno número de progênies do total envolvido no teste. Em um estudo realizado por Soares et al. (2014) com híbridos de eucalipto, foi observada correlação moderada e positiva entre lignina e densidade, e correlação negativa entre lignina e celulose. Resultados similares foram obtidos por Poletto (2020) ao avaliar a correlação entre as propriedades físicas, químicas e térmicas de fibras naturais de árvores nativas.

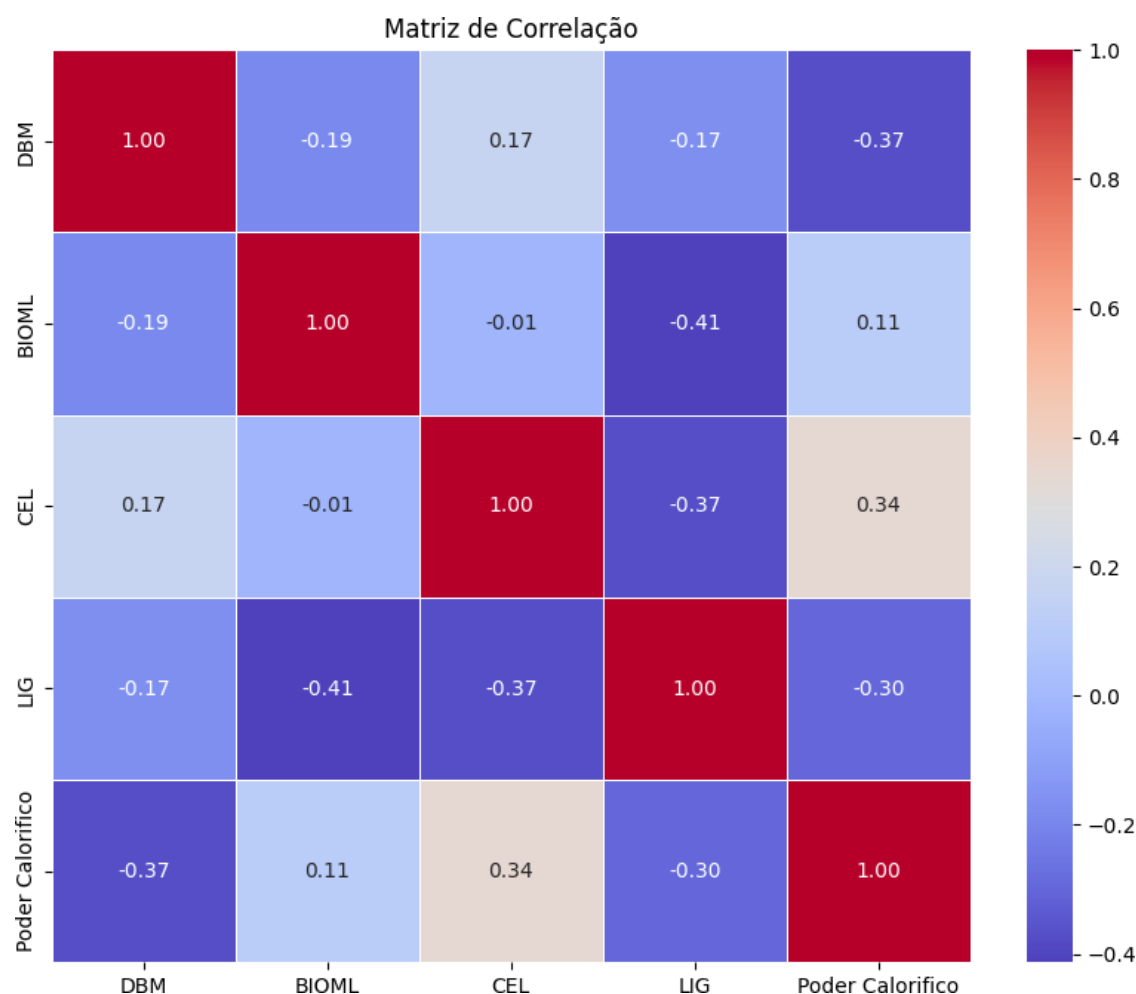


Figura 1. Mapa de calor das correlações dos valores genotípicos das progênes de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, pertencentes a três procedências. DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOML: biomassa do lenho (kg árvore^{-1}); CEL: teor de celulose (%); LIG: teor de lignina (%); Poder Calorífico: poder calorífico superior (kcal kg^{-1}).

Bonfatti Jr. et al. (2023) também encontraram baixos valores de correlação entre as propriedades da madeira de eucalipto. A densidade básica da madeira é uma das propriedades mais relevantes porque está relacionada à maioria das outras propriedades da madeira. No entanto, a DBM não é determinante, por si só, de associações entre diferentes caracteres. Por exemplo, as dimensões das fibras desempenham papel importante, porque estão diretamente correlacionadas com as propriedades do desempenho da madeira quanto a produção de energia (Fearon et. al, 2020).

Os valores de poder calorífico superior variaram muito pouco entre as procedências (Tabela 2) e, ou progênes (Figura 2), confirmando a ausência do

efeito da fonte geográfica das sementes e a baixa variabilidade genética para essa característica. Também, pode indicar o efeito da idade avançada do teste que pode ter mascarado esses efeitos, pela boa adaptação dos genótipos sobreviventes. De acordo com Oliveira (2012) e Pereira (2013), a idade e as condições climáticas exercem forte influência nas propriedades da madeira.

Quirino (2005) observou, ao analisar o poder calorífico e a densidade básica de 108 espécies florestais, que o maior poder calorífico nem sempre está associado às espécies com maior densidade básica. Isso sugere que outras características da madeira, como seus componentes químicos, podem influenciar o poder calorífico. Vidaurre et al. (2012) destacam que a densidade não tem uma relação direta com a quantidade de energia contida na madeira e não existe uma relação clara entre densidade básica e poder calorífico, como evidenciado pelos dados apresentados na Tabela 2.

Uma das expectativas é que madeiras de densidade mais alta apresentassem maior PCS, mas isso não foi observado em nosso estudo, esse fato também foi observado por Amorim et al. (2020) ao analisarem o poder calorífico de madeira de pau-marfim aos 30 anos de idade. Isso reforça a ideia de que outras características da madeira, além da densidade, devem ser investigadas na seleção de madeira adequada para produção de energia. De acordo com Zaque et al. (2017) as propriedades energéticas, como densidade, poder calorífico e composição química são cruciais para auxiliar na seleção das espécies conforme o uso final e, avaliá-las isoladamente, seria um equívoco.

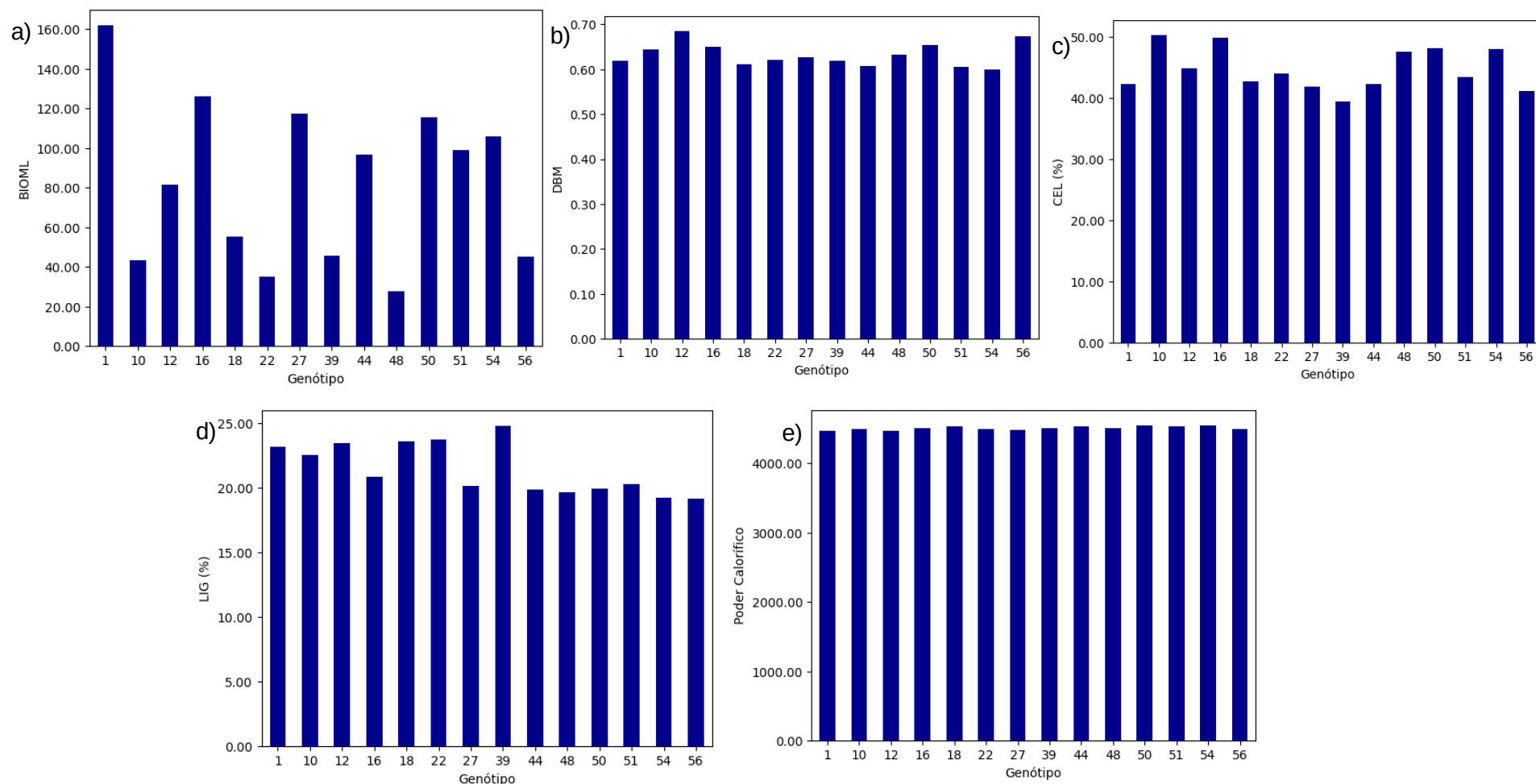


Figura 2. Médias genotípicas dos caracteres avaliados em cada uma das 14 progênes de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum*, pertencentes a três procedências, aos 36 anos de idade a) Biomassa de madeira (kg árvore⁻¹); b) densidade básica da madeira (g cm⁻³); c) Teor de celulose (CEL, %), d) Teor de lignina (LIG, %), e) Poder calorífico superior (PCS, kcal kg⁻¹)

O presente estudo apresenta valores médios de densidade básica da madeira de $0,63 \text{ g cm}^{-3}$, valores semelhantes aos encontrados em diversos estudos com espécies florestais nativas (Quirino et. al., 2005; Lopes, 2017). *B. riedelianum*, de acordo com os valores de densidade encontrados, pode ser considerada com madeira de densidade média (Silva et al., 2017). Segundo Vieira (2012), madeira de baixa densidade tende a ser menos eficiente quanto à característica de poder calorífico, por esse motivo, recomenda-se a utilização de madeiras com densidades maiores, pois representam maior rendimento na geração de calor.

Segundo Paula (1993), a celulose e a lignina são os componentes principais da madeira utilizados na geração de energia. Por isso, madeiras ricas nessas substâncias são as mais viáveis e promissoras para a produção de energia, tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico.

Truguilho (2012) afirma que, quimicamente, a madeira madura é uma mistura complexa e interconectada de polímeros, composta principalmente por carboidratos, lignina, extrativos e elementos minerais. A lignina e os extrativos são especialmente relevantes do ponto de vista energético. A lignina, que é um componente aromático com alta estabilidade térmica e rica em carbono, possui um poder calorífico de cerca de 6.400 cal g^{-1} . Os extrativos, que não fazem parte da estrutura da parede celular vegetal e são solúveis em água, solventes orgânicos e voláteis com vapor, podem ter um poder calorífico elevado, alcançando até 8.300 cal g^{-1} , dependendo da sua classe.

Marques (2020), estudando espécies do Cerrado, registraram valores de PCS entre 4.469 e $4.610 \text{ kcal kg}^{-1}$. Esse estudo sugere que resíduos de madeira de espécies nativas podem ser aproveitados para geração de energia, especialmente após processos de serragem para outros usos. Os autores destacam que métricas como densidade da madeira, PCS e produtividade volumétrica da madeira são essenciais para determinar o potencial bioenergético, especialmente em florestas sem plano de gerenciamento de resíduos.

CONCLUSÕES

Há variabilidade genética entre progênies de polinização aberta de pau-marfim para biomassa de madeira, teores de lignina e de celulose, mas não para

densidade básica e poder calorífico superior. Por outro lado, o efeito da procedência das sementes é pouco expressivo sobre essas características.

Balfourodendron riedelianum demonstra potencial para uso energético, com valores de Poder Calorífico dentro da faixa esperada para essa finalidade.

Além da densidade básica da madeira, é necessário analisar outras características, como os teores de lignina e celulose, durante o processo de seleção de espécies para fins energéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim EP, Melo RAP, Longui EL, Yamaji FM (2020) Potencial bioenergético das madeiras de *Balfourodendron riedellianum* (Engl.) Engl. aos 30 anos e *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. aos 32 anos provenientes de plantios homogêneos. **Revista do Instituto Florestal** 32:117-127. <http://dx.doi.org/10.24278/2178-5031.202032201>.

Bonfatti Junior EA, Lengowski EC, Cabral BM, De Oliveira TWG, De Barros JMR, Oliveira RS, Klock U, Da Silva D (2023) A densidade básica da madeira, dimensões das fibras e composição química da madeira de quatro espécies de *Eucalyptus* plantadas no sul do Brasil. **Revista Árvore** 47:1-11. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202300000004>.

Carneiro ACO, Santos RC, Castro RVO, Castro AFNM, Pimenta AS, Pinto EM, Alves ICN (2013) Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do Seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore** 37:1153-1163.

Carneiro ACO, Castro AFNM, Castro RVO, Santos RC, Ferreira LP, Damásio AP, Vital BR (2014) Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore** 38:375-381. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>

Carvalho PER (2004) Pau-marfim, *Balfourodendron riedelianum*. **Circular técnica Embrapa Florestas** 93:1-11.

Chichorro JF, Batista TR (2017) Aproveitamento de resíduos de pequenos empreendimentos madeireiros em Jerônimo Monteiro–ES. **Nativa** 5:66 –72.

CLIMATE-DATA.ORG (2023). **Dados climáticos para cidades mundiais**. 2023. Disponível em: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/sao-paulo/luis-antonio-34805/>

CNCFLOTA (2013) *Balfourodendron riedelianum* in **Lista Vermelha da flora brasileira** versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/porta/pt-br/profile/Balfourodendronriedelianum>>. Acesso em 11 julho 2023

Costa RB, Martinez DT, Chichorro JF, Bauer MO, Cezana DP, Souza TR (2015) Progeny performance at pre-breeding stage of *Tectona grandis* Lf in Espírito Santo State. **Scientia Forestalis** 43:211-216.

Dias JMC de S (2012) Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Brasília: Embrapa Agroenergia**, 2012. 132p.

Dias R (2024) Biomassa como vetor de desenvolvimento sustentável: contribuições para os ODS e a transição energética. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, 17(54):e1402-e1402.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (2020) **Balanço energético nacional, 2020 – Ano base 2019: Relatório final**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 02 de janeiro de 2024

FAO (2015) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - **Global forest resources assessment 2015: How are the world's forest changing?** 54p

Fearon O, Kuitunen S, Ruuttunen K, Alopaeus V, Vuorinen T (2020). Detailed modeling of Kraft pulping chemistry: Delignification. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 59(29):12977-12985. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c02110

Ferreira K, Bertolini L, Zucchi MI, Konzen ER (2022) Como determinar a herdabilidade para um caráter quantitativo? **Genética na Escola** 17:215-236.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ. 2019**. (2019) Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2023

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório IBÁ. 2022**. (2022) Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 12 de janeiro de 2024.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN. (2019) **Red List of Threatened Species**. 1998: e.T32987A9741568. Version 2015-4. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>>. Acessado em novembro de 2020.

Lopes OP (2017) **Arquitetura hidráulica e densidade da madeira de árvores de *Balfourodendron riedelianum*, *Cariniana legalis* e *Handroanthus vellosi* com 40 anos de idade**. 2017. 66 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Mainieri C, Chimelo JP (1989) Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, 1989. 418p.

Marques RD (2020) Wood quality of five species of the Cerrado for energy purposes. **Scientia Forestalis** 48:1-12.

Ministério de Minas e Energia – MME (2023) BEN 2023 (Balanço Energético Nacional), **Relatório Síntese Ano Base 2022**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf

Moutinho VHP (2016) Propriedades químicas e energéticas de madeiras amazônicas de segundo ciclo de corte. **Floresta e Ambiente** 23:444-449.

Oliveira AC (2012) Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta** 42:59-68.

Pereira BLC (2013) Influence of Chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources** 8:4574-4592.

Pirani JR, Groppo M, Dias P (2020) Rutaceae in Flora do Brasil 2020 em construção. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: [HTTP://florado-brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343](http://florado-brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343). Acesso em 12 de Dezembro de 2020.

Poletto M (2020) Correlação entre as propriedades físicas, químicas e térmicas de seis fibras naturais. **Brazilian Journal of Development** 6(3):10558–10565. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-073>

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. (2023) **Python Language** Site: Documentation, 2023. Página de documentação. Disponível em: [<https://www.python.org/doc/>](https://www.python.org/doc/). Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

Quirino WF (2005) Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da madeira** 89:100-106.

Paula JE (1993) Madeiras da caatinga úteis para produção de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 28:153-165.

Resende MDV (2007) **SELEGEN-REML/BLUP**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas, 259p.

Resende MDV, de Alves RS (2021) Genética: estratégias de melhoramento e métodos de seleção. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 3. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1131863>

Ribeiro GB de D, Rodrigues M I, Valverde SR, Carneiro ADCO, da Silva GF, Rodrigues NMM, de Oliveira Rodrigues PP (2024) Economic sustainability for developing a less polluting Eucalyptus – charcoal productive system in emerging markets. **Cleaner Environmental Systems**, 100173.

Rios-Badrán IM (2020) Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. **Renewable Energy** 145:500-507.

Santos CR, Sansígolo CA (2000) Métodos não-normatizados para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-AQ. **Iberoamerican Congress on Pulp and Paper**, 13p.

Santos PET, Paludzyszyn Filho E, Magalhães WLE, Vandresen PB (2018) Melhoramento genético de eucaliptos subtropicais: contribuições para a espécie *Eucalyptus badjensis*. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2018. 95 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 325). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1104201>.

Sarkodie SA (2019) Environmental sustainability assessment using dynamic autoregressive distributed lag simulations – nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth. **Science of The Total Environment** 668:318-332.

Silva DA, Almeida VC, Viana LC, Klock U, Muñiz GIB (2014) Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente** 21(4):561-568.

Silva LE (2015) **Variabilidade e estimação de parâmetros genéticos via modelos mistos em Canafístula**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF. (2022) **As florestas plantadas**. 2022. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/>. Acesso em: 5 de março de. 2024.

Soares VC, Bianchi ML, Truguilho PF, Pereira AJ, Höfler J (2014) Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto, **Revista Árvore** 38:543-549.

Tambarussi EV, Pereira FB, Da Silva PHM, Lee D, Bush D (2018) Are tree breeders properly predicting genetic gain? A case study involving *Corymbia* species. **Euphytica** 214:1-11.

Truguilho, P. F. (2012) Energia da Biomassa Florestal. **4º Congresso Florestal Paranaense 2012**.

Vidaurre G, Lombardi LR, Oliveira JTDS, Arantes MDC (2012) Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente** 18:469-48. doi 10.4322/loram.2011.066.

Vital BR (1984) **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 21p. (Boletim técnico,1)

Zaque LAM, Ferreira MD, Carvalho MTC, Ferreira ALS, Oliveira AC, Pereira BLC (2017) Propriedades energéticas da madeira de espécies nativas do Brasil. **Múltiplos olhares sobre a biodiversidade** 5:411-425.

CAPÍTULO 5 – Determinação de propriedades químicas de madeira de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. com o uso da Reflexão Difusa de Infravermelho Próximo

RESUMO – A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica não destrutiva e rápida, amplamente empregada na avaliação, caracterização e classificação de materiais biológicos. Através de técnicas de regressão multivariada, os espectros de absorbância podem ser relacionados às propriedades da madeira, permitindo sua previsão em amostras desconhecidas. O objetivo deste trabalho foi investigar as características químicas da madeira de pau-marfim e desenvolver modelos de predição da densidade básica da madeira e dos teores de lignina e celulose, utilizando espectroscopia do infravermelho próximo (NIR). Foram utilizados dados de densidade básica da madeira e dos teores de lignina e celulose de 40 progênies, pertencentes a um teste de procedências e progênies de polinização aberta de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl (pau-marfim). Os espectros de reflectância difusa foram obtidos com o auxílio do espectrômetro de infravermelho próximo LabSpec® 4 Standard-Res portátil com faixa espectral de 350 a 2.500 nm, em conjunto com o programa ViewSpec Pro, versão 6.2. Para tanto, foram utilizadas amostras moídas de três repetições de cada uma das 40 progênies, com estimativa dos teores de lignina e celulose e densidade básica da madeira previamente conhecidas, para a obtenção dos espectros de infravermelho próximo por reflectância. Os resultados obtidos indicam que teor de lignina e celulose podem ser estimados por meio da espectroscopia no infravermelho próximo, tendo-se obtido altos valores de coeficientes de determinação e em validação cruzada para essas duas características. Para densidade básica o coeficiente de determinação foi baixo. Assim, o método quimiométrico por reflexão difusa de NIR em serragem de madeira de pau-marfim mostrou-se adequado para a estimativa dos teores de lignina e celulose, e a técnica NIR apresentou-se como uma ferramenta útil para a calibração das propriedades da madeira desta espécie nativa do Brasil.

Palavras-chave: Espectroscopia no infravermelho próximo; Avaliação não destrutiva; Modelos de calibração; Química da madeira

**Determination of chemical properties of *Balfourodendron riedelianum* (Engl.)
Engl.wood using Near Infrared Diffuse Reflection**

ABSTRACT – Near-infrared spectroscopy (NIR) is a non-destructive and fast technique, widely used in the evaluation, characterization and classification of biological materials. Through multivariate regression techniques, absorbance spectra can be related to wood properties, allowing prediction in unknown samples. The objective of this work was to investigate the chemical characteristics of pau-marfim wood and develop models for predicting lignin and cellulose contents and basic wood density using near-infrared spectroscopy. Data on wood basic density and lignin and cellulose contents of 40 progenies were used, belonging to a test of provenances and progenies of open pollination of *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl (pau-marfim). Diffuse reflectance spectra were obtained using a portable LabSpec® 4 Standard-Res near-infrared spectrometer with a spectral range of 350 to 2,500 nm, in conjunction with the ViewSpec Pro program, version 6.2. To this end, ground samples from three replications of each of the 40 progenies were used to estimate previously known lignin and cellulose contents and basic wood density to obtain near-infrared reflectance spectra. The results obtained indicate that lignin and cellulose content can be estimated through near-infrared spectroscopy, having obtained high values of coefficients of determination and cross-validation for these two characteristics. For basic wood density, the coefficient of determination was low. Thus, the chemometric method using NIR diffuse reflection in sawdust from pau-marfim wood proved to be suitable for estimating lignin and cellulose contents, and the NIR technique presented itself as a useful tool for calibrating wood properties. of this species native to Brazil.

Keywords: Near-infrared spectroscopy; Non-destructible technique; Prediction models; Wood chemistry.

INTRODUÇÃO

A madeira é um material biológico, heterogêneo, abundante na natureza, formada por células constituídas basicamente por extrativos, celulose, hemicelulose e lignina e representa, de forma geral, a parte comercial mais importante das árvores (Carvalho et al., 2009). Sua composição única confere-lhe uma série de qualidades desejáveis, incluindo leveza, durabilidade e versatilidade. As indústrias de base florestal, como papel e polpa celulósica, siderurgias e madeireiras, têm uma demanda por métodos de caracterização de matérias-primas que sejam rápidos, precisos e escaláveis para lidar com um grande volume de amostras. Além disso, a madeira é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações, como na construção de pontes, edifícios, pisos e móveis (Hein et al., 2014). Segundo Kurt et al. (2017), é importante avaliar as propriedades físico-mecânicas da madeira por meio de ensaios não destrutivos para detectar possíveis defeitos e garantir sua integridade em uso.

A análise da madeira costuma ser demorada e, frequentemente, envolve métodos destrutivos. Isso limita a capacidade das empresas florestais e de pesquisa de analisar várias características tecnológicas em larga escala (Magalhães et al., 2005). Para diminuir o custo e o tempo necessários na análise das propriedades da madeira, têm surgido métodos de avaliação rápidos e não destrutivos. Muitos estudos têm investigado o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como uma alternativa aos métodos convencionais de análise de propriedades da madeira, incluindo aqueles relacionados à sua composição química, como teor de celulose, lignina e rendimento de polpa (Schimleck et al., 2018).

O NIR é uma técnica rápida e precisa, adequada para análise de um grande volume de amostras e pode ser aplicada a qualquer substância que contenha predominantemente ligações C-H, O-H, N-H, S-H ou C=O em suas moléculas (Hein e Chaix, 2014). O espectrômetro emite radiação infravermelha de comprimento de onda de 750 a 2.500 nm em direção à amostra do material em estudo e os sensores captam as oscilações nas vibrações moleculares de seus constituintes químicos, gerando uma assinatura espectral única. A análise dos dados espectrais e o desenvolvimento de modelos preditivos baseados nos espectros são realizados utilizando técnicas de análise univariada e multivariada de dados. Dessa forma, as

informações obtidas no espectrômetro são correlacionadas com as propriedades da madeira determinadas por métodos convencionais em laboratórios (Tsuchikawa e Kabori, 2015).

No setor florestal, essa técnica é empregada em larga escala na determinação de uma ampla gama de características da madeira, abrangendo propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas, principalmente com espécies do gênero *Eucalyptus*, matéria-prima mundialmente utilizada (Baldin et al., 2020). Embora o interesse em estudar as espécies florestais nativas exista há muitos anos, ainda há pouca compreensão sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas da maioria das espécies nativas brasileiras (Silva et al., 2014).

Balfourodendron riedelianum Engl. (Engl.), conhecido como pau-marfim, é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica, alcançando até 35 m de altura e um diâmetro de tronco de até 100 cm a 130 cm do solo. Suas flores são hermafroditas e polinizadas por pequenos insetos, enquanto suas sementes são dispersas pelo vento, processo conhecido como anemocoria (Carvalho, 2004). Com uma ampla distribuição geográfica, esta espécie é encontrada do estado de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul, estendendo-se até o Paraguai e Argentina (Pirani et al., 2020). Apesar de sua madeira ter grande valor econômico, sendo utilizada na construção civil, marcenaria, em projetos paisagísticos e na recuperação de áreas degradadas (CNCFLORA, 2023), *B. riedelianum* está ameaçado de extinção devido à exploração intensiva de sua madeira e à fragmentação do bioma Mata Atlântica (IUCN, 2019).

Esta espécie nativa apresenta um grande potencial para ser utilizada em plantios comerciais de maneira sustentável, fornecendo madeira de excelente qualidade. Sua madeira possui coloração branca ou levemente amarelada, sua superfície é lisa e medianamente lustrosa, com textura fina e grã regular. Apesar de sua moderada densidade, variando entre 800 e 900 kg.m⁻³, a madeira apresenta baixa resistência ao apodrecimento e ao ataque de agentes xilófagos (Mainieri e Chimelo, 1989).

No presente trabalho foram investigados indivíduos de 36 anos de *B. riedelianum* plantados na Estação Experimental de Luiz Antônio, totalizando 120 árvores, de 3 procedências de sementes: Alvorada do Sul, no estado do Paraná; Gália e Bauru, em São Paulo. Com isso, o objetivo deste trabalho foi investigar as características químicas da madeira de pau-marfim e desenvolver modelos de

predição da densidade básica da madeira e dos teores de lignina e celulose de maneira rápida, simples, confiável e não destrutiva, a partir da serragem dessas árvores, utilizando espectroscopia do infravermelho próximo (NIR).

MATERIAL E MÉTODOS

Procedência do material avaliado

Foram utilizados dados de um teste de procedências e progênes de polinização aberta de *Bauhfourodendron riedelianum* (pau-marfim), a partir de uma área implantada em 1986, na Estação Experimental de Luiz Antônio, no município de Luiz Antônio (SP) e pertencente à Fundação Florestal em parceria com o Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) do estado de São Paulo. A precipitação média histórica do município é de 1.286 mm, com temperatura média anual de 22,5 °C, com variação entre 19,3 e 24,3 °C, temperaturas mínimas entre 14,2 e 20,5 °C e temperaturas máximas entre 24,9 e 29,8 °C (CLIMATE-DATA.ORG, 2023).

O teste foi composto por materiais obtidos a partir de três procedências de sementes (Alvorada do Sul, no estado do Paraná; Gália e Bauru, em São Paulo, Brasil) e foram avaliadas 19 progênes por procedência. O desenho experimental foi o delineamento em blocos completos casualizados, com 6 repetições e parcelas lineares de cinco plantas, no espaçamento 3 x 3 m, totalizando 1.710 plantas.

Inicialmente foram avaliados o diâmetro a 1,30 m do solo, comumente denominado de diâmetro à altura do peito (DAP, em cm), a altura total (ALT, em m) e a sobrevivência (SOB, em %) das árvores no teste.

Com base na análise dos dados de DAP, e de forma a representar a variabilidade genética do teste, foram amostradas 40 progênes, sendo 27 dessas com valores genéticos positivos (superiores) e 13 com valores genéticos negativos (inferiores) e destas 40 progênes, foram amostradas e abatidas 3 árvores, totalizando 120 árvores amostradas.

Nas árvores abatidas foram amostrados seis discos com aproximadamente 5 cm de espessura, um dos discos foi amostrado na altura do DAP e os demais representando os seguintes percentuais do comprimento do fuste (altura comercial, correspondente ao comprimento desde a base até um diâmetro mínimo de 4 cm): 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% (topo).

Avaliação da densidade e caracterização química da madeira

Para a avaliação da densidade da madeira, os discos (obtidos conforme descrito no tópico anterior) foram devidamente identificados e encaminhados para o Laboratório de Sementes e Melhoramento Florestal para secagem. Desses discos foram retiradas amostras, em forma de cunha, para a determinação da densidade básica da madeira (DBM), pelo método da imersão em água. A densidade básica média da madeira foi obtida a partir dos vários pontos de amostragem ao longo do fuste, conforme descrito por Vital (1984).

Amostras compostas de madeira obtidas de cada disco foram picadas e moídas em moinho tipo Willey, para determinação de constituintes químicos. Anteriormente à determinação dos teores de lignina e de celulose, amostras da madeira moída foram submetidas ao processo de eliminação dos extrativos. Para tanto, foram usados 5 g de amostra seca de madeira de cada progênie e colocadas dentro de um Erlenmeyer, onde foi adicionada água quente. A água foi eliminada e substituída por outra, repetindo-se o procedimento até que a solução ficasse incolor. Após essa extração em água, as amostras foram levadas à extração em solução com tolueno e álcool etílico (1:2 v/v) e, posteriormente colocadas em filtro de papel e levadas a bomba a vácuo para uma última lavagem e pré-secagem. As amostras nos filtros de papel foram levadas para a estufa a 65 °C por 12 horas. Após esse procedimento a amostra ficou pronta para quantificação dos teores de lignina e celulose.

Teor de Lignina (LIG, %) - após eliminação dos extrativos, o teor de lignina foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986) usando-se amostras de 0,3 g de madeira moída.

Teor de Celulose Total (CEL, %) - determinado pelo método do ácido nítrico, conforme procedimento descrito em Santos e Sansígolo (2000).

Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e aquisição dos espectros NIR

Os espectros de reflectância difusa da espécie estudada foram obtidos com o auxílio do espectrômetro de infravermelho próximo LabSpec® 4 Standard-Res

portátil com faixa espectral de 350 a 2.500 nm, em conjunto com o programa ViewSpec Pro, versão 6.2.

Foram utilizadas amostras moídas das 3 repetições das 40 progênies, para a obtenção dos espectros de infravermelho próximo por reflectância. Todas as amostras foram secas a 60 °C durante 24 h para garantir umidade igual entre elas.

O equipamento registra 1050 medidas de absorbância em cada espectro obtido. Foi usado o método modificado dos mínimos quadrados parciais para levantamento das curvas de calibração entre os valores preditos pela técnica do NIR e os valores das propriedades medidas em laboratório. As calibrações foram feitas usando-se o software ViewSpec Pro do equipamento de NIR (ViewSpec Pro, 2008).

Análise de correlação e construção dos modelos de calibração NIR

Determinou-se a associação entre as características da madeira (teores de lignina e de celulose e densidade básica da madeira) e das medidas de espectroscopia, utilizando-se o software Python (Python Software Foundation, 2023).

Os espectros das 120 amostras adquiridos no espectrômetro de infravermelho próximo, foram importados ao computador e associados com os valores das propriedades da madeira determinados pelo processo convencional. Através do software View Spec Pro foi determinado o método de validação-cruzada. Foram utilizadas 90 amostras (75%) para realização da calibração e 30 amostras (25%) para a validação cruzada. A calibração do modelo foi determinada por análise de regressão dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS). Os modelos foram ajustados com o número de variáveis latentes (VLs) necessárias para fornecer o melhor ajuste, sem perder a variância dos dados.

Os modelos de calibração foram escolhidos com base em diferentes critérios, incluindo o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro médio da validação cruzada (RMSECV), o número de variáveis latentes (VLs) que minimizaram a RMSECV e maximizaram o R^2 , e o relação de desempenho do desvio (RPD). Segundo Schimleck et al. (2003), um valor de RPD acima de 1,5 é considerado satisfatório para a seleção de árvores em programas de melhoramento genético. Além disso, o RPD foi usado para avaliar a qualidade dos modelos de calibração, fornecendo uma medida padronizada do erro de predição e permitindo

a comparação entre diferentes propriedades (Prieto et al., 2013). Todas as calibrações e validações cruzadas foram realizadas usando-se o software View Spec Pro, versão 6.2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises químicas para a determinação dos teores de lignina e de celulose para as 40 progênes das 3 procedências de *Balfourodendron riedelianum*, usadas para a construção dos modelos de calibração, proporcionaram valores médios dos teores dessas duas características semelhantes aos relatados por Lobão (2011).

Para as variáveis analisadas são apresentadas as estatísticas de desempenho dos modelos de validação cruzada, selecionados pelos altos valores de coeficientes de determinação (R^2) e relação de desempenho do desvio (RPD), e baixos valores de RMSECV (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas associadas à fase de validação-cruzada dos modelos matemáticos preditivos desenvolvidos para características da madeira de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade, a partir da análise de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR).

Variáveis	Média	R^2	RMSECV	RPD
Teor de celulose (%)	45,30	0,82	0,69	2,39
Teor de lignina (%)	21,72	0,74	0,76	2,15
DBM	0,632	0,42	0,07	1,12

DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); R^2 : coeficiente de determinação; RMSECV: raiz quadrada do erro médio da validação cruzada; RPD: relação de desempenho do desvio.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que teor de lignina e celulose são características que podem ser avaliadas por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. As estatísticas associadas aos modelos preditivos apresentaram coeficientes de determinação em validação de 0,82 para celulose e 0,74 para lignina e, em validação cruzada valores de RMSECV de 0,69 a 0,76 para

ambas as características, respectivamente (Figura 1). Para a validação da densidade básica o coeficiente de determinação encontrado foi baixo.

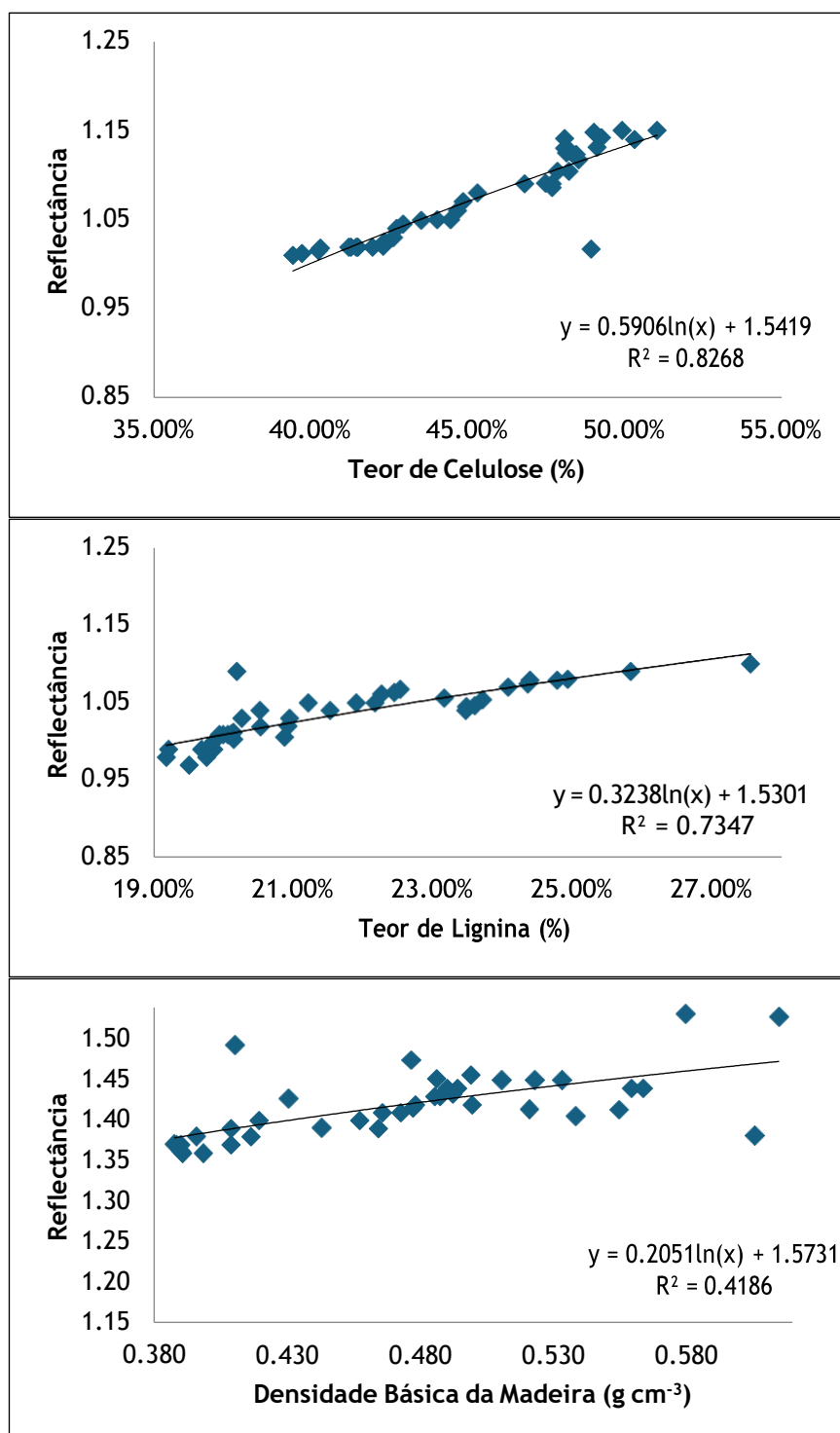


Figura 1. Relação entre os valores observados em laboratório e os valores de reflectância determinada por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para teores de lignina e de celulose e densidade básica em madeira de *Balfourodendron riedelianum* aos 36 anos de idade.

Os espectros de reflexão difusa de NIR para as três procedências estudadas, na região com comprimento de onda entre 400 e 2500 nm, obtidos do material de pau-marfim são apresentados na Figura 2. Os mesmos espectros, na região de 1550 a 1800 nm, determinado através da modelagem como sendo mais representativa para celulose (1555 nm) e lignina (1705 nm), podem ser visualizados na Figura 3. Esses espectros apresentam o mesmo aspecto para a serragem de madeira reportados na literatura, não ocorrendo a superposição das curvas, sendo assim, possível o uso de métodos estatísticos para a predição de propriedades físicas e químicas da madeira (Magalhães et al., 2005).

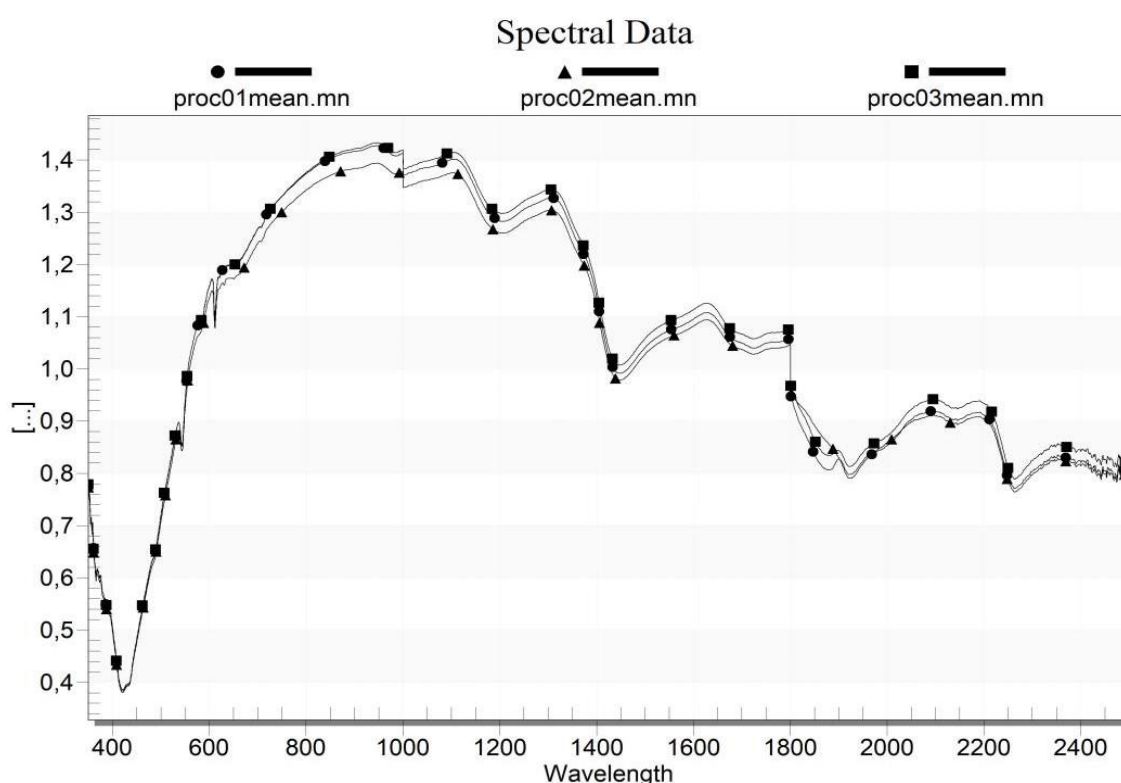


Figura 2. Espectros médios do conjunto de treinamento sem pré-processamento da madeira de progênies de pau-marfim pertencentes a três procedências.

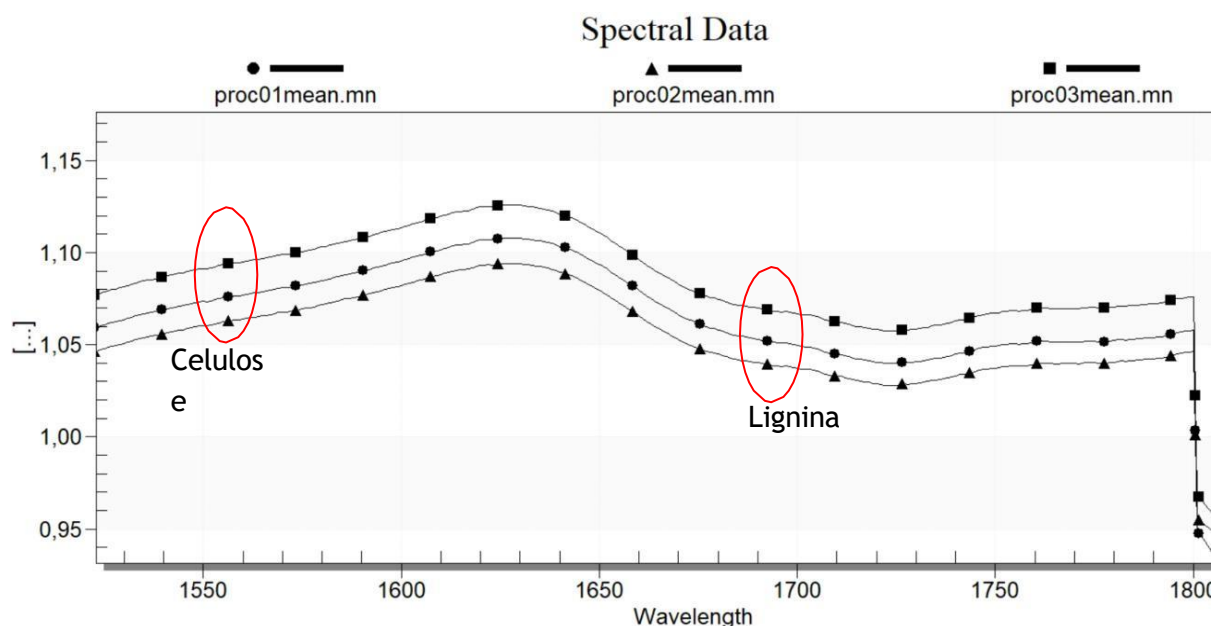


Figura 3. Espectros médios do conjunto de treinamento pré-processado com primeira derivada obtidos da madeira de progênies de pau-marfim pertencentes a três procedências.

Magalhães et al. (2005) corroboram que o espectro de 1705 nm se refere à lignina, assim como observado em madeira de pinus e eucalipto, já, o comprimento de onda de 1506 nm é atribuído à celulose, assim como descrito por Viana et al. (2010), em que se obteve uma correlação (r) de 0,914 e um erro padrão de calibração (RMSECV) de 1,07%. Lima et al. (2020) estudando a estimativa de propriedades de papel Kraft reforçado com celulose também detectaram que os mesmos comprimentos de onda possuem alta correlação com lignina e celulose. Deste modo, a espectrofotometria NIR parece ser um método sólido para a medição de lignina e celulose, gerando uma economia de tempo e determinações mais precisas (Lima et al., 2020).

CONCLUSÃO

O método quimiométrico por reflexão difusa de NIR em serragem de madeira de pau-marfim mostrou-se adequado para a estimação dos teores de lignina e de celulose e potencial ferramenta para uso em programa de melhoramento genético da espécie, tornando possível para avaliação precoce e não-destrutiva de características químicas importantes. Por outro lado, para a densidade básica a técnica não se mostrou adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baldin T, Talgatti M, Silveira AG, Dos Santos GA, Dos Santos OP, Valente BMRT (2020) Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage. **Caderno de Ciências Agrárias** 12:1-9. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2020.19296>

Carvalho PER (2004) Pau-marfim, *Balfourodendron riedelianum*. **Circular técnica Embrapa Florestas** 93:1-11.

Carvalho W, Canilha L, Ferraz A, Milagres AMF (2009) Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova** 32:2191-2195. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800033>. Acesso em 23 abr 2024.

CLIMATE-DATA. ORG. (2023) **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/sao-paulo/luis-antonio-34805/>

CNCFLORA (2023) *Balfourodendron riedelianum* in **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2** Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Balfourodendronriedelianum>>. Acesso em 11 julho 2023.

Hein PRG, Chaix G (2014) NIR spectral heritability: a promising tool for wood breeders? **Journal Near Infrared Spectroscopy** 22:141–147. Doi: <https://doi.org/10.1255/jnirs.1108>.

Hein PRG, Lima JT, Chaix G (2010) Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de eucalyptus. **Floresta** 40:615-624.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN (2019) **Red List of Threatened Species**. 1998: e.T32987A9741568. Version 2015-4. Available at: <<https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>>. Acessado em Novembro de 2020.

Kurt S, Korkmaz M, Özcan C, Dünder T, Aktas M (2017) A new method in NDT of wood: Thermal conductivity. **The Online Journal of Science and Technology** 7:1-4.

Lima LC, Costa LR, Carvalho AMML, Bianchi ML, Hein PRG (2022) Near Infrared Spectroscopy For Estimating Properties Of Kraft Paper Reinforced With Cellulose Nanofibrils. **CERNE** 28:1-13, e-102985. doi: 10.1590/01047760202228012985

Lobão RM (2011) Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis** 39:469-477.

Magalhães WLE, Pereira JCD, Muñiz GIB, Klock U, Da Silva JRM (2005) Determinação de Propriedades Químicas e Anatômicas de Madeira com o Uso da Reflexão Difusa de Infravermelho Próximo. **Boletim de Pesquisa Florestal** 50:25.

Mainieri C, Chimelo JP (1989) Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, 1989. 418p.

Pirani JR, Groppo M, Dias P (2020) Rutaceae in Flora do Brasil 2020 em construção. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: [HTTP://florado.brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343](http://florado.brasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB343). Acesso em 12 de dezembro de 2020.

Prieto N, Dugan MER, López-Campos O, Aalhus JL, Uttaro B (2013) At line prediction of PUFA and biohydrogenation intermediates in 21 perirenal and subcutaneous fat from cattle fed sunflower or flax seed by near infrared spectroscopy. **Meat Science** 94:27–33. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.12.014>.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. (2023) **Python Language** Site: Documentation, 2023. Página de documentação. Disponível em: [<https://www.python.org/doc/>](https://www.python.org/doc/). Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

Ramadevi P, Hegde DV, Varghese M, Kamalakannan R, Ganapathy SP, Gurumurthy DS (2016) Evaluation of lignina syringyl/guaiacyl ratio in *Eucalyptus camaldulensis* across three diverse sites based on near infrared spectroscopic calibration modelling with five Eucalyptus species and its impact on Kraft pulpyield. **Journal Near Infrared Spectroscopy** 24:529-536. Doi: <https://doi.org/10.1255/jnirs.1251>.

Santos CR, Sansígolo CA (2000) Métodos não-normatizados para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-AQ. **Iberoamerican Congress on Pulp and Paper**, 13p.

Schimleck LR, Doran JC, Rimbawanto A (2018) Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51:2433-2437. Doi: <https://doi.org/10.1021/jf020981u>

Silva DA, Almeida VC, Viana LC, Klock U, Muñiz GIB (2014) Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente** 21(4):561-568.

Soares CPB, Paula Neto F, Souza AL (2006) **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p

Tsuchikawa S, Kobori H (2015) A review of recente application of near infrared spectroscopy to woods cience and technology. **Journal Wood Science** 61:213-220. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>.

Viana LC, Truguilho PF, GherardiPRh, Da Silva JM, Lima JT (2010) Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, **Ciência Florestal** 20:367-376.

View Spec Pro™ (2008) **User Manual. ASD Inc: versão 6.2:** ASD Document 600555 Rev. A. 28.