



PAULO JUNIO DUARTE

**MÉTODOS CONVENCIONAL E DE APRENDIZAGEM DE
MÁQUINA NA IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRA COMO
INSTRUMENTOS PARA O CONTROLE DO COMÉRCIO DE
ESPÉCIES TROPICAIS**

**LAVRAS – MG
2025**

PAULO JUNIO DUARTE

**MÉTODOS CONVENCIONAL E DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA NA
IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRA COMO INSTRUMENTOS PARA O CONTROLE
DO COMÉRCIO DE ESPÉCIES TROPICAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Natalino Calegário
Orientador

Prof.^a Dra. Cilene Cristina Borges
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Duarte, Paulo Junio.

Métodos convencional e de aprendizagem de máquina na
identificação de madeira como instrumento para o controle do
comércio de espécies tropicais / Paulo Junio Duarte. - 2023.

83 p. : il.

Orientador(a): Natalino Calegario.

Coorientador(a): Cilene Cristina Borges.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Recursos florestais. 2. Tecnologia da madeira. 3. Anatomia da
madeira. I. Calegario, Natalino. II. Borges, Cilene Cristina. III. Título.

PAULO JUNIO DUARTE

**MÉTODOS CONVENCIONAL E DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA NA
IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRA COMO INSTRUMENTOS PARA O CONTROLE
DO COMÉRCIO DE ESPÉCIES TROPICAIS**

**CONVENTIONAL AND MACHINE LEARNING METHODS IN WOOD
IDENTIFICATION AS INSTRUMENTS FOR CONTROLLING TROPICAL TIMBER
TRADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de dezembro de 2023
Dr. Fabio Akira Mori UFLA
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA
Dra. Cilene Cristina Borges UTFPR
Dr. Francis Lívio Corrêa Queiroz INDEA-MT

Prof. Dr. Natalino Calegário
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por conceder tantas bênçãos durante a jornada como pesquisador e permitir que tivesse saúde mental e física para conclusão do doutorado.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente ao Departamento de Ciências Florestais (DCF) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

Aos professores do PPGCTM que contribuíram significativamente no aperfeiçoamento de meus conhecimentos, em especial ao meu orientador Natalino Calegário pelas trocas de experiências e ao Professor Paulo Ricardo Gherardi Hein pela empatia demonstrada comigo e com os demais alunos.

A todos os funcionários do DCF/UFLA pelos serviços prestados.

Ao Rafael Ávila que me apoiou no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de doutorado e taxas de bancada para pesquisa e participação em eventos.

Ao Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) pela oportunidade de atuar no mercado como Agente Local de Inovação e investir na formação de vários atores do ecossistema empreendedor.

Ao meu filho Joaquim, que nasceu durante esse período de doutorado e que foi a maior fonte de inspiração, me fez descobrir o meu propósito e me deu forças para concluir este trabalho.

À Nagla, pela parceria nesse tempo, pela paciência e apoio incondicional durante a realização do doutorado, sem você não conseguiria, obrigado.

À minha mãe Aparecida que está ao meu lado em todos os momentos, acreditando e motivando para conseguir alcançar meus objetivos. Te amo muito mamãe!

À minha irmã Hortência, que me apoiou na realização deste trabalho e ajudou a corrigir os erros ortográficos da tese.

Para todos os meus familiares e a minha cidade natal Bambuí, obrigado.

A todos os amigos que torceram por mim, essa conquista é nossa! Provavelmente, iremos celebrar isso.

MUITO OBRIGADO!

“Estabilidade não existe”

(Flávio Augusto Silva)

RESUMO GERAL

O desmatamento e o comércio ilegal de madeiras são grandes ameaças a sustentabilidade do planeta. Os esforços internacionais para impedir o avanço destes crimes ambientais incluem a criação de leis, restrições de comercialização para determinadas espécies e a fiscalização. Entretanto, tais medidas possuem baixa eficácia na prática, as leis e os documentos oficiais podem ser fraudadas, uma vez que diversas madeiras ameaçadas são comercializadas livremente no comércio. Objetivou-se avaliar a acurácia de metodologias de identificação tradicional e abordagens tecnológicas na classificação de dez espécies madeireiras disponíveis no varejo brasileiro, incluindo espécies ameaçadas de extinção. Também se determinaram quais os padrões anatômicos evidenciam a correta identificação de oito espécies madeireiras oriundas da região Amazônica. Os resultados obtidos no primeiro trabalho mostraram o potencial da classificação baseada em Redes Neurais Convolucionais (CNN) que alcançou acurácia global superior a 95% na identificação de madeiras nativas ameaçadas, *Amburana cearensis* (100%), *Bertholletia excelsa* (99%), *Cedrela odorata* (96%). Este modelo baseado no algoritmo Inception V3 também conseguiu classificar com precisão os táxons de alto valor comercial *Aspidosperma* sp. (100%), *Diploptropis* sp. (98%), *Dypterix odorata* (99%) e *Hymenolobium petraum* (100%). Apesar disso, o modelo teve dificuldades em identificar táxons similares, *Erismia uncinatum* (95%), *Guarea* sp. (94%) e *Vochysia* sp. (82%), madeiras comumente agrupadas pelo nome “cedrinho” na região de Lavras, estado de Minas Gerais. A partir da análise macroscópica das madeiras similares, observou-se que o parênquima axial foi o caractere determinante para separar os táxons estudados. Aparentemente, as estruturas anatômicas das madeiras funcionam em padrões, que utilizamos para determinar a sua identidade botânica. Baseado nas informações anatômicas e outros dados relevantes das espécies, apresentamos nesse trabalho de tese a Smart Timber ID, identidade digital da madeira que busca fornecer transparência e evidências para a rastreabilidade de produtos de origem florestal. Espera-se que a integração de métodos tecnológicos e tradicionais, bem como a disponibilização desse documento digital promova a sustentabilidade do mercado internacional de madeiras tropicais, auxiliando assim a conservação de várias espécies nativas e promovendo o consumo consciente.

Palavras-chave: Floresta Amazônica. Comércio ilegal de madeiras. Anatomia da madeira. Inteligência artificial. CNN. Espécies ameaçadas. Madeira tropical.

GENERAL ABSTRACT

Deforestation and illegal timber trade are major threats to the planet's sustainability. International efforts to prevent the spread of these environmental crimes include the creation of laws, commercial restrictions for certain species and inspection. However, such measures have low effectiveness in practice, laws and official documents can be defrauded, since several threatened woods are freely traded in commerce. The objective was to evaluate the accuracy of traditional identification methodologies and technological approaches in classifying ten timber species available at Brazilian retail, including species threatened with extinction. It was also determined which anatomical patterns demonstrate the correct identification of eight wood species from the amazon region. The results obtained in the first work showed the potential of classification based on Convolutional Neural Networks (CNN), which achieved global accuracy greater than 95% in identifying threatened native wood *Amburana cearensis* (100%), *Bertholletia excelsa* (99%), *Cedrela odorata* (96%). This model based on the Inception V3 algorithm was also able to accurately classify taxa of high commercial value *Aspidosperma sp.* (100%), *Diploptropis sp.* (98%), *Dypterix odorata* (99%) and *Hymenolobium petraum*(100%). Despite this, the model had difficulty identifying similar taxa *Erisma uncinatum* (95%), *Guareasp.* (94%) and *Vochysiasp.* (82%), wood commonly grouped by the name “cedrinho” in the region of Lavras, Minas Gerais state. From the macroscopic analysis of similar woods, it was observed that the axial parenchyma was the determining pattern to separate the studied taxa. Apparently, the wood anatomy structures function in patterns, which we used to determine their botanical identify. Based on anatomical information and other relevant data on the species, in this thesis we present Smart Timber ID, a digital wood identity that seeks to provide transparency and evidence for the traceability of origin the forests products. It is expected that the integration of technological and traditional methods, as well as the availability of this digital document, will promote the sustainability of the international tropical timber market, thus helping the conservation of several native species and promoting awareness consumption.

Keywords: Amazon rainforest. Illegal logging. Wood Anatomy. Artificial intelligence. CNN. Endangered species. Tropical timber.

INDICADORES DE IMPACTO

O trabalho de tese “Métodos convencional e de aprendizagem de máquina na identificação de madeira como instrumentos para o controle do comércio de espécies tropicais” visa contribuir para melhoria da fiscalização ambiental contra crimes que envolvem o comércio ilegal de madeiras. Objetivou-se nesse estudo avaliar a eficácia de algoritmos de inteligência artificial combinando a tecnologia com a técnica tradicional da anatomia para identificação de madeiras comerciais. Além disso, foram apresentados protótipos digitais para identificação de objetos de madeiras para varejos, uma forma de estimular o consumo responsável e consciente (ODS 12), bem como tornar comunidades e cidades sustentáveis (ODS 11). Este trabalho de pesquisa também desempenhou seu papel extensionista mobilizando um estudante de Engenharia de controle e automação, três professores da UFLA e servidores de órgãos públicos como o Serviço Florestal Brasileiro. Além disso, a proposta do trabalho foi pautada em desenvolver tecnologia para o mercado, sendo que um dos produtos deste foi um registro de software no INPI, o Smart Timber System®. Esse sistema integra inteligência artificial e *machine vision* para identificar em tempo real madeiras brasileiras, a base de dados possui 10 espécies da região amazônica cadastradas. Espera-se que o sistema possa ser utilizado para fiscalização de órgãos federais, estaduais ou municipais, a tecnologia foi desenvolvida dentro da Universidade Federal de Lavras e encontra-se disponível para transferência de tecnologia para instituições parceiras.

IMPACT INDICATORS

The thesis work “Conventional and machine learning methods in wood identification as instruments for controlling tropical timber trade” aims to contribute to improving environmental enforcement against crimes involving the illegal timber trade. This study aimed to evaluate the effectiveness of artificial intelligence algorithms by combining technology with the traditional technique of anatomy for the wood identification. Additionally, digital prototypes for identifying wood objects in retail were presented, as a way to promote responsible and conscious consumption (ODS 12) and to make communities and cities sustainable (ODS 11). This research also played an extensionist role by involving a Control and Automation Engineering student, three professors from UFLA, and staff from public agencies such as the Brazilian Forest Service. Furthermore, the project aimed to develop technology for the market, resulting in a registered software product at INPI, the Smart Timber System®. This system integrates artificial intelligence and machine vision to identify Brazilian woods in real time, with a database containing 10 species from the Amazon region. It is expected that the system can be used for enforcement by federal, state, or municipal agencies. The technology was developed at the Federal University of Lavras and is available for technology transfer to partner institutions.

SUMÁRIO

	APRESENTAÇÃO DA TESE	11
	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Madeira: bem durável e ecologicamente correto para o consumo humano	15
2.2	Comércio ilegal de madeiras: conceito, desafios e oportunidades	16
2.3	Integração de métodos de identificação no combate a crimes ambientais	19
2.3.1	Identificação pela Anatomia da madeira	19
2.3.2	Avanço tecnológico nas ferramentas na identificação aplicáveis em campo	21
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	25
	REFERÊNCIAS	25
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	30
	ARTIGO 1 - MACHINE LEARNING APPROACH CONTRIBUTE TO REDUCING ENVIRONMENTAL CRIMES IN THE TROPICAL TIMBER MARKET	30
	ARTIGO 2 – PADRÕES ANATÔMICOS NA MADEIRA REVELAM EVIDÊNCIAS-CHAVE PARA IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES NATIVAS COMERCIALIZADAS NO VAREJO	52
	TERCEIRA PARTE – CONCLUSÃO DA TESE	82

APRESENTAÇÃO DA TESE

A tese está subdividida em três partes. A primeira é composta por uma introdução geral da tese, com a contextualização do tema do trabalho, objetivos gerais e específicos. Além disso contém uma revisão bibliográfica abordando aspectos referentes ao potencial da madeira como matéria-prima industrial, os problemas relacionados ao comércio ilegal de madeiras e as restrições de mercado, a identificação de madeiras como serviço para controle da comercialização de madeiras com enfoque na metodologia tradicional pela anatomia do lenho e por fim os avanços tecnológicos na área. A segunda parte foi estruturada em dois artigos. O primeiro é referente à abordagem de aprendizagem de máquinas na redução de crimes ambientais relacionados ao comércio ilegal de madeiras tropicais. As principais contribuições desse artigo foram a alta acurácia do modelo de aprendizagem de máquinas adaptado ao algoritmo Inception V3 na classificação de madeiras nativas do Brasil, incluindo três espécies ameaçadas de extinção *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm. (Fabaceae), *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Lecythidaceae) e *Cedrela odorata* L. (Meliaceae). A proposta do segundo artigo foi identificar oito madeiras nativas de origem amazônica apontando quais padrões são determinantes para distingui-las. Este trabalho contribui com o estudo sobre oito espécies tropicais, incluindo três ameaçadas de extinção, indicando evidências-chave para identificação e conservação. Além disso, apresentamos um protótipo de identidade digital da madeira e abordamos as possibilidades desse mecanismo de verificação ágil poder regularizar o varejo de madeiras tropicais. Outro ponto importante do artigo foi gerar e disponibilizar uma chave de identificação de madeiras para que as pessoas possam distinguir as espécies do estudo. A terceira parte consiste na conclusão geral da tese abordando os principais resultados encontrados, as contribuições para anatomia e identificação de madeiras, além de sugestões para novas pesquisas.

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O desmatamento e o comércio ilegal de madeiras são atividades ilegais que prejudicam o desenvolvimento sustentável. O negócio multimilionário dos crimes ambientais fatura mais de U\$180 bilhões em lucros ilícitos, além disso, gera problemas ambiental, sociais e econômicos para toda cadeia de suprimentos da madeira (JOHNSON; LAESTADIUS, 2011).

A produção, consumo e o comércio de recursos florestais estão entre as metas globais necessárias para o desenvolvimento do manejo florestal sustentável do Brasil (SCARANO; SILVA, 2018). Entretanto, os crimes acontecem com frequência e a acusação é dificultada pela ausência de mecanismos de verificação da identidade e origem da madeira.

Esforços internacionais para combater o comércio ilegal de madeiras consistem na promulgação de leis, proibição do comércio de espécies ameaçadas de extinção ou limitar a venda de táxons conforme as regiões. Essas restrições comerciais são expedidas pela Convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies Ameaçadas de Flora e Fauna Selvagens (CITES), que lista as espécies em três apêndices, dependendo do grau de proteção exigido (DORMONTT et al. 2015).

No Brasil por exemplo, alguns gêneros outrora explorados pela indústria florestal madeireira, como *Araucaria* Juss. (Araucariaceae), *Cedrela* P. Browne e *Swietenia* Jacq. (Meliaceae) possuem restrições de comercialização, estão regulamentadas pela CITES e em tese deviam ser conservadas. Apesar disto, diversas fraudes acontecem no mercado de madeira nativa no País, Nascimento et al. (2017) relataram 49 inconsistências de comercialização no estado do Rio de Janeiro. Duarte et al. (2020) encontrou três espécies similares da família Sapotaceae vendidas como Guajará em Lavras, Minas Gerais. Duarte et al. (2021) detectaram erros na comercialização de madeiras tropicais por nomes populares no estado de Minas Gerais, incluindo a venda deliberada do gênero *Cedrela*, táxon amplamente explorado e listado no Apêndice III da CITES.

A maioria dos crimes acontecem devido as falsas declarações de identidade encontradas no mercado e as fraudes na forma como os produtos são descritos e vendidos (WIEDENHOEFT et al. 2019). No Brasil, o Documento de Origem Florestal (DOF) que controla a comercialização de madeiras, ele representa uma licença obrigatória para transportar e armazenar produtos florestais indicando a espécie, quantidade, uso comercial, origem e destino (BRANDES et al.

2022), entretanto, existem muitas maneiras de contornar o sistema DOF (CARVALHO et al. 2019; LENTINI et al., 2022).

Há uma lacuna relacionada aos métodos de verificação independente da origem da madeira que limita a aplicação eficaz e a transparência da cadeia de suprimentos, uma vez que, atualmente a origem da madeira é validada por documentos e etiquetas externas. Em vista disso, novas metodologias para rastreabilidade da madeira baseadas nas propriedades intrínsecas da madeira ao invés de documentos externos, pode desempenhar papel crucial no combate ao comércio ilegal de madeira (LOWE et al., 2016).

Métodos científicos para verificação da taxonomia e/ou origem da madeira baseiam-se nas características anatômicas, químicas ou genéticas do lenho. Todas as identificações de madeira dependem de amostras de referência, e esses espécimes são o cerne para determinar se os documentos comerciais listam os nomes taxonômicos corretos e as origens geográficas (SCHMITZ, 2020).

A anatomia da madeira é a técnica mais difundida no mundo, tanto na linha de frente para fins de triagem e no laboratório para identificação diagnóstica (DORMONTT et al., 2015). O método realizado por especialistas possui duas abordagens distintas, a análise macroscópica e a microscópica. A observação macroscópica é a técnica ágil usada na triagem de madeiras e consiste em analisar visualmente as estruturas do lenho com o auxílio de lupas de aumento, sendo por vezes suficiente para a identificação de táxons.

Apesar dos aspectos positivos deste método, é evidente que ele está a atingir seu limite. As principais limitações são a dificuldade de se identificar ao nível de espécie, os altos custos com o treinamento, o tempo necessário para formação de novos anatomistas e a baixa disponibilidade destes no mercado (SILVA et al., 2022).

A aplicação de tecnologia na identificação da madeira pode compor uma relevante oportunidade para combater a extração ilegal de madeiras, detectando produtos ilícitos e impulsionando operações legítimas. As tecnologias têm potencial de aplicação tanto para o setor privado como para autoridades governamentais. O setor privado deve cumprir os regimes regulamentares aplicáveis. As autoridades governamentais têm a tarefa de monitorar o cumprimento da lei por parte dos operadores econômicos e da aplicação da lei em caso de irregularidades (VAN BRUSSELEN; CRAMM; TEGEGNE, 2023).

Dentre as possibilidades analisadas, a *Deep Learning* parece ser a mais promissora na elaboração de Inteligência Artificial capazes de classificar madeiras por meio de imagens,

sendo as redes neurais convolucionais (CNN) aplicado nesse contexto os sistemas líderes de evolução (HWANG; SUGIYAMA, 2021; SILVA et al., 2022).

Inúmeros trabalhos na literatura alcançaram resultados superiores a 90% de acurácia na classificação de espécies usando modelos baseados em IA, Paula Filho et al. (2014) desenvolveram um modelo de redes neurais artificiais (RNA) para classificar 41 espécies brasileiras e alcançaram 97,77% de acurácia. Ravindran e Wiedenhoeft (2020) elaboraram um sistema inteligente e distinguiram 10 espécies da família Meliaceae com 96% de eficácia em nível de gênero. Andrade, Basso e Latorraca (2020) geraram 2.000 imagens macroscópicas de 21 espécies da flora brasileira usando Smartphone e amostras polidas manualmente com uma faca para replicar condições de campo, o algoritmo baseado em *Support Vector Machine* (SVM) atingiu 97,7%.

Com o avanço da IA, o uso da tecnologia pode fornecer resultados rápidos e agilidade no uso para atender a demanda pela digitalização do processo de identificação de madeira. Por isso, torna-se necessário a realização de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de classificar espécies tropicais comercializadas no Brasil, incluindo táxons ameaçados de extinção. A importância disso vai além do aspecto econômico das empresas que muitas vezes vendem produtos sem saber a real procedência e dos consumidores que podem comprar madeiras ilegais, a relevância deste estudo é gerar algo útil para promover a sustentabilidade do mercado de madeiras e agregar valor a este material nobre e valioso.

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi (i) avaliar o potencial do modelo de inteligência artificial baseado em CNN para classificar dez espécies tropicais nativas do Brasil; (ii) elaborar o protótipo de identidade digital que seja aplicável como mecanismo verificador de procedência para a comercialização de madeiras no Brasil. A validação dos métodos busca facilitar e acelerar a digitalização do processo de identificação das madeiras, durante o processo de industrialização, fiscalização e comercialização.

Os objetivos específicos da tese estão listados a seguir:

1. Propor uma nomenclatura comercial unindo o conhecimento científico com os saberes tradicionais.
2. Realizar a caracterização macroscópica das espécies tropicais utilizadas no trabalho.
3. Levantar todas as características anatômicas convergentes e divergentes entre as espécies do estudo.

4. Gerar uma chave de identificação capaz de diferenciar espécies tropicais vendidas no varejo, visando auxiliar fiscais, empresas e/ou consumidores finais na verificação da identidade durante o processo industrial e de comercialização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira: bem durável e ecologicamente correto para o consumo humano

A madeira é o material renovável mais importante do planeta servindo como matéria-prima sustentável para diversas indústrias (KIM; FUNADA; SING, 2016). Também conhecida por lenho ou xilema secundário, a madeira é um tecido complexo formado a partir da ação fisiológica do câmbio vascular, na sua constituição existem células diversas organizadas em diferentes proporções e arranjos anatômicos e químicos (PANSIN; DE ZEEW, 1980).

Esse recurso florestal é um dos três materiais mais usados nas atividades da construção civil moderna. Contudo, o aumento do uso de madeira não pode levantar preocupações em relação ao desmatamento. Diversas iniciativas buscam regular a proveniência da madeira para garantir que ela seja de origem legal, ou seja, de florestas manejadas de forma responsável (RAMAGE et al. 2017).

A viabilidade econômica do Manejo Florestal Sustentável na região depende de melhorias na governança, nos processos e sistemas da cadeia de suprimentos. A madeira extraída legalmente não pode competir com a madeira extraída ilegalmente porque a grande oferta desta última reduz os preços de mercado. É improvável que a extração ilegal de madeira seja controlada apenas pelos esforços do governo e sem o envolvimento dos consumidores (VIDAL et al. 2020).

No Brasil, o setor da construção civil, o maior consumidor de madeira tropical do país, precisa se conscientizar de que não somente a qualidade e os custos da madeira são importantes, mas também a origem. É preciso adotar políticas de compras responsáveis, restringindo a aquisição de madeira de desmatamento e de fontes ilegais ou desconhecidas. Além disso, é preciso incentivar a mudança de comportamento das empresas e dos consumidores de madeira atuais, nesse contexto, é necessário acrescentar um ingrediente essencial: informação (ZENID, 2009).

Para melhoria do setor madeireiro, uma agenda envolvendo produtores, compradores, governos e demais stakeholders precisa ser idealizada em torno de uma estratégia em comum.

Dentre as inúmeras possibilidades de estratégias para a melhoria no mercado brasileiro de madeira tropical destacam-se o desenvolvimento de ferramentas, monitoramento e inteligência para os riscos de legalidade, criação de sistemas de rastreabilidade, certificação e verificação, bem como a implantação de planos de negócios inovadores e cases de investimento no setor (LENTINI et al., 2022).

O controle eficiente das cadeias de abastecimento de madeira é fundamental para a conservação das espécies e do meio ambiente. Os esforços internacionais para controlar o comércio ilegal de madeira têm sido implementados, mas as inconsistências entre os tratados nacionais e internacionais fornecem brechas legais, e os controles legais de espécies brasileiras ameaçadas de extinção têm sido ineficazes (BRANDES et al., 2022).

Segundo Dormontt et al. (2015), a acusação de crimes de extração ilegal de madeira é dificultada pela falta de ferramentas de verificação da rastreabilidade da madeira, tanto para triagem de material suspeito como para a identificação definitiva de madeira de origem ilegal. Dessa forma, a divulgação de informações tecnológicas de madeiras tropicais encontradas no mercado e as tecnologias disponíveis para rastreá-las passam a ser estratégias essenciais para conservação da biodiversidade do País.

2.2 Comércio ilegal de madeiras: conceito, desafios e oportunidades

O termo “extração ilegal” abrange não apenas a exploração irracional da madeira, mas também todas as atividades associadas, como transporte, processamento e comércio de madeira em desacordo com as leis nacionais e internacionais. Exemplos típicos de atividades ilegais englobam o corte de árvores em áreas de preservação, a colheita de espécies ameaçadas que são protegidas por leis nacionais ou pela CITES, a extração que ultrapassa as cotas anuais autorizadas, a obtenção de licenças por meio de suborno, o transporte ou exportação sem o pagamento dos devidos impostos ou a apresentação de documentação adequada, bem como a declaração incorreta de espécie, valor ou volume em operações de exportação ou importação (JOHNSON; LAESTADIUS, 2011).

Globalmente, calcula-se que cerca de metade da exploração florestal realizada em regiões da Ásia, África Central, Rússia e América do Sul seja ilegal. O comércio de madeira ilegalmente explorada é uma indústria que movimenta bilhões de dólares e alimenta uma extensa rede criminosa associada a guerras, conflitos étnicos, violação de direitos humanos, crimes ambientais e sonegação fiscal (WWF, 2006).

Brancalion et al. (2018) confirmaram diversas fraudes na cadeia de suprimentos na região Amazônica, seja na superestimação de volumes de espécies madeireiras mais valiosas ou na adoção de estratégias complementares para gerar “excedentes” de madeira licenciada que podem ser usadas para legalizar madeiras provenientes de extração ilegal.

A atividade madeireira ilegal e predatória, assim como as queimadas e o desmatamento ilegal são os principais obstáculos para a manutenção da sustentabilidade na Amazônia. Em menos de 50 anos, quase 20% da cobertura florestal da região já desapareceu (ZENID, 2009). No estado Pará, maior produtor de madeira da Amazônia brasileira, estima-se que cerca de 44% (46.149 ha) da madeira nativa colhida entre 2015 e 2016 nesse estado foi ilegal (VIDAL et al. 2020).

Os principais esforços internacionais para regularizar o mercado de essências florestais consistem na elaboração de leis destinadas a desencorajar o comércio de madeira de origem ilegal, proibir ou limitar o comércio de espécies ameaçadas ou localizadas em áreas geográficas específicas (DORMONTT et al., 2015).

Países como o Canadá (1992), EUA (2008), União Europeia (2010) e Austrália (2012) tem direcionamentos claros e proíbem a comercialização de produtos advindos da extração ilegal de madeiras (LOWE et al., 2016). Um modelo positivo de regulamentação citado por especialistas é o da EUTR, que estabelece um conjunto de boas práticas a serem executadas pelos operadores de mercado responsáveis pela introdução dos produtos no mercado europeu, incluindo tarefas de diligência devida (DD). Desde 2021, a legislação da União Europeia com relação à origem da madeira e de outras commodities continuam em aprimoramento para incluir o desmatamento e a degradação florestal nos países em que tais cadeias produtivas se originam (LENTINI et al., 2022).

No Brasil, o controle da origem da madeira, seus produtos e subprodutos são amparados pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, também chamada de novo código florestal (BRASIL, 2012) e determina ao Ibama a criação do Sistema Nacional de Controle da Origem de Produtos Florestais (Sinaflor), uma plataforma para cadastro e emissão de autorizações para a extração florestal. Também é exigido pela lei que o transporte e o armazenamento de madeiras e seus derivados, oriundos de florestas nativas, seja para fins comerciais ou industriais, devem ocorrer amparados pela licença concedida pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) (MARTINS; NONNENBERG, 2022).

A forma como a aquisição de madeira é realizada afeta diretamente os recursos florestais e os ecossistemas locais. Para evitar esse risco ecológico, as nações ricas que detém políticas

ambientais relativamente rígidas muitas vezes mitigam o impacto ambiental por meio de regulamentações no comércio internacional dos países em desenvolvimento, esses geralmente possuem legislações fracas e fiscalização irregular (BUONGIORNO; JOHNSTON; ZHU, 2017).

Para comprovar que a extração foi autorizada pelo órgão fiscalizador, é emitido, a partir do Sisnama, o documento de origem florestal (DOF), que contém dados sobre a origem e o destino, sobre os produtos, as espécies, os volumes autorizados e os volumes remanescentes, entre outros. Entre outras funções, o DOF é fundamental para assegurar o transporte e o armazenamento legal da madeira nativa no território nacional, por meio da nota fiscal correspondente (MARTINS; NONNENBERG, 2022).

O governo brasileiro, por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA), divulgou a lista atualizada de espécies da flora ameaçadas por meio da Portaria nº 148, de 7 de junho de 2022 (MMA, 2022). O Brasil também possui espécies florestais que são protegidas por legislação federal, proibindo assim o seu corte, como a Castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl. - Decreto 5.975/2006); Seringueira (*Hevea* spp Aubl. - Decreto 5.975/2006) e o Mogno (*Swietenia macrophylla* King. - Decreto 6.472/2008) (MMA, 2014).

Nos últimos anos houve mudanças significativas no comércio de algumas madeiras tropicais. A CITES decidiu que todos os indivíduos do gênero *Dalbergia* L.f. serão protegidas pelo Apêndice II, apenas a *Dalbergia nigra* (Vell.) Allemão ex Benth. – jacarandá-da-bahia – consta no apêndice I, devido à alta demanda no mercado de móveis de alto luxo da China. Embora nem todos os gêneros *Dalbergia* estejam ameaçadas pelo setor mobiliário, a CITES no mesmo ano decidiu criar uma regulamentação geral sobre todo as madeiras de *Dalbergia*, devido à enorme dificuldade em treinar funcionários na linha de frente para reconhecer as inúmeras espécies diferentes que existem (ITTO, 2017).

Para fins de conformidade regulatória, é essencial a capacidade de distinguir visualmente entre membros de uma família ou gênero que possuam semelhanças morfológicas, mas que se originem em regiões geograficamente distintas. Essa habilidade desempenha um papel fundamental na redução probabilística de lavagem de dinheiro ou declarações incorretas, permitindo que o mercado responda adequadamente às variações na demanda. Espécies como os jacarandás (*Dalbergia* spp.), ébanos (*Diospyros* spp. L.) e cedros (*Cedrela* spp. L.) são exemplos de táxons cujas várias espécies estão sob ameaça devido ao comércio ilegal ou insustentável, sujeitas a regulamentações específicas em seus países de origem. O potencial de conservação de espécies protegidas pela indústria madeireira e nas cadeias de suprimentos

certamente aumentaria se fossem mais amplamente disponíveis instrumentos de detecção rápidos, confiáveis e de baixo custo (JOHNSON; LAESTADIUS, 2011).

2.3 Integração de métodos de identificação no combate a crimes ambientais

Historicamente, o desenvolvimento de ferramentas de identificação ocorre de forma independente, graças a integração de técnicas tradicionais de identificação de madeira e os saltos tecnológicos feitos pela indústria. Existe uma crescente aceitação e entusiasmo pela ideia de que nenhum método é absoluto; um futuro em que os crimes de extração ilegal de madeira possam ser rotineiramente processados com evidências científicas robustas só pode ser realizado por meio de uma abordagem sinérgica para os desafios de identificação que enfrentamos atualmente (DORMONTT et al. 2015).

2.3.1 Identificação pela Anatomia da madeira

Nos últimos 100 anos, o que hoje chamamos de método tradicional de identificação de madeira baseado na caracterização anatômica seguiu descrições padronizadas e bem definidas para distinguir e identificar com sucesso a variedade e famílias, gêneros e espécies de angiospermas e gimnospermas (SILVA et al. 2022).

A anatomia da madeira constitui-se de um método eficaz para a triagem e diagnóstico na linha de frente, embora sejam necessárias ferramentas e materiais de referência confiáveis para verificar com precisão as espécies de madeiras comercializadas (BRANDES et al., 2022).

Este processo pode ser realizado a partir de duas abordagens visuais, a macroscópica e a microscópica. A análise microscópica é uma prática laboratorial demorada, restrita a pessoas especializadas em anatomia da madeira, que exige longo tempo de treinamento, acesso a equipamentos específicos e coleções de referência. Esta abordagem está na vanguarda da ciência, tem sua importância e é um método poderoso para identificar madeiras (HOADLEY, 1990; WHEELER; BASS, 1998). Contudo, não é a única ferramenta que pode desempenhar um papel no combate à exploração madeireira ilegal. Com a adoção de várias leis, tratados e acordos internacionais anti-corte ilegal de árvores, o interesse global na identificação de madeiras em campo aumentou, especialmente no nível macroscópico (RUFFINATTO; CRIVELLARO; WIEDENHOEFT, 2015).

O Brasil possui a sua própria norma para triagem de madeiras seguindo as diretrizes do IBAMA (CORADIN; MUÑIZ, 1992). As características anatômicas podem ser influenciadas por fatores genéticos e ambientais, a combinação desses caracteres e suas particularidades são usados para diferenciar espécies. As características anatômicas são descritas de acordo com as normas da IAWA, onde a identificação é confirmada por meio de comparação com material de referência (DORMONTT et al., 2015).

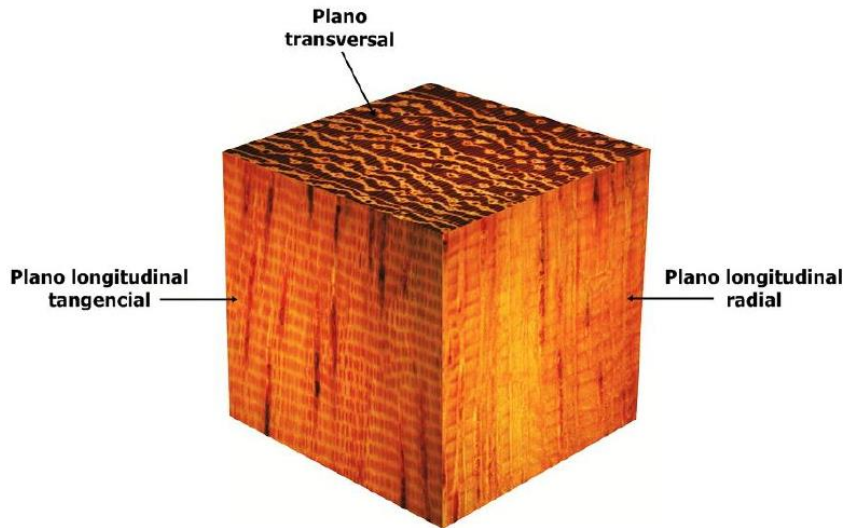
Os principais erros cometidos na identificação acontecem devido às semelhanças encontradas entre famílias, espécies e dentro de indivíduos de uma mesma espécie, além dos inúmeros nomes populares e comerciais que dificultam a fiscalização pelos órgãos responsáveis (HERMANSON; WIEDENHOEFT, 2011).

Embora seja possível usar a anatomia da madeira em qualquer etapa da cadeia de suprimentos, a maioria das inspeções governamentais, se realizadas, são feitas no ponto de exportação do país de origem e/ou no ponto de importação para o país receptor. Às vezes, inspeções ou investigações são conduzidas pela fábrica ou pelo varejista, especialmente quando um produto difere do esperado (WIEDENHOEFT et al. 2019).

Na prática, o identificador responsável ou fiscal primeiramente analisa as características organolépticas ou sensoriais, tais como, odor, gosto, coloração, dentre outras. Essa avaliação auxilia a discriminar certos táxons com características marcantes, posteriormente, o perito faz a caracterização macroscópica onde observa uma série de atributos e padrões na anatomia da madeira examinada.

Segundo Ruffinatto e Crivellaro (2019), antes de se examinar uma amostra de madeira, deve-se orientar a amostra de forma que os planos originais sejam revelados e respeitados. Existem 3 planos anatômicos de referência: transversal, longitudinal radial e longitudinal tangencial (Figura 1):

Figura 1 – Planos anatômicos de corte de *Martiodendron elatum* (Ducke) Gleason (Fabaceae).



Fonte: Duarte et al. (2021)

Os formatos e desenhos únicos desse material auxiliam na identificação de certos táxons, tribos e/ou famílias, sendo a observação dessas peculiaridades em campo o ponto crítico para o sucesso da obtenção da identidade da madeira (DUARTE, 2018).

Inúmeros desafios e oportunidades podem ser encaradas nessa metodologia, a identificação através da anatomia é uma tarefa exigente que requer especialistas bem treinados. Além disso, existem poucos profissionais habilitados para realizar esse procedimento e por se tratar de uma avaliação repetitiva, a inspeção visual pode resultar em erros humanos (HWANG; SUGIYAMA, 2021).

Impulsionados pela necessidade de ferramentas para combater a extração ilegal de madeira, pesquisadores vêm desenvolvendo mecanismos e tecnologias para atingir níveis de precisão de identificação capazes de atender às exigências da legislação (DORMONTT et al., 2015; RUFFINATTO; CRIVELLARO; WIEDENHOEFT, 2015).

2.3.2 Avanço tecnológico nas ferramentas na identificação aplicáveis em campo

Os esforços para combater os crimes ambientais e apoiar a sustentabilidade das cadeias de valor são dificultados pelo gargalo crítico acerca de recursos acessíveis e tecnologias escaláveis para inspeção da madeira e de seus produtos no campo. Esta cadeia de suprimentos inclui toras, madeiras, madeira tratada, folheados, produtos acabados, produtos de madeira

triturada, celulose e produtos derivados de celulose, lenha e carvão vegetal, entre outros (RAVINDRAN et al. 2020). A exploração madeireira ilegal é responsável por 15–30% da cadeia global de fornecimento de madeira (NELLEMANN, 2012).

Vários métodos científicos foram desenvolvidos de forma independente com o potencial para fornecer as informações de identificação necessárias, mas pouca atenção tem sido dada a como essas ferramentas podem ser aplicadas sinergicamente para apoiar o comércio legal de madeira (DORMONTT et al., 2015). A maioria dos métodos que decifram a variação molecular da madeira são limitados a ambientes laboratoriais e sem perspectiva futura para implementação em campo, por exemplo, DNA *Barcoding*, DNA *fingerprint*, espectroscopia de massa, espectroscopia de DART-ToF (*Direct Analysis in Real Time-Time of Flight mass spectrometry*). Dentre os mecanismos de análise molecular, a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) demonstrou potencial para identificação em tempo real na linha de frente (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015), contudo, existem certas limitações na disponibilização e quantidade de modelos desenvolvidos, além do alto custo do equipamento para avaliação em campo (aproximadamente USD 10.000,00) (WIEDENHOEFT, 2020).

Devido a agilidade e o potencial de escala, os métodos de classificação utilizando visão computacional (VC) representam uma opção economicamente acessível aplicada para atender à demanda e demonstraram excelentes resultados e potencial para identificação de madeiras (SILVA et al., 2022). Os sistemas de identificação de madeira inteligentes são necessários para agilizar a implementação adequada dos regulamentos relativos à madeira, verificando se a espécie comercializada corresponde ao nome da espécie no documento de acompanhamento (DE BLAERE et al, 2023).

Esta tecnologia pode fornecer informações que ainda não foram reveladas pelos métodos estabelecidos de anatomia da madeira. A primeira e mais importante tarefa para progredir no processo de identificação de madeira é construir *Bigdatas* digitais onde as informações sobre madeira possam ser acessadas a qualquer hora, em qualquer lugar e por qualquer pessoa, e preencher a lacuna atual entre a divulgação e a ciência da madeira. Esta tecnologia poderia ser uma solução para as exigências no local, permitindo a identificação da madeira por trabalhadores que não têm formação em identificação tradicional (HWANG; SUGIYAMA, 2021).

Nas últimas décadas vários estudos foram desenvolvidos com objetivo de automação da classificação de espécies madeireiras (DE GEUS et al. 2021). Dentre as abordagens de identificação, a macroscópica é a priorizada pela agilidade e por similar condições reais da linha

de frente. Khalid, Yusof e Khairuddin (2011) elaboraram um sistema que classifica madeiras baseado em algoritmos e técnicas de processamento de imagens, a base de dados contém 52 madeiras e a sua metodologia alcançou 96,92% de acurácia. Paula Filho et al. (2014) reportaram em experimentos um sistema de identificação utilizando SVM e RNA como classificadores e a base de dados com imagens macroscópicas de madeiras da flora brasileira. Os autores alcançaram precisão de 97,77% na classificação das espécies. O estudo de Souza et al (2020) introduziu uma nova base de dados macroscópicas com 46 espécies, sendo 15% espécies inclusas na lista oficial de espécies ameaçadas do Brasil. A metodologia computacional avaliou diferentes classificadores de SVM, RNA e *Random Forest* (RF), e alcançou 98% de *F1 score*. Os autores destacam que mesmo em grupos de espécies geralmente confundidos pelos especialistas em anatomia da madeira, a metodologia computacional foi capaz de discriminá-los perfeitamente.

Na abordagem em *Deep Learning*, Hafemann, Oliveira e Cavalin (2014) investigaram o uso de CNN para classificar dois bancos de imagens com espécies madeireiras do Brasil disponíveis e atingiram 95,77% de acurácia no dataset macroscópico. Ravindram et al. (2018) propuseram uma arquitetura de CNN para classificar 10 espécies tropicais entre 6 gêneros. Eles avaliaram esse modelo com *transfer learning* para nível de espécie e gênero, reportaram acurácia de 87,4 para 97,5 com melhor performance para a classificação em gênero. Enquanto de Geus et al. (2021) realizaram experimentos de classificação por imagens macroscópicas em 11 madeiras de origem amazônica utilizando algoritmos baseados em CNN e alcançaram 98,13% de eficácia na identificação.

Grande parte da literatura publicada envolvendo tecnologia para identificação de madeiras foram desenvolvidas em ambiente laboratorial e/ou empregando equipamentos e ferramentas não adequados para uso em campo, apesar disso, sistemas de visão artificial podem ser projetados para aplicação em campo, utilizando smartphones para aquisição de imagens, mantendo precisão competitiva com outros métodos propostos na literatura (ANDRADE; BASSO; LATORRACA, 2020).

Uma das limitações do passado para automatização da identificação na linha de frente eram os equipamentos para aquisição de imagens. Com a evolução industrial e o desenvolvimento tecnológico esse obstáculo está sendo superado. Entre os modelos disponíveis no mercado, Wiedenhoeft (2020) disponibilizou o acesso do XyloPhone, uma espécie de lupa feita em impressão 3D que pode ser acoplada em um celular com acesso a imagens de alta qualidade. Tang et al. (2018) também desenvolveram uma lupa iluminada com led para apoiar

anatomistas e fiscais que pode ser usado com Smartphone para aquisição de imagens. Outra iniciativa louvável partiu de Andrade, Basso e Latorraca (2020) que idealizaram um protótipo para aquisição de imagens utilizando lupas, lâmpadas e caixa de MDF. O sistema de identificação foi baseado em RNA e SVM, testaram um protótipo simulando condições reais de campo e alcançaram precisão de até 97,7%.

Há vários anos que existem apelos à integração e aplicação de métodos e tecnologias para combater a exploração madeireira ilegal (DORMONTT et al. 2015; LOWE et al. 2016), mas um dos fatores que limita a capacidade de combinar adequadamente tecnologias ou selecionar quais abordagens mais adequadas para qualquer aplicação específica é a falta geral de interoperabilidade dos conjuntos de dados. Com táxons de referência díspares testados em diferentes tecnologias, não é possível uma comparação direta e objetiva dos pontos fortes relativos das diferentes abordagens (RAVINDRAN; WIEDENHOEFT, 2020).

Ravindran e Wiedenhoeft (2020) fizeram um estudo comparativo do desempenho de um modelo de visão computacional e a espectroscopia de massa para classificação de 10 espécies da família Meliaceae. Os autores encontraram previsão de precisão no modelo XyloTron iguais ou superiores às do método de espectrometria de massa.

Apesar do seu potencial prático, a implantação de tecnologias inovadoras para identificação de madeiras, em particular, é atualmente limitada. O uso mais amplo e um mercado maior para serviços de identificação de madeira enfrentam uma série de obstáculos, de um lado carece de competência tecnológica, acessibilidade e prestação de serviços, por outro, o usuário do serviço precisa ser conscientizado, ter interesse e recursos financeiros para acessar a tecnologia. Consequentemente, a promessa não se concretizou e ainda não se transformou numa procura generalizada do mercado (VAN BRUSSELEN; CRAMM; TEGEGNE, 2023).

Para piorar a situação, o mercado de madeiras brasileiro não adere as boas práticas de sustentabilidade, haja vista, que diversas fraudes no comércio acontecem com frequência (NASCIMENTO et al., 2017; BRANCALION et al., 2018; DUARTE et al., 2020; DUARTE et al., 2021). Uma das prioridades para regulamentação do mercado é a padronização da nomenclatura comercial e a definição da base científica para realização da verificação em campo (RUFFINATTO; CRIVELLARO; WIEDENHOEFT, 2015).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com os trabalhos apresentados, verificou-se que existe enorme potencial de desenvolvimento de modelos de inteligência artificial para identificação de madeiras. Os modelos baseados em aprendizagem de máquinas, RNA, *Deep Learning* são os mais utilizados para classificação de imagens, devido a adaptabilidade e acurácia na identificação.

Na maior parte das pesquisas a prioridade foi avaliar quais modelos tinha melhor acurácia na classificação, embora isso seja relevante, os pesquisadores não se preocuparam em criar algo útil para fazer a roda do mercado girar. Devido a isso, a proposta deste estudo é criar um sistema independente baseado em inteligência artificial para identificação de madeiras e propor um mecanismo aplicável para o mercado consumidor que beneficie todos os elos envolvidos na exploração legal de madeiras.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, B. G.; BASSO, V. M.; LATORRACA, J. V. F. Machine vision for field-level wood identification. **IAWA Journal**, 41(4): 681-698, 2020.

<https://doi.org/10.1163/22941932-bja10001>

BRANCALION, P. H. S et al. Fake legal logging in the Brazilian Amazon. **Science advances**, v. 4, n. 8, p. eaat1192, 2018.

BRANDES, A.; NOVELLO, B.; LEMOS, D.; NASCIMENTO, L.B.; ALBUQUERQUE, R.; TAMAIO, N.; BARROS, C. Wood anatomy of endangered Brazilian tree species. **IAWA Journal**, 41(4): 510-576, 2022. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10037>

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 maio 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 28 maio 2012. Seção 1.

BUONGIORNO, J.; JOHNSTON, C.; ZHU, S. An assessment of gains and losses from international trade in the forest sector. **Forest Policy and Economics**, v. 80, p. 209-217, 2017.

CARVALHO, W. D. et al. Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. **Perspectives in Ecology and Conservation** 17(3):122-130, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.06.002>

CORADIN, V. T. R.; MUNIZ, G. I. B. **Normas de procedimentos em estudos de anatomia de madeira: Angiospermae e Gymnospermae**. Brasília: IBAMA, DIRPED, LPF, 1992. 19 p. (Série Técnica, 15).

DE BLAERE, R.; LIEVENS, K.; VAN HASSEL, D. et al. SmartWoodID—an image collection of large end-grain surfaces to support wood identification systems. **Database**, v. 2023: article ID baad034, 2023. <https://doi.org/10.1093/database/baad034>

DE GEUS, A. R. et al. Amazon wood species classification: a comparison between deep learning and pre-designed features. **Wood Science and Technology**, v. 55, p. 857-872, 2021.

DORMONTT, E. E; BONER, M; BRAUN, B.; BREULMANN, G.; DEGEN, B.; ESPINOZA, E.; GARDNER, S.; GUILLERY, P.; HERMANSON, J. C.; KOCH, G.; LEE, S. L.; KANASHIRO, M.; RIMBAWANTO, A.; THOMAZ, D.; WIEDENHOEFT, A. C.; YIN, Y.; ZAHNEN, J.; LOWE, A. Forensic timber identification: it's time to integrate disciplines to combat illegal logging. **Biological Conservation**.191:790–798. 2015.

DUARTE, P. J. et al. Macroscopic identification of tropical woods traded by Guajará in Lavras, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 60830-60838, 2020.

DUARTE, P. J.; BORGES, C.C.; FERREIRA, C.A.; CRUZ, T.M; SOUSA, W.R.Q.; MORI, F.A. Anatomical identification of tropical woods traded in Lavras, Brazil. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 33, n. 1, p. 95-104, 2021.

DUARTE, P. J. **Caracterização anatômica das principais madeiras comercializadas na região de Lavras/MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – UFLA, Lavras. 2018. 80p.

FERREIRA, C., INGA, J., VIDAL, O., GOYTENDIA, W., MOYA, S., CENTENO, T., VÉLEZ, A., GAMARRA, D., TOMAZELLO-FILHO, M.: Identification of tree species from the peruvian tropical amazon “selva central” forests according to wood anatomy. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 7161–7179, 2021.

HAFEMANN, L. G.; OLIVEIRA, L. S.; CAVALIN, P. Forest species recognition using deep convolutional neural networks. In: **2014 22nd international conference on pattern recognition**, pp 1103–1107, 2014.

HERMANSON, J. C; WIEDENHOEFT, A. C. A brief review of machine vision in the context of automated wood identification systems. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 233-250. 2011.

HOADLEY, R. B. **Identifying wood**: accurate results with simple tools. Newtown, Connecticut: Taunton Press, 1990. 225 p.

HWANG, S. W; SUGIYAMA, J. Computer vision-based wood identification and its expansion and contribution potentials in wood science: A review. *Plant Methods* 17(1): 1-21, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00746-1>

JOHNSON, A.; LAESTADIUS, L. New laws, new needs: The role of wood science in global policy efforts to reduce illegal logging and associated trade. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 125-136, 2011.

KHALID, M.; YUSOF, R.; KHAIRUDDIN, A. S. M. Tropical wood species recognition system based on multi-feature extractors and classifiers. In: **2011 2nd international conference on instrumentation control and automation**, pp 6–11, 2011.

KIM, Y. S.; FUNADA, R.; SING, A. P. **Secondary Xylem Biology** - Origins, Functions, and Applications. Academic Press, 2016.

LENTINI, M.W.; BEZERRA, M.H.M.; DIAS, A.S.; BERNARDES, A.T.; ERDMANN, A.A. **Acertando o Alvo 4: Panorama Atual e Tendências para Mercados Sustentáveis de Madeira da Amazônia**. Piracicaba, São Paulo: Imaflora. 2022. 96pp

LOWE, A. J.; DORMONTT, E. E; BOWIE, M. J.; DEGEN, B; GARDNER, S.; THOMAZ, D.; CLARKE, C.; RIMBAWANTO, A.; WIEDENHOEFT, A. C.; YIN, Y.; SASAKI, N. Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. **BioScience**, v. 66, n. 11, p. 990-998, 2016.

MARTINELLI, G.; MORAES, A. M. **Livro vermelho da flora do Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013. 1100 p.

MARTINS, M. M. V.; NONNENBERG, M. J. B. O comércio de madeiras e as restrições impostas pelos mercados Europeus e Norte Americanos: Qual a sua efetividade?, Texto para Discussão, No. 2741, **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, Brasília, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.38116/td2741>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção. Portaria n_ 443 de 17 de dezembro de 2014-Anexo I. **Diário Oficial da União**-Seção 1, 18/12/2014. 2014.

NASCIMENTO, L. B.; BRANDES, A. F. N.; VALENTE, F. D. W.; TAMAIO, N. Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, n. 1, p. 291-329, 2017.

NELLEMAN, C., INTERPOL Environmental Crime Programme (eds). **Green Carbon, Black Trade: Illegal Logging, Tax Fraud and Laundering in the Worlds Tropical Forests. A Rapid Response Assessment**. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. 2012. www.grida.no ISBN: 978-82-7701-102-8

PANSHIN, A. J; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980.

PAULA FILHO, P. L.; OLIVEIRA, L. S; NISGOSKI, S.; BRITTO JR, A. S. Forest species recognition using macroscopic images. **Machine Vision and Applications**, 25: 1019–1031, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00138-014-0592-7>

RAMAGE, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

RAVINDRAN, P.; WIEDENHOEFT, A. C. Comparison of two forensic wood identification technologies for ten Meliaceae woods: computer vision versus mass spectrometry. **Wood**

Science and Technology, 54(5): 1139-1150, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01178-1>

RAVINDRAN P, THOMPSON BJ, SOARES RK AND WIEDENHOEFT AC (2020) The XyloTron: Flexible, OpenSource, Image-Based Macroscopic Field Identification of Wood Products. *Front. Plant Sci.* 11:1015. doi: 10.3389/fpls.2020.01015

RAVINDRAN P, COSTA A, SOARES R, WIEDENHOEFT A (2018) Classification of cites-listed and other neotropical meliaceae wood images using convolutional neural networks. *Plant Methods* 14:25

RUFFINATTO, F.; CRIVELLARO, A. **Atlas of macroscopic wood identification:** with a special focus on timbers used in Europe and CITES-listed species. Springer Nature, 2019.

RUFFINATTO, F.; CRIVELLARO, A.; WIEDENHOEFT, A. C. Review of macroscopic features for hardwood and softwood identification and a proposal for a new character list. **IAWA Journal**, v. 36, n. 2, p. 208-241, 2015.

SCARANO, F.R; SILVA, J.M.C. Production and international trade: challenges for achieving targets 6 and 11 of the Global Strategy for Plant Conservation in Brazil. **Rodriguésia** 69 (4): 1577-1585. 2018.

SCHMITZ, N. **Scientific methods for taxonomic and origin identification of timber.** Global Timber Tracking Network, GTTN Secretariat, European Forest Institute and Thünen Institute, 2020.

SILVA, J. L.; BORDALO, R.; PISSARRA, J.; DE PALACIOS, P. Computer Vision-Based Wood Identification: A Review. **Forests** 13 (12): 2041, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13122041>

SOUZA, D. V.; SANTOS, J. X.; VIEIRA, H. C.; NAIDE, T. L.; NISGOSKI, S.; OLIVEIRA, L. E. S. An automatic recognition system of brazilian fora species based on textural features of macroscopic images of wood. **Wood Sci Technol** 54(4):1065–1090, 2020.

TANG, X. J.; TAY, Y. H.; SIAM, N. A.; LIM, S. C. MyWood-ID. Automated macroscopic wood identification system using smartphone and macro-lens. **In Proceedings of the 2018 International Conference on Computational Intelligence and Intelligent System**, Phuket, Thailand, 17-18 November 2018; pp. 37–43. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.08154>

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, v. 61, n. 3, p. 213-220, 2015.

VAN BRUSSELEN, J.; CRAMM, M.; TEGEGNE, Y. T. Wood identification services in support of legal supply chains: A market study. **Sustainable Futures**, v. 6, p. 100128, 2023.

VIDAL, E.; WEST, T. A. P.; LENTINI, M.; SOUZA, S. E. X. F.; KLAUBERG, C.; WALDHOFF, P. Sustainable Forest management (SFM) of tropical moist forests: the case of the Brazilian Amazon. **Achieving Sustain Manage Tropical Forests** 1:1–31, 2020. <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0074.42>

WORLD WIDE FUND FOR NATURE – WWF. **Seja Legal**: boas práticas para manter a madeira ilegal fora de seus negócios. Brasília, 2006. 80p.

WIEDENHOEFT, A. C. The XyloPhone: toward democratizing access to high-quality macroscopic imaging for wood and other substrates. **Iawa Journal**, v. 41, n. 4, p. 699-719, 2020.

WIEDENHOEFT, A.C.; SIMEONE, J.; SMITH, A.; PARKER-FORNEY, M.; SOARES R.; FISHMAN, A. Fraud and misrepresentation in retail forest products exceeds U.S. forensic wood science capacity. **PLoS ONE**, 14(7): e0219917.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219917>

YIN, Y.; WIEDENHOEFT, A. C.; DONALDSON, L. Advancing Wood Identification—Anatomical and Molecular Techniques. **IAWA Journal**, v. 41, n. 4, p. 391-392, 2020.

ZENID, G. J. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (Publicação IPT ; 3010) SVMA, 2009. 103 p.

ZENID, G. J. **Identificação e grupamento das madeiras serradas empregadas na construção civil habitacional na cidade de São Paulo** [dissertação]. Piracicaba: Universidade de São Paulo; 1997. 188 p.

ZHANG, Q. et al. Global timber harvest footprints of nations and virtual timber trade flows. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119503, 2020.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 - MACHINE LEARNING APPROACH CONTRIBUTE TO REDUCING ENVIRONMENTAL CRIMES IN THE TROPICAL TIMBER MARKET

ABORDAGEM DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINAS CONTRIBUI PARA REDUÇÃO DE CRIMES AMBIENTAIS NO MERCADO DE MADEIRA TROPICAL

Artigo submetido ao periódico Environmental Police and Pollution Research

Machine learning approach contribute to reducing environmental crimes in the tropical timber market

Paulo Junio Duarte¹, Rafael Ávila dos Santos², Adriano Reis Prazeres Mascarenhas³, Edgard Geraldo Bertoli Trindade¹, Nagla Maria Sampaio de Matos⁴, Cilene Cristina Borges⁵, Natalino Calegario¹

P.J. Duarte*

ORCID: 0000-0002-7319-3101

E-mail: contactsmart.timber@gmail.com

R.A. dos Santos

ORCID:0009-0005-0823-8659

E-mail: rafael.santos0t5@gmail.com

A.R.P. Mascarenhas

ORCID: 0000-0002-7554-3590

E-mail: adriano.mascarenhas@unir.br

E.G.B. Trindade

ORCID: 0000-0002-6015-3469

E-mail: edgardgbtrindade@gmail.com

N.M.S. de Matos

ORCID: 0000-0003-0935-1934

E-mail: naglaengeagro@hotmail.com

C.C. Borges

ORCID:0000-0002-5748-2173

E-mail: cilenecristina@gmail.com

N. Calegario

ORCID: 0000-0001-8323-1223

E-mail: calegari@ufla.br

AFFILIATIONS

¹Department of Forest Science, Federal University of Lavras,37200-000, Lavras, MG, Brazil.

²Department of Automatic, Federal University of Lavras,37200-000, Lavras, MG, Brazil.

³Department of Forest Engineering, Federal University of Rondônia,76940-000, Rolim de Moura, RO, Brazil.

⁴Department of Agronomy, Federal University of Lavras, 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

⁵Department of Forest Engineering, Technological Federal University of Paraná, 85660-000, Dois Vizinhos, PR, Brazil.

*Corresponding author

Resumo

O mercado de madeira tropical no Brasil é alvo de fraudes no varejo e isso representa séria ameaça à biodiversidade. Para controlar esses crimes, é essencial integrar métodos de identificação e tecnologias que permitam certificar a rastreabilidade dos produtos de origem florestal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia do modelo obtido por aprendizagem de máquinas na classificação de dez madeiras tropicais brasileiras. Amostras de madeira obtidas em estabelecimentos comerciais tiveram a seção transversal polida para melhorar a visualização dos elementos anatômicos. Com uma lupa de 24x de aumento com led acoplado ao smartphone, foram obtidas imagens macroscópicas do lenho com resolução de 2100 x 2100 pixels. Realizou-se o pré-processamento aplicando a data augmentation para aumentar e variar o banco de dados. Assim as imagens foram fragmentadas em 300 x 300 pixels, totalizando em 31.360 imagens para classificação. A análise experimental foi feita em linguagem de programação Python, utilizando a arquitetura *Inception V3* disponíveis na biblioteca TensorFlow, tendo o desempenho do modelo sido definido baseado na acurácia e nos erros de classificação. A partir dos resultados foi gerada uma matriz de confusão. O algoritmo *Inception V3* apresentou alta precisão na classificação de dez madeiras tropicais alcançando 95% e 96% de acurácia global em 2 e 3 ciclos de processamento, respectivamente. Este modelo permitiu classificar com eficácia espécies tradicionais do mercado como *Aspidosperma* sp. (100%), *Diploptropis* sp. (98%), *Dypterix odorata* (99%) e *Hymenolobium petraeum* (100%), vale destacar que este algoritmo também obteve ótima acurácia na identificação de espécies tropicais ameaçadas *Amburana cearensis* (100%), *Bertholletia excelsa* (99%) e *Cedrela odorata* (96%). Apesar disso, o modelo apresentou menor eficiência na classificação de três madeiras similares: *Erisma uncinatum* (95%), *Guarea* sp. (94%) e *Vochysia* sp. (82%), táxons usualmente comercializados pelo nome “cedrinho”. Ao analisar as estruturas anatômicas destas madeiras em comparação com a espécie ameaçada *Cedrela odorata* foi possível observar padrões de parênquima axial distintos capazes de validar a identificação correta do material. Com base nos resultados é possível afirmar que a abordagem de aprendizagem de máquinas na identificação de madeiras pode contribuir para o controle de espécies comercializadas, incluindo táxons ameaçados de extinção e na detecção de fraudes no processo comercial de madeiras tropicais no Brasil.

Palavras-chave: Extração ilegal; Inteligência artificial; Madeira tropical; Identificação de madeiras; Anatomia da madeira; Rastreabilidade da madeira.

Abstract

The tropical timber market in Brazil is a target for retail fraud, posing a serious threat to biodiversity. To combat these crimes, it is essential to integrate identification methods and technologies that enable the certification of the traceability of forest-based products. This study aimed to evaluate the effectiveness of a machine learning model in classifying ten Brazilian tropical woods. Wood samples obtained from commercial establishments had their cross-sections polished to improve the visualization of anatomical elements. Using a 24x magnifying glass with an LED coupled to a smartphone, macroscopic wood images were captured at a resolution of 2100 x 2100 pixels. Preprocessing was performed by applying data augmentation to enhance and diversify the database. The images were then fragmented into 300 x 300 pixels, totaling 31,360 images for classification. Experimental analysis was conducted in Python programming language, employing the *Inception V3* architecture available in the TensorFlow library. Model performance was evaluated based on accuracy and classification errors, and a confusion matrix was generated from the results. The *Inception V3* algorithm demonstrated high precision in classifying ten tropical woods, achieving 95% and 96% overall accuracy in 2 and 3 processing cycles, respectively. The model effectively classified traditional market species such as *Aspidosperma* sp. (100%), *Diploptropis* sp. (98%), *Dipteryx odorata* (99%), and *Hymenolobium petraeum* (100%). Notably, the algorithm also achieved excellent accuracy in identifying threatened tropical species, including *Amburana cearensis* (100%), *Bertholletia excelsa* (99%), and *Cedrela odorata* (96%). However, the model showed lower efficiency in classifying three similar woods: *Erisma uncinatum* (95%), *Guarea* sp. (94%), and *Vochysia* sp. (82%), taxa commonly marketed under the name “cedrinho.” Analyzing the anatomical structures of these woods in comparison to the threatened species *Cedrela odorata* revealed distinct axial parenchyma patterns, validating the correct identification of the material. Based on these results, it can be concluded that the machine learning approach for wood identification can contribute to controlling traded species, including threatened taxa, and detecting fraud in the commercial process of tropical woods in Brazil.

Keywords: Illegal logging; Artificial intelligence; Tropical hardwood; Wood identification; Wood anatomy; Timber traceability.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade do planeta é pauta central das discussões governamentais, cada vez mais preocupadas com os impactos do desmatamento associadas ao comércio ilegal de madeiras. Estes crimes ambientais acontecem recorrentemente no Brasil ameaçam a biodiversidade e os ecossistemas florestais, além de contribuírem significativamente para as mudanças climáticas do planeta. A falha em garantir a extensão de padrões *Environment, Social and Governance* (ESG) à cadeia de suprimentos florestal expõe as empresas a uma série de consequências sociais, financeiras e legais.

Os esforços internacionais para combater estes crimes ambientais consistem na promulgação de leis destinadas a coibir o comércio de madeira de origem ilegal e proibir ou limitar o comércio de espécies ameaçadas ou de áreas específicas. Essas restrições comerciais foram impostas por meio da Convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies Ameaçadas de Flora e Fauna Selvagens (CITES), a qual lista as espécies em três apêndices, de acordo com o grau de proteção exigido (Dormontt et al. 2015).

A implantação bem-sucedida de leis desenvolvidas para combater a exploração e o comércio ilegal de madeiras, além de verificar a legalidade das cadeias de suprimento de madeira em todo o mundo, depende da identificação precisa das espécies e da origem da madeira (Low et al. 2023). Além dos problemas relacionados a rastreabilidade da madeira, existem preocupações sobre as declarações falsas de identidade ou fraudes na forma como os produtos são descritos e vendidos (Wiedenhoeft et al. 2019).

Identificar uma amostra de madeira em nível de gênero ou espécie é difícil, tem um custo alto e demanda tempo para capacitar o profissional na linha de frente. Além disso, por se tratar de uma tarefa visual e repetitiva, o processo de identificação de madeira pode resultar em identificação incorreta, devido ao julgamento errado do trabalhador humano (Hwang and Sugiyama, 2021).

A anatomia da madeira é o método de identificação mais difundido no mundo, havendo duas abordagens distintas a serem utilizadas: a análise macroscópica e a microscópica. A identificação macroscópica é a técnica mais utilizada para triagem de madeiras, a observação dessas características deve anteceder a análise microscópica, sendo por vezes suficiente para se determinar o gênero e mais raramente a espécie (Ruffinato and Crivelaro, 2019).

Nos últimos 100 anos a análise da anatomia do lenho tem sido o método tradicional de identificação de madeiras, entretanto, apesar dos aspectos positivos desta técnica, é evidente que agora ele está a atingir o seu limite de capacidade operacional. Como uma resposta relevante a esta necessidade, os resultados obtidos até agora pela identificação de madeira baseada em Inteligência Artificial (IA) demonstram que esta técnica tem fornecido resultados rápidos e confiáveis (Silva et al. 2022).

Grande parte dos trabalhos publicados envolvendo IA na identificação de madeiras foram realizados em laboratórios (Yusof et al. 2013; Paula Filho et al, 2014; Barmpoutis et al. 2018; Arévalo et al. 2021). Destaque para a precisão de 98,7% alcançada por Yusof et al. (2013) e 97,8% alcançados por Paula Filho et al. (2014). De todas as possibilidades avaliadas, a *Deep Learning* parece ser a solução mais significativa e promissora no desenvolvimento de IA, e as Redes Neurais Convolucionais (CNN) aplicados às ciências da madeira são um dos sistemas líderes e de evolução mais rápida (Silva et al. 2022).

Tecnologias baseadas em IA podem ser projetadas para aplicação da linha de frente, com uso de smartphones para aquisição de imagens (Andrade et al. 2020) e aplicativos para identificação de diferentes espécies madeireiras. Entre os programas disponíveis atualmente, o XyloTron obteve desempenho acima de 95% na diferenciação de 10 gêneros da família Meliaceae (Ravindran and Wiedenhoef, 2020). Ravindran et al. (2021) demonstraram o potencial desta ferramenta na linha de frente ao identificar centenas de madeiras peruanas com acurácia de até 97%. Outra abordagem recente para rápida identificação em campo é o Xylorix (Tang and Tay, 2019), uma plataforma de IA que combina aplicativos, ferramentas e serviços para apoiar anatomistas, sendo necessário acoplar uma lupa iluminada no smartphone para ter um desempenho adequado. Para identificação de madeiras tropicais, um grupo de pesquisadores latinos estão desenvolvendo o aplicativo móvel “Mader app”, esse projeto de identificação de madeiras baseado em IA contém uma base de imagens com 26 espécies comercializadas no Peru. As imagens podem ser obtidas por microscópio portátil e o reconhecimento da amostra no aplicativo é realizado em tempo real, resultados preliminares indicaram acurácia de 95% (Ferreira et al. 2021).

Nesse contexto, este trabalho busca desenvolver e avaliar um modelo de Inteligência Artificial para identificação de madeiras tropicais nativas do Brasil e fornecer informações pertinentes sobre a rastreabilidade da madeira para a operação de linha de frente. Com base na nossa revisão de literatura, esperamos que o sistema de identificação baseado em imagens macroscópicas possa alcançar uma acurácia superior a 90%.

MATERIAL E MÉTODOS

Seleção de espécies e preparação das amostras

Para a realização deste estudo foram obtidas amostras de dez espécies tropicais do Brasil (Tabela 1) obtidas após inspeções ambientais em estabelecimentos comerciais da região de Lavras, Minas Gerais e Parauapebas, estado de Pará.

Tabela 1 Lista de espécies selecionadas para este estudo.

	Espécie	Família	Nome comum	Bioma	Status*
I	<i>Amburana acreana</i> (Ducke) A.C.Sm.	Fabaceae	cerejeira	A	EN
II	<i>Aspidosperma</i> sp. Mart. & Zucc.	Apocynaceae	peroba	A, Ca, C, MA, P, Pa	
III	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Lecythidaceae	castanheira	A	VU
IV	<i>Diploptropis</i> sp. Benth.	Fabaceae	sucupira	A	
V	<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae	cedro	A, Ca, C, MA	VU
VI	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Forsyth f.	Fabaceae	cumarú	A	VU
VII	<i>Erismia uncinatum</i> Warm.	Vochysiaceae	cedrinho	A	
VIII	<i>Guarea</i> sp. F.Allam. ex L.	Meliaceae	cedro-baia	A, Ca, C, MA, P	
IX	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	Fabaceae	Angelim	AM	
X	<i>Vochysia</i> sp. Aubl.	Vochysiaceae	Quaruba	A, Ca, C, MA, Pa	

Bioma: A – Amazônia, Ca – Caatinga, C – Cerrado, MA – Mata Atlântica, P – Pampa, Pa – Pantanal, adaptado da Flora e Funga do Brasil (2024). *Status de conservação das espécies ameaçadas conforme a Lista de verificação da CITES (PNUMA, 2024). *EN* em perigo, *VU* vulnerável.

Os critérios de escolha das 10 madeiras incluíram: (i) espécies amplamente usadas na cadeia florestal de valor brasileira, (ii) espécies ameaçadas e/ou protegidas por lei que podem ter aparência semelhante de espécies nativas do Brasil e que são comercializadas por nomes similares. Podem ser citadas o gênero *Cedrela* que possui restrições comerciais no mundo todo e está listada no apêndice II da CITES, a espécie *Bertholletia excelsa* protegida por força de lei nacional (MMA, 2014), *Amburana cearensis* madeira muito apreciada na fabricação de tonéis de cachaça no Brasil e em perigo de extinção pela Lista vermelha da International Union for Conservation of Nature (IUCN, 1998) e finalmente *Dypterix odorata* (Fabaceae), espécie amazônica inserida nos anexos da CITES (2024), que se destaca pelo seu potencial madeireiro, comercialização de sementes e uso fitoterápico (SOUSA et al. 2022).

Para cada espécie foram produzidos oito corpos de prova livres de quaisquer defeitos, totalizando 80 amostras com dimensões nominais de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm (largura, espessura e comprimento, respectivamente). Para melhor visualização da seção transversal, cada amostra foi polida usando lixas a base d'água, em sequência de 80, 120, 220, 320 e 400 grão, conforme metodologia proposta por Barbosa et al. (2021).

Aquisição das imagens

Para o treinamento do modelo de classificação baseado em IA foi consolidado um banco de dados, o qual o intuito é sua utilização para treinamento do modelo de classificação, que por sua vez, acontecerá pelo reconhecimento de padrões que o modelo estabelecerá dentre as espécies a serem classificadas. Para obter as imagens utilizamos uma lente macro de 24 vezes iluminada modelo WIDK-24X01 (Tang and Tay, 2019), acessório este que foi acoplado a um Smartphone modelo Xiaomi Redmi Note 10s. As configurações na câmera foram mantidas no automático, as imagens macroscópicas foram produzidas com resolução de 2100 × 2100 pixels e 8 bits (256 níveis de cinza) e são apresentadas na figura 1. Toda a seção transversal da amostra foi examinada manualmente pelo identificador. Durante a aquisição das imagens evitou-se a sobreposição de imagens capturadas, neste estudo obtivemos em média 8 fotos por corpo de prova, resultando em 64 fotos por espécie.

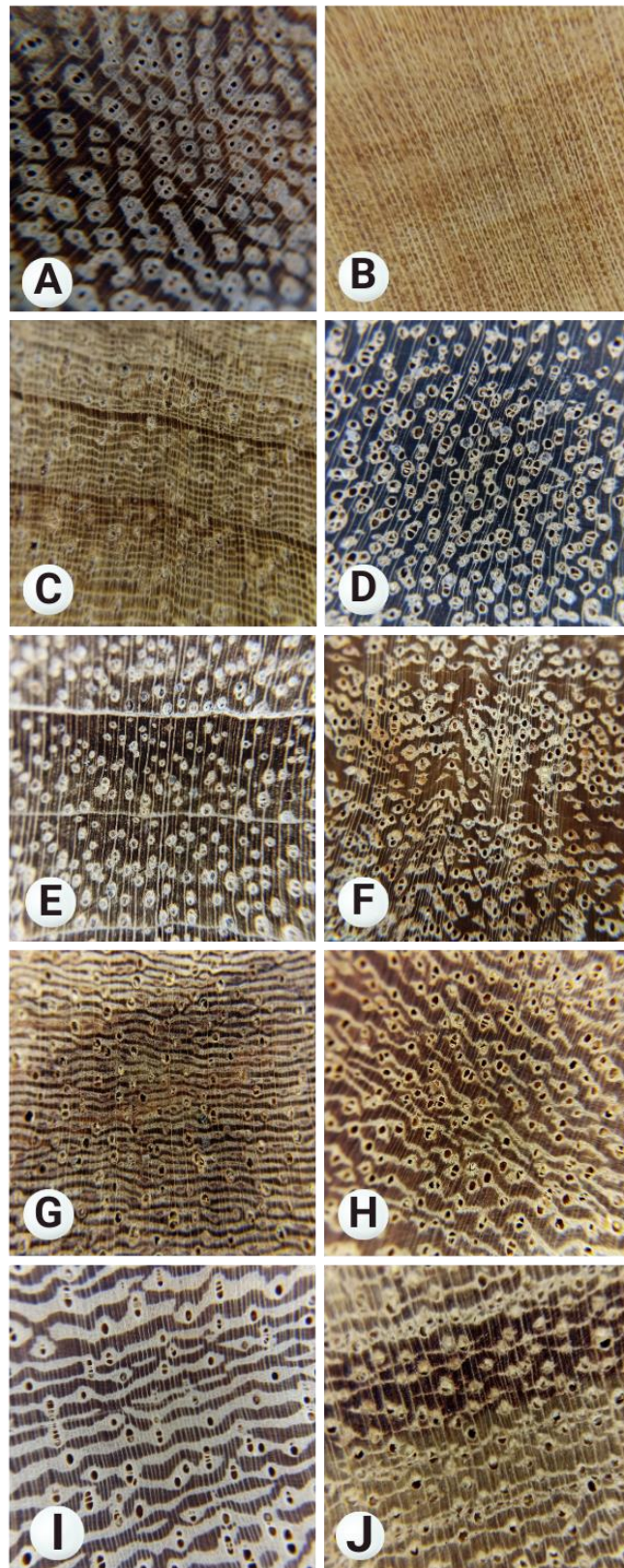


Figura 1. Imagens macroscópicas de dez madeiras tropicais da flora Brasileira, onde 1A - *Amburana cearensis*, 1B - *Aspidosperma* sp., 1C - *Bertholletia excelsa*, 1D - *Diploptropis* sp., 1E - *Cedrela odorata*, 1F - *Dipteryx odorata*, 1G - *Erisma uncinatum*, 1H - *Guarea* sp., 1I - *Hymenolobium petraeum*, 1J - *Vochysia* sp.

Pré-processamento das imagens

Antes de processar as imagens e classificá-las, realizou-se o pré-processamento com *Data Augmentation*, essa técnica é utilizada para elevar a precisão e adaptabilidade de sistemas de redes neurais artificiais para classificação (Urbonas et al. 2019). As imagens foram processadas em linguagem de programação Python utilizando bibliotecas de processamento de imagens (Keras, PIL), ferramentas de estatísticas (Sklearn) e aprendizagem de máquinas (TensorFlow).

Por meio da data augmentation, o banco de dados foi expandido e variado de forma que o modelo fosse capaz de classificar as espécies ainda que ocorressem transmutações da imagem de uma mesma espécie. Essa estratégia de aumento de dados incluiu reflexões horizontais e verticais, randomizações e rotação das fotos para diminuir o overfitting (Shorten and Khoshgoftaar, 2019).

Por fim, para o treinamento e teste do modelo de classificação normalizou-se os pixels das imagens entre 0 e 1. Essa prática acelera o processo de treinamento, além de trazer uma melhor convergência durante o processo de otimização e garante uma melhor consistência nos dados por estarem na mesma escala. Essa prática é baseada em fundamentos matemáticos e empíricos (Krizhevsky et al. 2012; Ioffe & Szegedy, 2015). 3.136 fragmentos de imagem (patches) com dimensões de 300×300 pixels de cada imagem sem sobreposição foram amostrados, totalizando 31.360 patches para as 10 espécies. O conjunto de dados de imagens foi dividido entre treinamento e validação, de forma que 70% das amostras na base de dados fossem para treinamento (21952 imagens), enquanto os 30% restantes (9408 imagens) contribuíssem com imagens para o conjunto de testes.

Análise Experimental

Os classificadores foram construídos usando Redes Neurais Artificiais (RNA) com arquiteturas de CNN. A classificação das imagens foi realizada com o auxílio do TensorFlow (Abadi et al. 2016) que é uma biblioteca open-source criada pela Google que contém técnicas para visão computacional e aprendizagem de máquinas de manuseio ágil. Para desenvolver este processo utilizamos a linguagem de programação Python seguindo as diretrizes de Dey (2018).

A imagem recebida pelo modelo de classificação é direcionada a entrada da InceptionV3, a qual internamente procederá com várias operações matemáticas sobre os pixels da imagem, conforme ilustrado na figura 2.

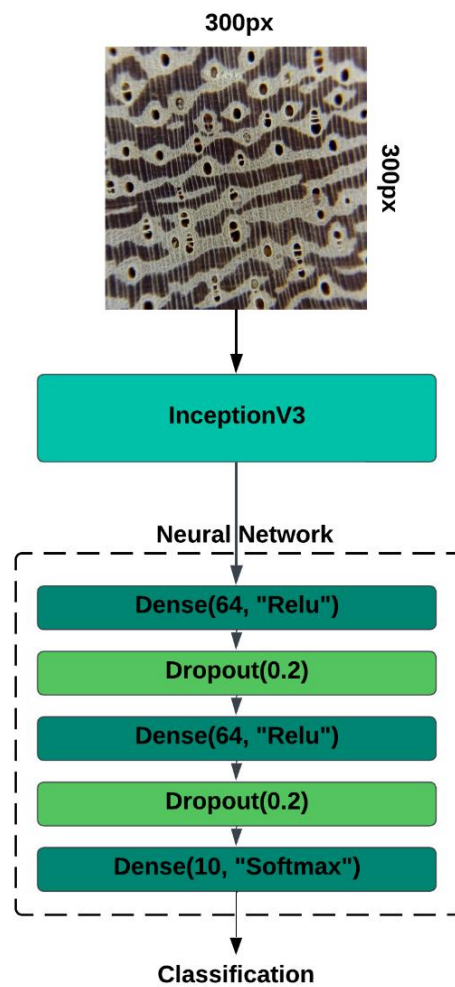


Figura 2. Arquitetura da CNN utilizada. O input é a imagem digital de 300 x 300 px e o output é a probabilidade de previsão de densidade 10.

Na sequência, a saída da InceptionV3 é levada para uma sequência de camadas de “Densas”, as quais são compostas por 64 neurônios cada, que por sua vez, possuem a função de ativação "Relu", a qual é descrita matematicamente por:

$$ReLU(x) = \begin{cases} x & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

A segunda camada também é composta por 64 neurônios e a função de ativação "Relu" descrita anteriormente. Por fim, a última camada possuía 10 neurônios, o mesmo número de classes a serem classificadas, e a função de ativação "Softmax" (LeCun et al., 2002), a qual é comumente usada na camada de saída dos modelos de classificação, por transformar um vetor de valores “z” em um vetor de probabilidades $\sigma(z)$ onde a soma das probabilidades é 1. Para isso, utiliza-se a equação:

$$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}$$

Para $i=1,2,\dots,K$, onde K é o número de classes, z_i é a entrada para a i-ésima classe, e $\sigma(z)_i$ é probabilidade prevista para a i-ésima classe.

Entre duas camadas de neurônios foi adicionado Dropout. Essa técnica foi responsável por treinar o modelo diminuindo o número de neurônios (no nosso caso, diminui em 20%) de forma aleatória, fazendo assim, a redução de chances que ocorra *Overfitting* no modelo.

O desempenho final do modelo foi definido com base na acurácia das observações do conjunto de testes com duas e três ciclos. Uma matriz de confusão foi gerada através da biblioteca sklearn na versão 1.3.1 para o algoritmo InceptionV3. Em todos os modelos também foram calculados erros de classificação com base nos conjuntos de treinamento e validação, a fim de investigar a possível ocorrência de alto viés ou variância nos modelos. Além da acurácia do modelo, avaliou-se as métricas: Precisão, Recall e F1-Score.

A métrica de precisão é responsável por quantificar a proporção de exemplos positivos (exemplos que são da classe que se esperava) classificados de forma correta entre todos os exemplos classificados como positivos pelo modelo. Matematicamente a precisão é descrita como:

$$Precisão = \frac{TP}{TP + FP}$$

Onde TP (True Positives) é o número de exemplos positivos corretamente classificados como positivos. Em outras palavras, a quantidade de amostras que de fato era da classe que se esperava. Já o FP (False Positives) é o número de exemplos negativos incorretamente classificados como positivos, ou seja, a quantidade de amostras que não eram da classe que se foi classificado.

Já o Recall, por sua vez, mede a precisão de exemplos positivos que foram classificados corretamente sem levar em consideração todos os exemplos. Em outras palavras, mede a assertividade do conjunto de exemplos mediante a sua classe. A Equação que descreve o recall pode ser representada:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Onde FN (False Negative) são os exemplos que deveriam ter sido classificado como a classe desejada, mas são classificados como outra.

Por fim, o F1-Score é a média harmônica da Precisão e do Recall, analisando assim o equilíbrio entre ambas as métricas. É útil quando você deseja ter uma única medida que leve em consideração tanto a Precisão quanto o Recall, e é implementada como sendo:

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precisão \times Recall}{Precisão + Recall}$$

Todas as três métricas atingem seu melhor valor em 1 (perfeição) e o pior valor em 0 (falha).

RESULTADOS

Os resultados de acurácia do modelo de classificação de madeiras por imagens macroscópicas e o número de amostras com erros de identificação são apresentados na tabela 2. Por meio da avaliação de performance do algoritmo de Inception V3 observamos que o modelo atingiu acurácia de 95% e 96% em 2 épocas e 3 épocas de processamento, respectivamente. Dentro da arquitetura da CNN, a Inception V3 foi responsável por diversos tratamentos, como na entrada da imagem, o qual matematicamente extraiu e aglutinou informações com padrões que caracterizaram cada espécie identificada.

Tabela 2. Resultados da acurácia e o número de amostras com erros de identificação.

	Acurácia (%)	Número de amostras com erros de identificação
Predição da Inception V3 com 2 épocas	95	1.568/31.360
Predição da Inception V3 com 3 épocas	96	1.255/31.360

Na prática, a aquisição de imagens macroscópicas das madeiras tropicais via Smartphone foi ágil e de fácil manuseio. Nossos resultados apoiam que a arquitetura Inception V3 apresentou alta precisão na classificação de 10 madeiras tropicais a partir de imagens macroscópicas, indicando que este modelo pode ser utilizado em um dispositivo móvel. A CNN pode ser considerada convergente quando a precisão se aproxima de 1,0; a tabela 4 mostra os parâmetros médios da avaliação do modelo por espécie com 3 épocas de treinamento.

Tabela 3. Parâmetros médios de avaliação do modelo por espécie tropical.

Espécie	Precisão	Recall	F1-Score
<i>Amburana cearensis</i>	0,99	0,99	0,99
<i>Aspidosperma</i> sp.	1,0	1,0	1,0
<i>Bertholletia excelsa</i>	0,99	0,98	0,98
<i>Diploptropis</i> sp.	0,98	1,0	0,99
<i>Cedrela odorata</i>	0,96	0,97	0,97
<i>Dipteryx odorata</i>	0,99	0,98	0,99
<i>Erismia uncinatum</i>	0,95	0,96	0,96
<i>Guarea</i> sp.	0,94	0,80	0,87
<i>Hymenolobium petraeum</i>	1,0	0,99	0,99
<i>Vochysia</i> sp.	0,82	0,95	0,88

A qualidade das predições do classificador também pôde ser verificada através da sua matriz de confusão (Figura 3).

<i>Amburana cearensis</i>	937	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<i>Aspidosperma sp.</i>	0	935	0	0	4	0	0	0	0	0
<i>Bertholletia excelsa</i>	5	2	905	0	8	6	1	0	0	12
<i>Bowdichia nitida</i>	0	0	0	938	0	1	0	0	0	0
<i>Cedrela odorata</i>	1	1	0	10	907	2	2	5	0	11
<i>Dipteryx odorata</i>	0	0	1	2	0	927	1	2	4	2
<i>Erisma uncinatum</i>	3	1	1	4	20	1	866	15	0	28
<i>Guarea sp.</i>	6	0	1	1	15	7	18	786	3	102
<i>Hymenolobium petraeum</i>	0	0	0	6	1	3	0	4	925	0
<i>Vochysia sp.</i>	2	4	6	9	13	1	7	56	0	841
	<i>Amburana cearensis</i>	<i>Aspidosperma sp.</i>	<i>Bertholletia excelsa</i>	<i>Bowdichia nitida</i>	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Erisma uncinatum</i>	<i>Guarea sp.</i>	<i>Hymenolobium petraeum</i>	<i>Vochysia sp.</i>

Figura 3. Matriz de confusão média das dez madeiras tropicais do Brasil.

A matriz de confusão exibida na figura 2 mostra que o modelo utilizado possui boa qualidade. Uma classificação ideal produz valores superiores na diagonal, o que significa que todas as espécies foram previstas corretamente pelo algoritmo. O modelo de classificação apresentou precisão de 99% para espécies ameaçadas como *Bertholletia excelsa* e *Amburana cearensis*. A figura 2 mostra um grau de confusão relativamente baixo no nosso modelo, que identificou madeiras tropicais como *Aspidosperma sp.* e *Hymenolobium petraeum* com acurácia de 100%, o algoritmo também apresentou alta eficácia na classificação das espécies tropicais *Dipterix odorata* (99%) e *Dipterix odorata* (99%). Entretanto, o algoritmo apresentou dificuldade em identificar três espécies tropicais: *Erisma uncinatum* (95%), *Guarea sp.* (94%) e *Vochysia sp.* (82%), porque essas madeiras possuem características sensoriais similares como a cor e a densidade, podendo ser encontradas no comércio de Lavras, Estado de Minas Gerais com o nome popular cedrinho. Embora a fraude envolvendo esses táxons esteja acontecendo em âmbito regional, esse problema pode ocorrer em escala devido a semelhança entre madeiras e as inúmeras falhas na fiscalização. Vale destacar nesse estudo, que a miscelânea de madeiras também ocorreu com *Cedrela odorata* (96%), espécie em perigo de extinção e com restrições de comercialização. A figura 4 apresenta as imagens macroscópicas das madeiras de *C. Odorata* e as três comercializadas como cedrinho.

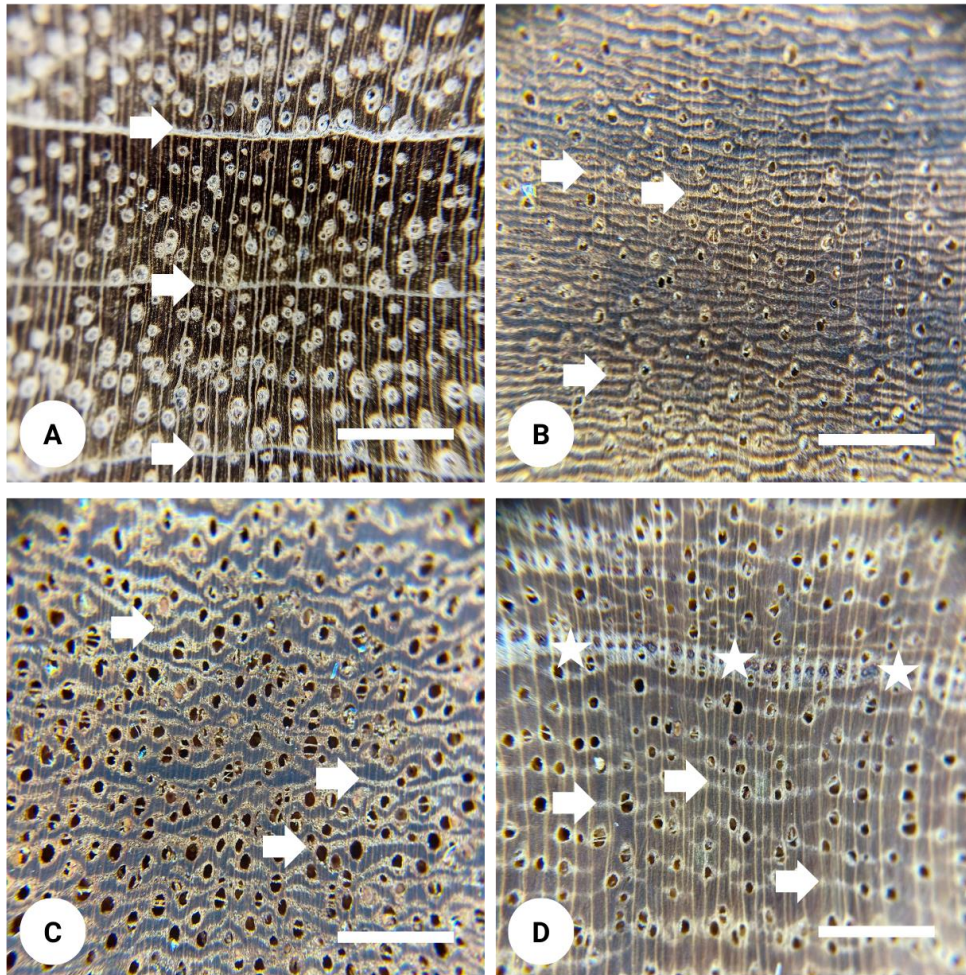


Figura 4. Imagens macroscópicas das madeiras de A – *Cedrela odorata*, B – *Erismia* sp., C – *Guarea* sp. e D – *Vochysia* sp. As setas na imagem representam o padrão de parênquima axial de cada espécie e a estrela em 1D demonstra canais axiais, traumáticos no lenho. Barra de escala 1:500 μ m.

De acordo com as imagens da Fig. 4 constatamos que o tipo de parênquima axial é o principal atributo anatômico capaz de segregar as madeiras similares identificadas. Em *C. odorata* (Fig. 4A) o padrão predominante foi o marginal, em *E. uncinatum* destaca-se o parênquima axial em faixas (Fig. 4B), já em *Guarea* sp. o mais representativo foi o parênquima confluyente (Fig. 4C), por fim a madeira de *Vochysia* sp. apresentou o parênquima aliforme losangular como padrão. Além disso, evidenciamos a presença de canais traumáticos no lenho de *Vochysia* (4D*), evidenciando que enxergar essa peculiaridade anatômica durante a inspeção de campo ajudaria o fiscal de triagem.

DISCUSSÃO

É necessário investir em métodos científicos de verificação da madeira para combater o comércio ilegal de madeira e proteger as florestas do mundo. Os testes de identificação de espécies e de origem são essenciais para verificar as alegações feitas no registro de compliance e para demonstrar a legalidade nas cadeias de suprimento

de madeira (Low et al. 2022). Neste trabalho abordamos a anatomia da madeira e a Inteligência Artificial como temas científicos potenciais para redução de crimes ambientais.

O uso tradicional da anatomia do lenho demonstra enorme confiabilidade na identificação de táxons, sendo o parênquima axial o caractere padrão que separa a maioria das madeiras tropicais. Alguns trabalhos realizados na América do Sul demonstraram que esta peculiaridade é determinante para separar madeiras tropicais (Duarte et al. 2021; Ferreira et al. 2021).

Apesar dos aspectos positivos da Anatomia da Madeira, fica evidente que chegamos no seu limiar de desenvolvimento, a formação de especialistas com esta hard skill leva tempo e os custos associados a essa tarefa são altos. Tais limitações prejudicam o monitoramento em tempo real do comércio e impactam na luta contra a exploração ilegal de madeiras (Silva et al. 2022).

Para diversos empreendedores, especialistas no setor e consumidores finais o principal desafio para promover a madeira tropical se refere à origem e à legalidade da produção florestal (Lentini et al. 2022). Garantir a rastreabilidade do produto é a chave para a sustentabilidade do mercado de madeira tropical, apesar disso, o varejo madeireiro do Brasil tem sofrido com irregularidades na identificação de espécies na comercialização, Nascimento et al. (2017) detectaram 49 usos incorretos de nomes populares no mercado de madeiras no Rio de Janeiro. Duarte et al. (2020) apontaram erros de comercialização em espécies similares conhecidas como guajará em Minas Gerais.

Nesse contexto, a identificação de madeiras baseada em Inteligência Artificial tem grande potencial para digitalizar o processo de fiscalização, fornecer segurança e transparência para empresas e consumidores de madeira. Nossos resultados demonstraram que os algoritmos de CNN possuem eficácia na classificação de dez espécies tropicais, incluindo amostras de madeira em perigo de extinção como a *Amburana cearensis* e as Vulneráveis: *B. excelsa* e *C. odorata*. Ravindram et al. (2018) alcançaram acurácia de 87,4% a 97,5% utilizando CNNs para identificar 10 espécies neotropicais da família Meliaceae, incluindo táxons listados na CITES: *Swietenia macrophylla*, *Swietenia mahagoni*, *Cedrela fissilis* e *Cedrela odorata*.

Nosso modelo conseguiu ótimos resultados na identificação de madeiras valorizadas no mercado, *Aspidosperma* sp. e *Diploptropis* sp., muito utilizadas em móveis rústicos e mobiliários de luxo. O mesmo modelo também obteve eficácia na identificação de leguminosas tradicionais no mercado, como *Dypterix odorata* e *Hymenolobium petrauem*, ambas na lista de madeiras mais comercializadas no Brasil, conforme dados de sistemas oficiais de controle oficial, compilados pelo IMAFLORA (Lentini et al. 2021).

Muitas espécies têm importância econômica devido ao seu potencial madeireiro, como é o caso das árvores da família Meliaceae. A ampla exploração da madeira por indústrias moveleiras, o desmatamento e a perda de qualidade do habitat são as principais ameaças às espécies desta família, sobretudo àquelas com distribuição restrita. Por muito tempo, as madeiras de *Cedrela odorata* L. (cedro) e *Swietenia macrophylla* King (mogno) foram as mais comercializadas e valorizadas do mundo, sendo exploradas há mais de 200 anos, na maioria das vezes de maneira ilegal (Martinelli and Moraes, 2013).

Nesse estudo houve menor precisão relacionada à predição de madeiras semelhantes (Fig. 4), mas, à medida que mais dados forem coletados e processados a acurácia do modelo tende a aumentar. Para criação, treinamento e validação do modelo de classificação de madeiras utilizamos amostras obtidas em estabelecimentos comerciais no estado do Pará e de Minas Gerais. Apesar disto ser desencorajado por Ravindram e Wiedenhoft (2022), entendemos que este trabalho seja o ponto de partida para que outros centros de pesquisa se inspirem e nos

auxiliem disponibilizando amostras com rastreabilidade para inserção no modelo de classificação. Para este desafio, estamos desenvolvendo nosso sistema mobile para os envolvidos na comercialização de madeiras e pretendemos atualizar constantemente este modelo de aprendizagem de máquina para garantir a precisão.

Lopes et al (2020) mostraram a viabilidade da rede neural convolucional InceptionV4_ResNetV2 para classificar dez espécies de madeira dura norte-americanas com 92,60% de acurácia. Já Olschofsky e Köhl (2020), aplicaram um modelo de classificação baseado no algoritmo Inception V3 para identificar espécies listadas na CITES e alcançaram 98% de precisão com as CNNs pré-treinadas, quando foram adicionadas outras espécies não usadas no treinamento, a acurácia da classificação decaiu para 87%.

Vários trabalhos utilizaram modelos treinados com madeiras brasileiras, Paula Filho et al. (2014) utilizaram Redes Neurais Artificiais para diferenciar 41 espécies da flora brasileira, obtendo acurácia de até 97,77%. Posteriormente, Figueroa-Mata et al. (2018) aplicaram CNNs para classificar as mesmas espécies florestais alcançando uma precisão de 98,3%.

O uso de sistemas acoplados em Smartphone pode ser uma realidade replicável em campo, Andrade et al. (2020) construíram um banco de imagens com 2.000 fotos macroscópicas de 21 espécies tropicais usando o celular com uma lente iluminada acoplada e lâmina para polir a madeira. Os autores utilizaram diferentes classificadores baseados em Support Vector Machine e atingiram precisão de até 97,7%.

A disponibilidade recente de equipamentos e adaptações para Smartphones para identificação de madeiras (Tang et al. 2018) torna mais democrático o processo. Para o futuro, a nossa equipe pretende incorporar a base de dados com amostras de xilotecas brasileiras, sendo essa etapa é essencial para dar robustez ao método apresentado no trabalho. Além disso, pretendemos promover a melhoria contínua dos nossos modelos de IA realizando o processamento com mais ciclos de treinamento

Atualmente, o comércio de madeiras é caracterizado pela complexidade de entradas e saídas desse material ao longo dos arranjos produtivos locais e abrange diversos países produtores, bem como dos consumidores, o que torna a fiscalização especialmente difícil. Apesar dos desafios de monitoramento da rastreabilidade da madeira persistirem, existem pontos na cadeia de suprimentos que demonstram desafios e oportunidades para verificação de rotina (Lowe et al. 2016).

À exemplo disso, temos a última etapa da cadeia de suprimentos da madeira: a venda para o usuário final, na qual, salvo raras exceções, o consumidor dificilmente confere a procedência do material no momento de comprar o produto de origem florestal, levando em consideração apenas o nome popular para adquirir uma peça, atitude que representa uma prática insustentável para a conservação da flora brasileira. De acordo com Scotti et al. (2023) há necessidade de capacitar as autoridades públicas nos níveis estaduais e federais para executarem a legislação, bem como fomentar a conscientização da sociedade através da educação ambiental com objetivo de evitar o consumo de madeira de procedência ilegal, ou seja, de fontes diferentes de planos de manejo sustentáveis.

Além desses desafios de legalidade da matéria-prima, existem as preocupações sobre a falsificação dos documentos que comprovam a identidade ou a ocorrência de não conformidades durante o processo comercial (Wiedenhoeft et al. 2019). Gasson et al. (2020) relataram que a situação é agravada com a utilização de nomes comerciais devido ao fato do mesmo nome ser usado para diferentes táxons sem relação botânica ou pela variedade de nomes regionais que são dados para a mesma espécie.

O comércio nacional de madeira atualmente exige apenas um Documento de Origem Florestal – DOF que indique a espécie, quantidade, uso comercial, origem e destino. Representa uma licença obrigatória para transporte

e armazenamento de produtos florestais e funciona como uma ferramenta de contabilidade para a concessão de autorizações florestais (Brandes et al. 2022). Além do DOF, o Brasil conta com Sistemas específicos de fiscalização, tais como o Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (Sinaflor) de âmbito federal e o SISFLORA nos estados do Mato Grosso e no Pará (FAO and WRI 2022). A questão é que não há segurança sobre essa legalidade. Os sistemas oficiais de controle da madeira, como oDOF, apresentam fragilidades no rastreio (Carvalho et al. 2019, Lentini et al. 2022). Entre os pontos de melhoria, a fiscalização no varejo final necessita de atenção, devido a especificações dos produtos de origem florestal no sistema de acompanhamento.

Nosso trabalho demonstrou os erros de identificação dos táxons *E. uncinatum*, *Guarea* sp. e *Vochysia* sp. agrupados pelo mesmo nome comercial cedrinho. Esse resultado expõe a fragilidade do sistema de fiscalização ambiental praticado no País e demonstra que fraudes em pontos de venda de madeiras ainda podem acontecer com frequência. Diversos autores defendem o uso do nome científico na comercialização de madeiras (Gasson et al. 2021, Duarte et al. 2020, Nascimento et al. 2017), contudo, os pontos finais de venda não compraram essa ideia. Tal prática de utilizar nomes populares no varejo é tradicional, porém, não é recomendável para promover a sustentabilidade do mercado brasileiro de madeira. Dessa forma, sugerimos que as autoridades e a CITES adotem um registro único de identidade da madeira no mercado de madeiras e testem a inclusão do nome científico junto ao nome popular, e.g: nome científico - *Erismia uncinatum*, nome comercial sugerido cedrinho-erisma; outro exemplo *Guarea* sp., nome comercial sugerido: cedro-guarea. Espera-se que essa alternativa fixe o conhecimento botânico nas partes envolvidas na comercialização de madeiras e se torne um hábito no mercado global.

A linha de pesquisa envolvendo o desenvolvimento de algoritmos de classificação de imagens está em ascensão e tem apresentado grandes avanços. Contudo, a maior parte das pesquisas não abordam sobre o conhecimento em anatomia da madeira (Andrade et al. 2020).

Nesse trabalho apresentamos diferentes cenários nos quais a anatomia da madeira pode contribuir para desvendar a identidade correta de certas madeiras, fomos além propondo uma metodologia que alia o saber tradicional e a inovação tecnológica capaz de reconhecer madeiras tropicais através de imagens macroscópicas, incluindo táxons ameaçados de extinção. A Inteligência Artificial apresenta potencial para complementar o processo de identificação no campo e aliado as pesquisas em anatomia da madeira poderão desempenhar papel crucial na validação de todo o processo de rastreabilidade de produtos madeireiros.

O uso da CNN não vai substituir métodos comprovados de identificação de madeira como a anatomia do Lenho, mas se apresenta como alternativa sustentável para a situação atual para treinamento e formação de especialistas (Gasson et al. 2021; Hwang and Sugiyama, 2021).

A tecnologia de identificação baseada em IA poderá tornar-se uma das armas mais eficazes e inevitáveis na luta contra o comércio ilegal de madeira e carvão vegetal (Silva et al. 2022). Estes sistemas oferecem a clara vantagem da avaliação rápida de espécies ameaçadas, ao combinar este método com a tecnologia móvel disponível pode-se estabelecer o redesenho do processo de identificação, um método operacional decisivo para a sustentabilidade e conservação das florestas (Olschofsky e Köhl, 2020).

Para pessoas ou organizações que desejam minimizar a probabilidade de que suas escolhas de aquisição contribuam para a exploração ilegal de madeira é aconselhável utilizar ferramentas de avaliação capazes de estimar esse risco (Wiedenhof et al. 2019). Com o propósito de promover a sustentabilidade e conservação das florestas, nossa equipe desenvolveu o aplicativo de identificação de madeiras, Smart Timber System. Esperamos que esse sistema que reúne inteligência artificial e *Big Data* contribua para a redução de crimes ambientais relacionados ao

comercio de produtos florestais e forneça as informações necessárias para a sustentabilidade do mercado de madeiras tropicais pelo mundo.

CONCLUSÃO

A situação atual no setor madeireiro brasileiro não adere a práticas de sustentabilidade, visto que o comércio ilegal de madeiras tropicais continua a ocorrer no País. Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de desenvolver tecnologias digitais escaláveis, capazes de apoiar entidades governamentais, fiscais, varejistas de madeira e consumidores finais.

Este estudo apresenta uma visão abrangente da abordagem de identificação por meio de tecnologias avançadas, aliado ao método visual pela anatomia do lenho. Os resultados são promissores no controle de espécies comercializadas e na detecção de fraudes na venda de madeiras tropicais no Brasil. O modelo concebido por nossa equipe baseou-se em Machine Learning, com adaptação do algoritmo Inception V3 e superou a nossa hipótese inicial de 90%, alcançando uma taxa global de acurácia de 96% ao longo de três ciclos de processamento.

Destacamos a eficiência deste modelo na classificação de 10 táxons tropicais, incluindo espécies ameaçadas de extinção, como *Amburana cearensis* (99%), *Bertholletia excelsa* (99%) e *Cedrela odorata* (96%). Além destas espécies, Inception V3 alcançou máxima acurácia na classificação de madeiras valorizadas no mercado, como *Aspidosperma* sp. e *Hymenolobium petraeum* (100% em ambas) e também demonstrou eficácia na classificação de *Diptotropis* sp. (98%) e *Dipteryx odorata* (99%), duas das principais madeiras comercializadas em território nacional.

Observou-se uma diminuição na acurácia da CNN na identificação dos táxons semelhantes *Guarea* sp. (94%) (Meliaceae), *Erismia uncinatum* (95%) e *Vochysia* sp. (82%) (ambas da família Vochysiaceae). Ao analisar as informações coletadas durante este trabalho, constatou-se que as três madeiras semelhantes são frequentemente comercializadas sob o mesmo nome genérico, “cedrinho”.

Nosso modelo desenvolvido baseado em IA demonstra potencial para auxiliar no combate a crimes ambientais e na conservação de táxons tropicais ameaçados. Sugerimos que as agências governamentais incentivem a adoção de mecanismos de certificação para fiscais na linha de frente, bem como para o empresário do varejo de madeiras.

A busca pela sustentabilidade da cadeia de suprimentos da madeira persiste, novos estudos envolvendo a digitalização do processo comercial de madeira integrado a mecanismos de rastreabilidade deve ser prioridades para pesquisa futuras. Nosso software de identificação de madeiras Smart Timber está em fase final de registro de propriedade intelectual no Brasil, temos o desafio de inserir mais espécies com lastro de rastreabilidade dentro deste sistema e validar a aplicabilidade através de Provas de Conceito (PoC) em ambientes de linha de frente da fiscalização ambiental, em alfandegas e em centros de distribuição de madeiras pelo País.

AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) por providenciar parte do material de estudo e a sua infraestrutura. Também agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante a pesquisa (Código financeiro 141553/2019-7).

REFERÊNCIAS

Abadi M, Barham P, Chen J, Chen Z, Davis A, Dean J, ... & Zheng X (2016). TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning. In Proceedings of the 12th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16) (pp. 265-283). USENIX Association.

Amburana cearensis in: The IUCN Red List of Threatened Species (1998) Americas Regional Workshop (Conservation & Sustainable Management of Trees, Costa Rica, November 1996): e.T32291A9687595. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T32291A9687595.en>. Accessed on 14 September 2023.

Andrade BG, Basso VM, Latorraca JVF (2020) Machine vision for field-level wood identification. IAWA Journal, 41(4): 681-698. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10001>

Arévalo R, Pulido R EN, Solórzano G JF, Soares R, Ruffinatto F, Ravindran P, Windenhoef AC (2021) Imaged based identification of colombian timbers using the xylotron: A proof of concept international partnership. Colombia Forestal 24(1): 5-16. <https://doi.org/10.14483/2256201x.16700>

Barbosa ACF, Gerolamo CS, Lima AC, Angyalossy V, and Pace MR. 2021. Polishing entire stems and roots using sandpaper under water: an alternative method for macroscopic analyses. Appl Plant Sci. 9(5): aps3.11421. <https://doi.org/10.1002/aps3.11421>.

Barmpoutis P et al. (2018) Wood species recognition through multidimensional texture analysis. Computers and electronics in agriculture, 144: 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.011>

Brandes A, Novello B, Lemos D, Nascimento LB, Albuquerque R, Tamaio N, Barros C (2020) Wood anatomy of endangered Brazilian tree species. IAWA Journal, 41(4): 510-576. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10037>

Carvalho WD et al. (2019) Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. Perspectives in Ecology and Conservation 17(3):122-130. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.06.002>

Dey A (2018) Building an image classifier using TensorFlow. Available in: <https://medium.datadriveninvestor.com/building-an-image-classifier-using-tensorflow-3ac9ccc92e7c>. Accessed: June 10, 2023.

Dormontt EE, et al. (2015) Forensic timber identification: it's time to integrate disciplines to combat illegal logging. Biological Conservation. 191: 790–798. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.038>

Duarte PJ, Pego MFF, Faria CET et al. (2020) Macroscopic identification of tropical woods traded by Guajará in Lavras, Minas Gerais. Brazilian Journal of Development 6:60830-60838. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-484>

Duarte PJ, Borges CC, Ferreira CA, Cruz TM, Sousa WRQ, Mori FA (2021) Anatomical identification of tropical woods traded in Lavras, Brazil. *Journal of Tropical Forest Science* 33(1): 95-104. <https://doi.org/10.26525/jtfs2020.32.4.95>

FAO and WRI (2022) Timber traceability – A management tool for governments. Case studies from Latin America. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb8909en>

Ferreira CA, Inga JG, Vidal OD, Goytendia WE, Moya SM, Centeno TB, Vélez A, Gamarra D, Tomazello-Filho M (2021) Identification of tree species from the peruvian tropical amazon “selva central” forests according to wood anatomy. *BioResources*, 16: 7161–7179. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7161-7179>

Figuroa-Mata G, Mata-Montero E, Valverde-Otarola JC, Arias-Aguilar D (2018) Using deep convolutional networks for species identification of xylotheque samples. In: 2018 IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOB), IEEE, <https://doi.org/10.1109/iwobi.2018.84642>

Gasson PE, Lancaster CA, Young R, et al. (2021) WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber. *Plants, People, Planet* 3: 130–141. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10164>

Hwang SW, Sugiyama J (2021) Computer vision-based wood identification and its expansion and contribution potentials in wood science: A review. *Plant Methods* 17(1): 1-21. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00746-1>

Ioffe S, Szegedy C. (2015). Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, ICML 37*: 448–456. [Online]. Available: <http://proceedings.mlr.press/v37/loff15.html>

Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE (2017). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM* 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>

LeCun Y, Bottou L, Orr GB, Müller KR (2002). Efficient backprop. In *Neural networks: Tricks of the trade* (pp. 9-50). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-49430-8_2

Lentini MW, Bezerra MHM, Dias AS, Bernardes AT, Erdmann AA (2022) Acertando o Alvo 4 : Panorama Atual e Tendências para Mercados Sustentáveis de Madeira da Amazônia. Piracicaba, São Paulo: Imaflora. Available in: https://imaflora.org/public/media/biblioteca/aa4_final.pdf. Accessed in: November 03, 2023.

Lopes DJV, Burgreen GW, Entsminger ED (2020) North American hardwoods identification using machine-learning. *Forests* 11(3): 298. <https://doi.org/10.3390/f11030298>

Low MC. et al. (2022) Tracing the world's timber: the status of scientific verification technologies for species and origin identification. *Iawa Journal*, v. 1, n. aop, p. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10097>

Lowe, AJ et al (2016) Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. *BioScience* 66(11): 990-998. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw129>

Martinelli G, Moraes AM (2013) Livro vermelho da flora do Brasil. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro.

Ministério do Meio Ambiente - MMA (2014) Ordinance MMA no. 443, of december 17, 2014. Recognizes as species of Brazilian flora threatened with extinction those included in the official national list of species of flora threatened with extinction. Accessed on 13 September 2023.

Nascimento, LB et al. (2017) Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Brazilian Journal of Botany* 40:291-329. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0324-5>

Olschofsky K, Köhl M (2020) Rapid field identification of cites timber species by deep learning. *Trees, Forests and People* 2:100016. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100016>

Pan SJ, Yang QA (2009) Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 22 (10): 1345–1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>

Paula Filho PL, Oliveira LS, Nisgoski S, Britto Jr AS (2014). Forest species recognition using macroscopic images. *Machine Vision and Applications* 25: 1019–1031. <https://doi.org/10.1007/s00138-014-0592-7>

PNUMA-WCMC (2024) A lista de verificação do site de espécies da CITES. Secretariado da CITES, Genebra, Suíça. Compilado por UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido. Disponível em: <http://checklist.cites.org/> > Acesso em: 26 jun. 2024

Ravindran P, Wiedenhoeft AC (2022) Caveat emptor: On the Need for Baseline Quality Standards in Computer Vision Wood Identification. *Forests* 2022, 13: 632. <https://doi.org/10.3390/f13040632>

Ravindran P, Owens FC, Wade AC, Vega P, Montenegro R, Shmulsky R, Wiedenhoeft AC (2021) Field-Deployable Computer Vision Wood Identification of Peruvian Timbers. *Front. Plant Sci.* 12: 647515. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647515>

Ravindran P, Wiedenhoeft AC (2020) Comparison of two forensic wood identification technologies for ten Meliaceae woods: computer vision versus mass spectrometry. *Wood Science and Technology*, 54(5): 1139-1150. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01178-1>

Ravindran P, Costa A, Soares R, Wiedenhoef AC (2018) Classification of CITES-listed and other neotropical Meliaceae wood images using convolutional neural networks. *Plant Methods*, 14(25). <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0292-9>

Ruffinatto F, Crivellaro, A (2019) Atlas of macroscopic wood identification: with a special focus on timbers used in Europe and CITES-listed species. Springer International Publishing. Retrieved from www.springer.com/9783030235659

Scoti MSV, Mascarenhas ARP, Rebelo AC et al. (2022) Current practices of conducting forest management plans in the Amazon may risk the survival of timber species. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 82589–82600. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28311-4>

Shorten C, Khoshgoftaar TM (2019) A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of big data* 6(1): 1-48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>

Sotirov M, Azevedo-Ramos C, Rattis L, Berning L (2022) Policy options to regulate timber and agricultural supply-chains for legality and sustainability: The case of the EU and Brazil. *Forest Policy and Economics*, 144: 102818. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102818>

Silva JL, Bordalo R, Pissarra J, de Palacios P (2022) Computer Vision-Based Wood Identification: A Review. *Forests*, 13 (12): 2041. <https://doi.org/10.3390/f13122041>

Urbonas A. et al (2019) Automated identification of wood veneer surface defects using faster region-based convolutional neural network with data augmentation and transfer learning. *Applied Sciences*, 9(22): 4898. <https://doi.org/10.3390/app9224898>

Tang XJ, Tay YH, Siam NA, Lim SC (2018) MyWood-ID. Automated macroscopic wood identification system using smartphone and macro-lens. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Computational Intelligence and Intelligent System*, Phuket, Thailand, 17-18 november 2018; pp. 37–43. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.08154>

Tang XJ, Tay YH (2019) Xylorix: An AI-as-a-service platform for wood identification. In *Program & Abstract of the IAWA-IUFRO International Symposium on Challenges and Opportunities for Updating Wood Identification*, May 20 - 22, 2019, Langfang, China. IAWA/IUFRO/CAF, 31-32. Available in: https://www.iawa-website.org/uploads/allimg/pdf/IAWA-IUFRO_International_Symposium_Manual.pdf#page=43

Yusof R, Khalid M, Khairuddin ASM (2013). Application of kernel-genetic algorithm as nonlinear feature selection in tropical wood species recognition system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93: 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.007>

Wiedenhoft AC, Simeone J, Smith A, Parker-Forney M, Soares R, Fishman A (2019) Fraud and misrepresentation in retail forest products exceeds U.S. forensic wood science capacity. PLoS ONE 14(7): e0219917. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219917>

ARTIGO 2 – PADRÕES ANATÔMICOS NA MADEIRA REVELAM EVIDÊNCIAS-CHAVE PARA IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES NATIVAS COMERCIALIZADAS NO VAREJO

PADRÕES ANATÔMICOS NO LENHO REVELAM EVIDÊNCIAS-CHAVE PARA IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES NATIVAS COMERCIALIZADAS NO VAREJO

Paulo Junio Duarte ¹, Rafael Ávila dos Santos², Natalino Calegario¹

P.J. Duarte*

ORCID: 0000-0002-7319-3101

E-mail: contactsmart.timber@gmail.com

R.A. dos Santos

ORCID:0009-0005-0823-8659

E-mail:rafael.santos0t5@gmail.com

N. Calegario

ORCID: 0000-0001-8323-1223

E-mail: calegari@ufla.br

AFFILIATIONS

¹*Department of Forest Science, Federal University of Lavras, 37200-000, Lavras, MG, Brazil.*

²*Department of Automatic, Federal University of Lavras, 37200-000, Lavras, MG, Brazil.*

**Corresponding author*

RESUMO

Tornar o mercado madeireiro sustentável tem sido desafiador. Os esforços governamentais para combater a ilegalidade consistem na promoção de leis, uso de documentos e sistemas para controlar a origem do material, contudo, tais práticas são vulneráveis, uma vez que fraudes no comércio relacionadas a identificação incorreta dos produtos e o comércio de espécies ameaçadas acontecem com frequência no Brasil. Diante disso, o objetivo deste estudo foi identificar madeiras nativas comercializadas no varejo e relatar evidências-chave no lenho que determinam a identidade botânica da madeira. As amostras utilizadas neste trabalho foram cedidas por empreendimentos de Parauapebas, estado do Pará. Estas vieram identificadas apenas pelo nome comercial da região Norte. Foram seccionadas e preparadas para a identificação anatômica. A partir das seções transversal e longitudinal tangencial obtiveram-se imagens por uma lupa digital acoplada a um Smartphone. A partir da avaliação minuciosa do lenho e um estudo em literaturas específicas foram relatados os padrões anatômicos marcantes das espécies, o status de conservação e os principais usos da madeira. Posteriormente, gerou-se um protótipo de identidade digital para as madeiras e uma chave de identificação para as espécies estudadas. Oito madeiras nativas foram identificadas, entre elas, três estão sob algum risco de extinção, *Apuleia leiocarpa*, *Bertholletia excelsa* e *Dipteryx odorata*. Além destas espécies, identificamos outras madeiras valorizadas como *Astronium lecointei*, *Diploptropis* sp., *Chrysophyllum* sp., *Hymenaea* sp. e *Hymenolobium petraeum*. Analisando a nomenclatura comercial, detectou-se um problema para espécie ameaçada *Apuleia leiocarpa*, ela é comercializada como amarelão no Norte, mas no Sudeste pode ser encontrada como garapa ou garapeira. Dentre as estruturas anatômicas analisadas, o tipo de parênquima axial conseguiu diferenciar todas as madeiras tropicais, essa “digital padrão” demonstrou potencial para ser um dos lastros de identidade dentro de um sistema de verificação baseado na anatomia do lenho, como a identidade digital da madeira. Conclui-se que a anatomia da madeira revelou evidências-chave para identificação de espécies tropicais, sendo o parênquima axial a principal peculiaridade diferenciadora. A procura por atender as demandas por mecanismos de verificação, apresentamos a Smart Timber ID, documento digital que traz informações relevantes sobre as espécies e fornece transparência para o varejo de madeira. Espera-se que a implantação da identidade digital promova a sustentabilidade do mercado de madeiras tropicais e seja o ponto de partida para o comércio exterior, uma vez que o mercado de exportação exige documentação com certificação de rastreabilidade do produto de origem florestal.

Palavras-chave: Mercado madeireiro. Espécies ameaçadas. Madeiras amazônicas. Anatomia da madeira. Parênquima axial. Rastreabilidade da madeira. Smart Timber.

ABSTRACT

Making the timber market sustainable has been challenging, government efforts to combat illegality consist of promoting laws, using documents and systems to control the origin products, however, such practices are vulnerable, since fraud in trade related to misidentification of products and the trade of endangered species occur frequently in the Brazil. Therefore, the objective of this study was to identify native wood sold at retail and report key evidence in the wood that determines the traceable identity of the wood. The samples used in this work were provided by companies in Parauapebas, state of Pará. They were identified only by the commercial name of the North region, were sectioned and prepared for anatomical identification. Images were obtained from the cross-section and longitudinal tangential section using a digital magnifying glass attached to a Smartphone. From the detailed evaluation of the wood and a study of specific literature, the striking anatomical patterns of the species, the conservation status and the main uses of the wood were reported. Subsequently, a digital identity prototype was generated for the wood and an identification key for the species studied. Eight native woods were identified, among them, three are at some risk of extinction, *Apuleia leiocarpa*, *Bertholletia excelsa* and *Dipteryx odorata*. In addition to these species, we identified other valued woods such as *Astronium lecointei*, *Diploptropis* sp., *Chrysophyllum* sp., *Hymenaea* sp. and *Hymenolobium petraeum*. Analyzing the commercial nomenclature, a problem was detected for the threatened species *Apuleia leiocarpa*, it is traded as amarelão in the North, but in the Southeast it can be found as garapa or garapeira. Among the anatomical structures analyzed, the type of axial parenchyma was able to differentiate all tropical woods, this “fingerprint” demonstrated the potential to be one of the identify bases within a verification system based in wood anatomy, such as the digital wood ID. It is concluded that the wood anatomy revealed key evidence for the tropical species identification, with the axial parenchyma being the main differentiating peculiarity. Looking to meet the demands for verification mechanisms, we present Smart Timber ID, a digital document that provides relevant information about species and provides transparency for timber retail. It is expected that the validation of this digital identity will promote the sustainability of the tropical wood market and be the starting point for foreign trade, since the export market requires documentation with traceability certification of the product of forest origin.

Keywords: Timber market; Endangered species; Amazonian woods; Wood anatomy; Axial parenchyma; Wood traceability; Smart Timber.

INTRODUÇÃO

Os produtos de origem florestal estão entre os recursos renováveis mais utilizados pela humanidade, contudo, esses suprimentos não são inesgotáveis. Enquanto isso, o avanço do desmatamento tem sido enorme problema ambiental, causando a redução de biodiversidade, destruição de habitats, empurrando espécies para extinção e alterando a dinâmica do clima e do solo (GASSON et al., 2021).

A produção, o consumo e o comércio de recursos florestais estão entre as metas globais para conservação da Flora do Brasil (SCARANO; SILVA, 2018). Mas, a exploração madeireira ilegal contribui para o desmatamento e ameaça a biodiversidade. Os esforços regulamentares praticados atualmente melhoraram a detecção de algumas formas de exploração madeireira ilegal, mas são vulneráveis a métodos mais sutis que mascaram a origem da madeira ilegal (BRANCALION et al., 2018).

Alguns mercados importadores de madeira, como a União Europeia, os Estados Unidos da América e a China, estabeleceram regulamentos que exigem que os operadores vendam apenas produtos à base de madeira que sejam adquiridos e processados de acordo com as leis locais. Os laudos usados na alfândega, baseados na Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies Silvestres Ameaçadas de Extinção (CITES) ou outra documentação comercial oficial exigem que declare com precisão a origem geográfica, espécie de árvore e, em alguns casos, idade de um produto à base de madeira (VAN BRUSSELEN; CRAMM; TEGEGNE, 2023).

Embora sejam boas práticas, a realidade da maioria dos mercados é outra, frequentemente produtos madeireiros feitos a partir da extração ilegal são vendidos com preço baixo, diminuindo o valor dos produtos legais, conduzindo ainda mais o mercado global de madeira para a colheita ilegal e não manejada (WIEDENHOEFT et al. 2019).

A correta identificação das espécies é de fundamental importância para que a madeira possa ser utilizada de acordo com a finalidade a que se destina. Portanto, é de comum interesse que qualquer pessoa que compre, venda, utilize ou controle o comércio desta matéria-prima, saiba a origem desse material (ANDRADE et al., 2021).

Infelizmente, tanto a certificação quanto a verificação da legalidade favorecem grandes produtores e cadeias de suprimentos concentradas destinadas a mercados externos (por exemplo, celulose e papel e madeira serrada tropical de alto valor), enquanto extensos requisitos legais inibem a captura local de benefícios. Para impedir que os meios de governança florestal

ultrapassem seus fins geralmente declarados (manejo florestal sustentável e bem-estar local), é necessário priorizar a geração de benefício local a partir de sistemas de produção adaptados localmente (MCDERMONTT et al., 2015).

Oportunidades de melhoria na transparência no comércio madeireiro podem ser implementadas por meio da verificação científica, isso pode ocorrer em diferentes estágios da cadeia de suprimentos, desde o corte da árvore até nos pontos finais de comercialização (LOWE et al. 2016).

As tecnologias de identificação têm potencial de aplicação tanto para o setor privado como para autoridades governamentais. As autoridades governamentais têm a tarefa de monitorar o cumprimento da lei por parte dos operadores econômicos e da aplicação da lei em caso de irregularidades. Contudo, as soluções precisam ser práticas quanto possível, uma vez que a madeira passa por uma complexa cadeia de suprimentos antes de chegar no consumidor (VAN BRUSSELEN; CRAMM; TEGEGNE, 2023).

Vários métodos científicos foram desenvolvidos de forma independente com o potencial para fornecer as informações de identificação necessárias, mas pouca atenção tem sido dada a como essas ferramentas podem ser aplicadas sinergicamente para apoiar o comércio legal de madeira. É necessário integrar métodos de identificação e tecnologias disponíveis para combater o comércio ilegal de madeiras (DORMONTT et al., 2015).

Dentre as diferentes metodologias de identificação, a anatomia da madeira segue como método mais difundido (LOW et al., 2022) e apresenta alto grau de confiabilidade científica (GASSON et al. 2021; RUFFINATO et al. 2015). Essa técnica já contribuiu para denunciar diversas fraudes e/ou crimes ambientais que acontecem no comércio (NASCIMENTO et al., 2017; DUARTE et al., 2020; BRAGA JR et al., 2020; DUARTE et al., 2021; FERREIRA et al., 2021; FERREIRA et al., 2023).

Em sua essência, a caracterização anatômica realizada tradicionalmente na triagem comercial pode revelar padrões-chave que confirmam a identidade da madeira. Na prática, cada família, tribo taxonômica ou espécie madeireira detém uma peculiaridade, similar a uma “digital” que expressa a sua identificação real. Embora, esse conhecimento específico seja restrito aos experts e dificilmente é compartilhado com o público interessado, como o empresário do varejo de madeiras e o usuário final do produto.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi identificar algumas madeiras nativas comercializadas no varejo a partir de padrões anatômicos macroscópicos. Baseado na revisão de literatura, esperamos identificar 80% das madeiras coletadas no trabalho por meio do

reconhecimento desses padrões-chave, tal como o arranjo de parênquima axial predominante no lenho. Consoante a isso, buscamos desenvolver um mecanismo ágil de identificação de espécies, dessa forma, disponibilizamos neste manuscrito um modelo de identidade digital da madeira. Esse documento pode incorporar o conhecimento tradicional referente à identificação anatômica, juntamente com as informações relevantes de rastreabilidade, facilitando assim a caracterização do produto no varejo.

MATERIAL E MÉTODOS

Seleção das madeiras nativas

Para a realização deste estudo foram obtidas amostras de oito madeiras tropicais do Brasil (Tabela 1) identificadas e agrupadas apenas pelo nome comercial, essas amostras são oriundas de inspeções de rotina em estabelecimentos comerciais da região de Parauapebas, estado do Pará.

Tabela 1 Lista de madeiras selecionadas para este estudo.

Código	Nome comercial	Número de amostras
1	amarelão	5
2	muiracatiara	10
3	castanheira	9
4	sucupira	8
5	goiabão	9
6	cumaru	10
7	jatobá	10
8	angelim	12

As amostras foram trazidas para o Departamento de Ciências Florestais (DCF) na Universidade Federal de Lavras – UFLA, estado de Minas Gerais, sendo mantidas em laboratório para permitir a secagem natural. O critério de escolha das madeiras inclui: (i) madeiras amplamente usadas na cadeia florestal brasileira, (ii) falta de informações na literatura sobre a identificação de madeiras com potencial de substituição a madeiras valorizadas e utilizadas na construção civil, (iii) espécies ameaçadas e/ou protegidas por lei que podem ter

aparência semelhante de espécies nativas do Brasil e que são comercializadas por nomes similares.

Preparação das amostras, análise macroscópica e identificação da madeira

As amostras foram usinadas e transformadas em corpos de prova prismáticos com dimensões nominais de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm (largura, espessura e comprimento, respectivamente), bem orientadas nas seções transversal, longitudinal radial e tangencial.

Para melhorar a observação dos caracteres anatômicos realizou-se o polimento das seções transversal (X) e longitudinal tangencial (T) das amostras com lixas a base d'água, conforme método proposto por Barbosa et al. (2021).

As peculiaridades anatômicas foram avaliadas a partir da perspectiva macroscópica. A escolha das seções transversal e longitudinal tangencial para a identificação de madeira é graças a agilidade que o perito identificador alcança assim que a triagem macroscópica é iniciada nas duas faces (DUARTE et al., 2021).

Após o preparo dos corpos de prova registraram-se as fotomacrografias nos planos escolhidos X e T. Para obter as imagens foi necessário acoplar uma lente macro de 24 vezes iluminada, modelo WIDK-24X01 (disponível em www.xylorix.com) a um Smartphone modelo Apple Iphone 11, versão iOS 17.0.3. As configurações na câmera foram mantidas no automático, as imagens macroscópicas foram produzidas com resolução de 3024 × 4032 pixels e 8 bits (256 níveis de cinza).

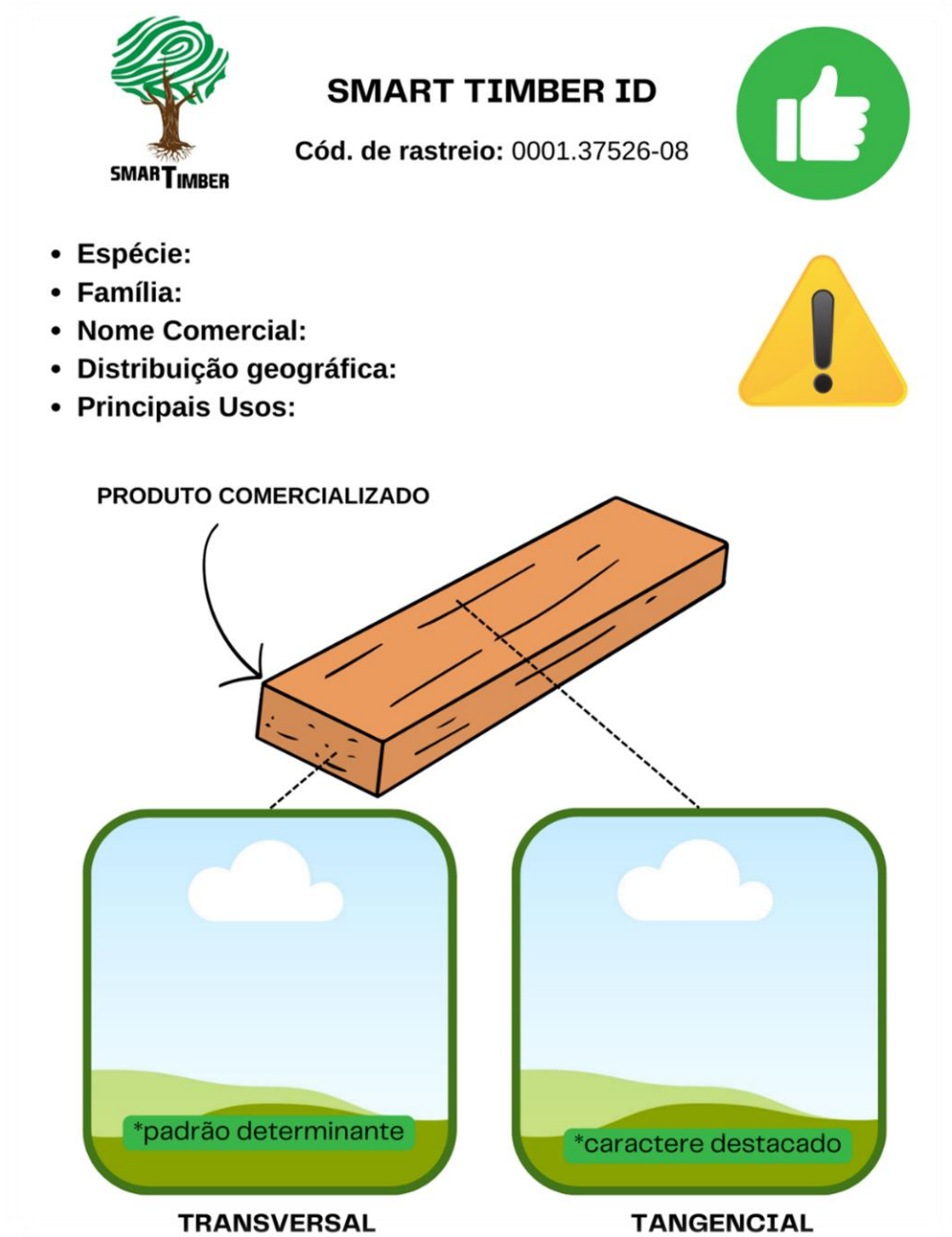
O processo de identificação seguiu as diretrizes da Norma de Procedimentos em Estudos de Anatomia de Madeira: I – Angiospermae, proposta por Coradin e Muñiz (1992). Os nomes comerciais mais apropriados e os biomas de ocorrência foram mencionados conforme a Flora e Funga do Brasil (2023), também incluímos o status de conservação (MMA, 2014; CITES, 2023) e os principais usos das madeiras (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO – IPT, 2013; SANTINI JR, FLORSHEIM; TOMMASIELLO FILHO, 2021).

Posteriormente à triagem de identificação, gerou-se uma chave de identificação das oito madeiras tropicais. Essa ferramenta auxiliar foi construída com base nos padrões determinantes para distinção dos táxons analisados, sobretudo, os caracteres anatômicos e as características sensoriais das amostras de madeira analisadas nesse trabalho.

Desenvolvimento da identidade digital e chave de identificação das madeiras

A primeira versão da identidade digital para madeiras no varejo, denominada Smart Timber ID, fornece informações tecnológicas e padrões na madeira determinantes para a identificação de espécies tropicais. O protótipo foi desenvolvido no software Canva.com, possui interface amigável e contém recursos visuais interativos, informações taxonômicas, dados rastreáveis e de uso da matéria-prima (figura 1).

Figura 1. Smart Timber ID: protótipo digital de identidade da madeira



Fonte: do autor (2023)

Diversos ícones informativos do Canva foram utilizados no protótipo de identidade da madeira para referir-se tanto ao produto comercializado, como para o status de conservação atual de acordo com o MMA (2014). Além disso, o documento digital deve possuir um lastro de rastreabilidade com um número serial aleatório abaixo do nome Smart Timber ID (FIGURA 2).

Figura 2. Ícones da identidade digital Smart Timber ID, contendo o status de conservação e o tipo de produto comercializado no varejo.



Fonte: do autor (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espécies identificadas pela anatomia da madeira e o uso de nomes comerciais

A partir das amostras analisadas, oito madeiras nativas foram identificadas a partir da investigação das características organolépticas e análise macroscópica. A relação das madeiras nativas está apresentada na tabela 1, em ordem alfabética, com o nome científico, a família botânica, o nome comercial mais indicado para o Sudeste do Brasil e o status de conservação de acordo com a lista de espécies ameaçadas do País (MMA, 2014).

Tabela 1. Madeiras nativas identificadas oriundas da região Amazônica.

Código	Espécie	Família	Nome comum	Categoria*
1	<i>Apuleia leiocarpa</i> (J. Vogel) J. F. Macbr	Fabaceae	garapeira	VU
2	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Anacardiaceae	muiracatiara	
3	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Lecythidaceae	castanheira	VU
4	<i>Diploptropis</i> sp. Benth.	Fabaceae	sucupira	
5	<i>Chrysophyllum</i> sp. L.	Sapotaceae	goiabão	
6	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Forsyth f.	Fabaceae	cumarú	
7	<i>Hymenaea</i> sp. L.	Fabaceae	jatobá	
8	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	Fabaceae	angelim	

*Espécies ameaçadas conforme categorias estabelecidas pela MMA Portaria número 443 em 17 de Dezembro, 2014 (MMA, 2014). VU vulnerável.

Os nossos resultados apontam que as madeiras identificadas na tabela 1 são comumente encontradas no Brasil e vendidas após o beneficiamento para diversos usos e aplicações no mercado interno e para exportação. As madeiras pertencem a 4 famílias distintas, sendo que 62,5% dos táxons fazem parte da família Fabaceae, as outras famílias representadas foram Anacardiaceae, Lecythidaceae e Sapotaceae, cada uma dessas com um táxon representante.

No contexto das florestas tropicais do Brasil, todas as madeiras encontradas ocorrem naturalmente na Amazônia (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023), representadas por família,

nomes científico e comum, os táxons são os seguintes: 1) Fabaceae: *Apuleia leiocarpa* – garapa; *Diploptropis* sp. – sucupira; *Dipteryx odorata* – cumaru; *Hymenaea* sp. – jatobá e *Hymenolobium petraeum* – angelim-pedra; 2) Anacardiaceae: *Astronium lecointei* – muiracatiara; 3) Lecythidaceae: *Bertholletia excelsa* – castanheira; 4) Sapotaceae: *Chrysophyllum* sp. – goiabão.

A região sudeste é maior consumidora de madeira nativa do País (LENTINI et al., 2022), com exceção da espécie *Bertholletia excelsa*, todas as madeiras identificadas foram relatadas no comércio do estado de São Paulo (SANTINI JR, FLORSHEIM; TOMMASIELLO FILHO, 2021). Já no estado do Rio de Janeiro, das dez madeiras identificadas neste trabalho, apenas *Chrysophyllum* sp. não foi mencionada por Nascimento et al. (2017). No mercado de Minas Gerais, a espécie madeireira *Bertholletia excelsa* ocorre com menos frequência (DUARTE, 2018; DUARTE et al., 2021). Braga Junior et al. (2020), constataram que essa espécie é usada para fabricação de embarcações e estavam sendo comercializadas ilegalmente no sul do estado do Pará.

Dentre as espécies identificadas, duas estão listadas como espécies ameaçadas no Brasil, *Apuleia leiocarpa* e *Bertholletia excelsa* (MMA, 2014). No ano de 2023, o táxon *Dipteryx odorata* foi listado no Apêndice II da CITES, ou seja, ainda não correm perigo de extinção, mas tem o comércio internacional regulamentado (CITES, 2023).

Pela análise da nomenclatura comercial, alguns problemas foram detectados e podem significar erros na comercialização, tais como: *A. Leiocarpa* que foi coletada como amarelão, nome regionalmente dado no norte do País, porém, na região sudeste essa espécie madeireira é vendida como garapa ou garapeira.

É de suma importância, que a padronização da nomenclatura e as definições de caracteres seja um primeiro passo crítico para expandir a facilidade de uso, a relevância prática e a eficácia da identificação macroscópica da madeira como um instrumento de diagnóstico dentro e fora dos limites do campo tradicional (RUFFINATTO et al. 2015).

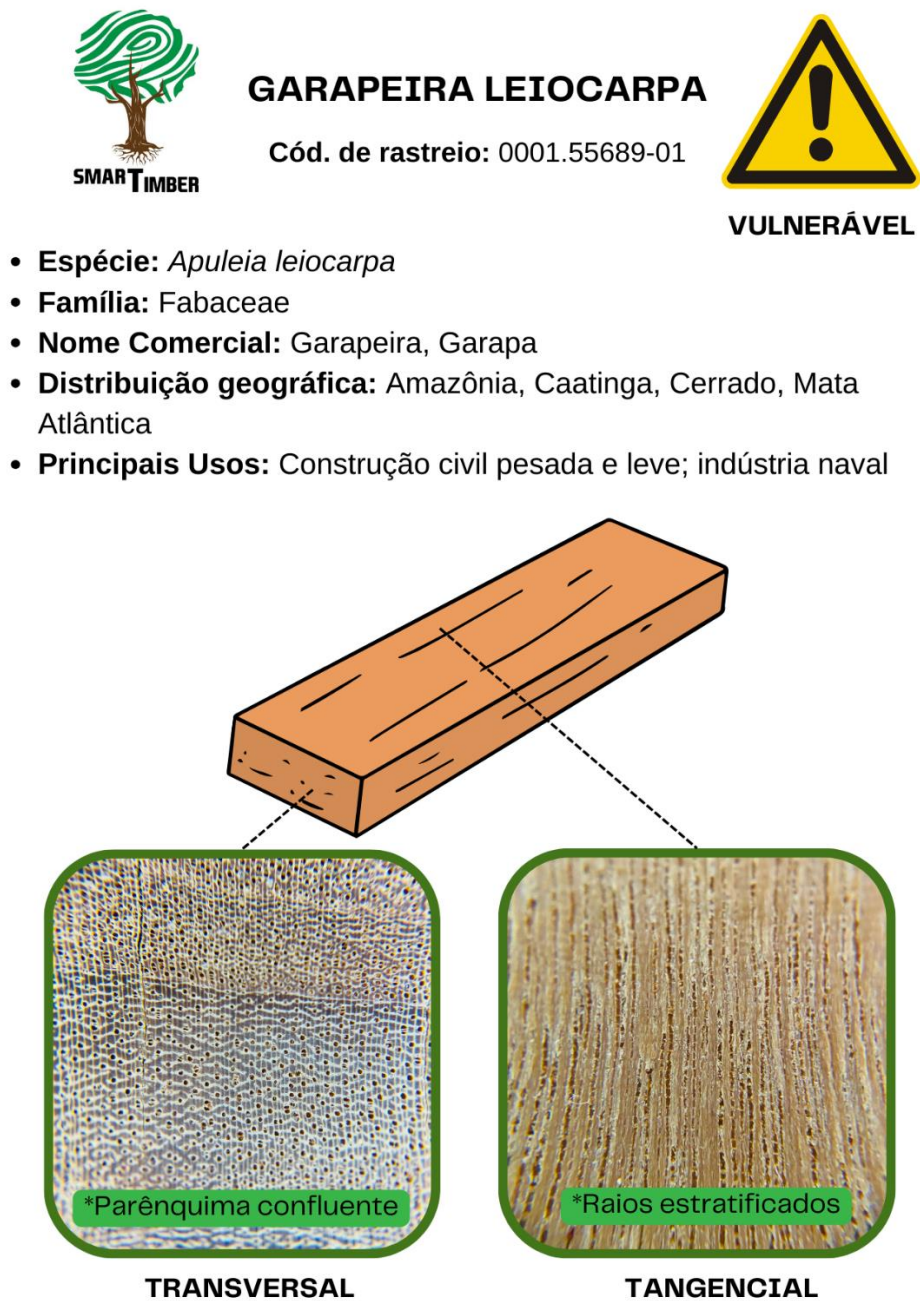
Identidade digital da madeira nativa

Nesse tópico disponibilizamos a identidade digital proposta para os táxons identificados e a digital macroscópica da seção transversal e longitudinal tangencial.

Apuleia leiocarpa é uma árvore nativa de ampla distribuição geográfica no País, apesar de ser uma espécie vulnerável (MMA, 2014), está na quinta posição entre as madeiras mais empregadas no País (LENTINI et al., 2022) utilizada principalmente na construção civil

(NASCIMENTO et al. 2017) e na indústria naval (BRAGA JUNIOR et al., 2020). A figura 3 apresenta a identidade dessa madeira ameaçada.

Figura 3. Identidade digital da madeira tropical *Apuleia leiocarpa*.



Fonte: do autor (2023).

A madeira de *A. leiocarpa* apresenta coloração amarela clara, para identificá-la o especialista deve observar os padrões de parênquima axial confluyente, presença de tiloses bem destacados e a estratificação, regular, de raios como peculiaridades reveladoras da espécie (Fig.

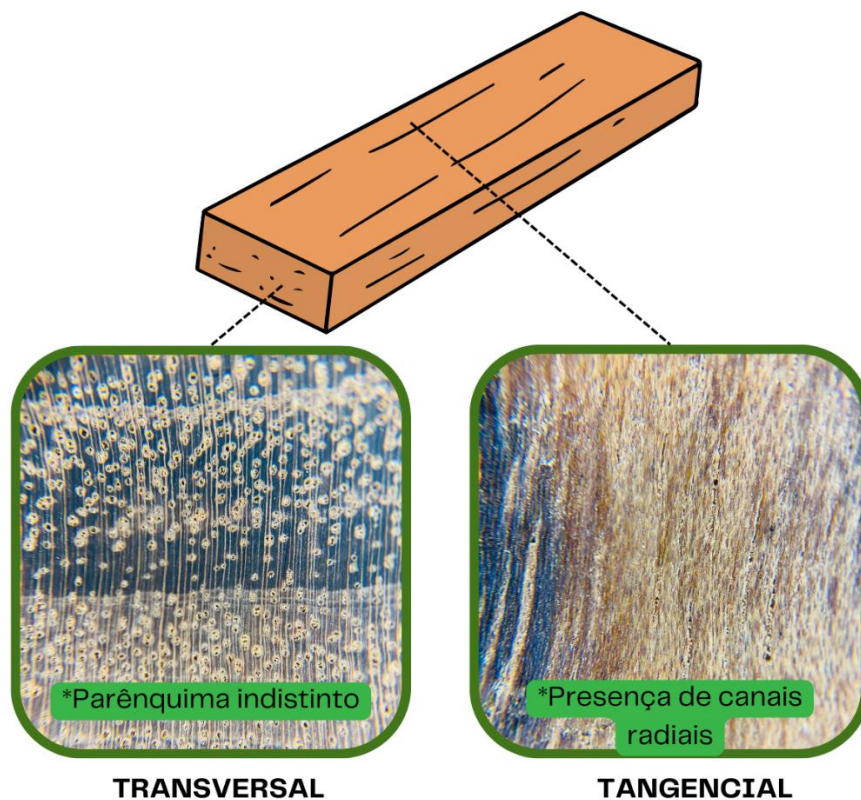
3), tais descrições semelhantes também foram relatadas por outros autores (BRANDES et al., 2020; BRAGA JUNIOR et al., 2020).

Astronium lecointei é uma madeira de rara beleza, possui rajados naturais característicos, conhecida por muiracatiara, seu nome vem do tupi-guarani e significa madeira – ‘muira’; rajada – ‘catiara’. A figura 4 apresenta a identidade dessa madeira.

Figura 4. Identidade digital da madeira tropical *Astronium lecointei*.



- **Espécie:** *Astronium lecointei*
- **Família:** Anacardiaceae
- **Nome Comercial:** Muiracatiara
- **Distribuição geográfica:** Amazônia
- **Principais Usos:** Construção civil e mobiliário



Fonte: do autor (2023).

A ausência ou a falta de visibilidade do parênquima axial pode auxiliar na triagem de identificação, eliminando madeiras com parênquima marcante. Em *A. Lecointei* esse tecido é indistinto mesmo com lente de aumento, além disso, a madeira tem anéis de crescimento bem demarcados por zonas fibrosas enegrecidas e canais secretores radiais presentes, caractere comum na maioria das Anacardiaceae (DUARTE et al., 2021).

De origem Amazônica, a castanheira, nome popular da *Bertholletia excelsa* é a espécie de Lecythidaceae de maior importância econômica (MORI; PRANCE, 1990) e é protegida por lei (MMA, 2014). A identidade digital dessa espécie encontra-se na Fig. 5.

Figura 5. Identidade digital da madeira tropical *Bertholletia excelsa*.



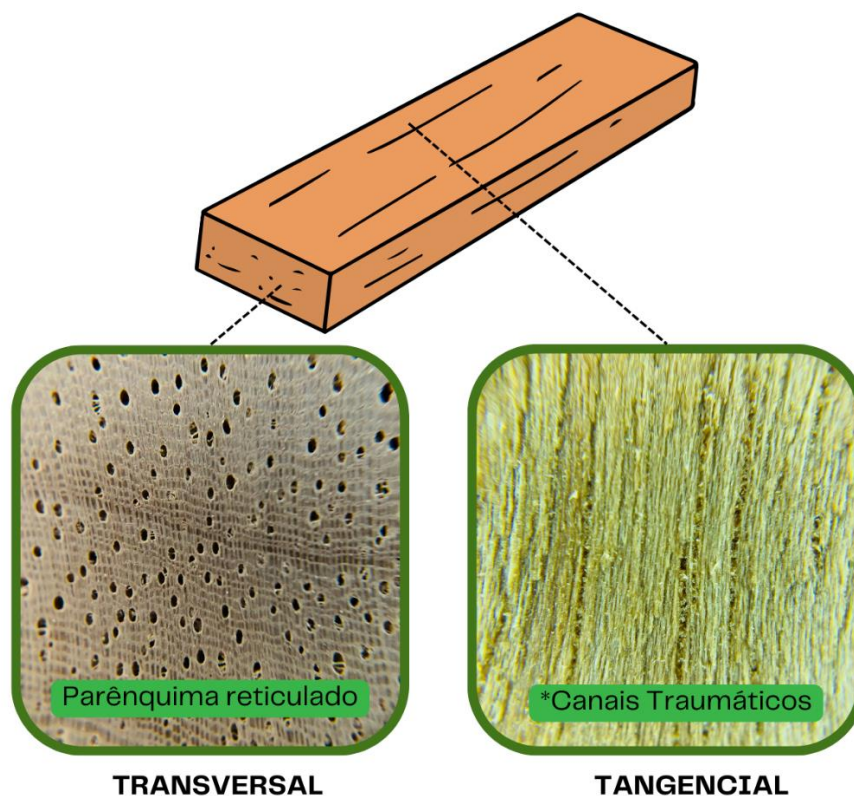
CASTANHEIRA EXCELSA

Cód. de rastreio: 0001.99987-71



VULNERÁVEL

- **Espécie:** *Bertholletia excelsa*
- **Família:** Lecythidaceae
- **Nome Comercial:** Castanheira
- **Distribuição geográfica:** Amazônia
- **Principais Usos:** Construção civil leve e Indústria naval



Fonte: do autor (2023).

B. excelsa é uma espécie madeireira tradicionalmente usada para fabricação de embarcações no Norte do País, ela possui parênquima axial reticulado e tiloses na região de cerne (BRAGA JUNIOR et al. 2020) e importante material histórico cultural para os povos indígenas (SANTOS et al., 2022). Contudo, o uso dessa espécie no mercado requer atenção, uma vez que, ela encontra-se em status de conservação vulnerável no Brasil (MMA, 2014).

Diploptropis sp. conhecida por sucupira é uma das madeiras mais tradicionais para a fabricação de móveis no País, tal gênero ocorre naturalmente na Amazônia e Mata Atlântica. A figura 6 mostra a identidade digital de *Diploptropis* sp.

Figura 6. Identidade digital madeira tropical *Diploptropis* sp..

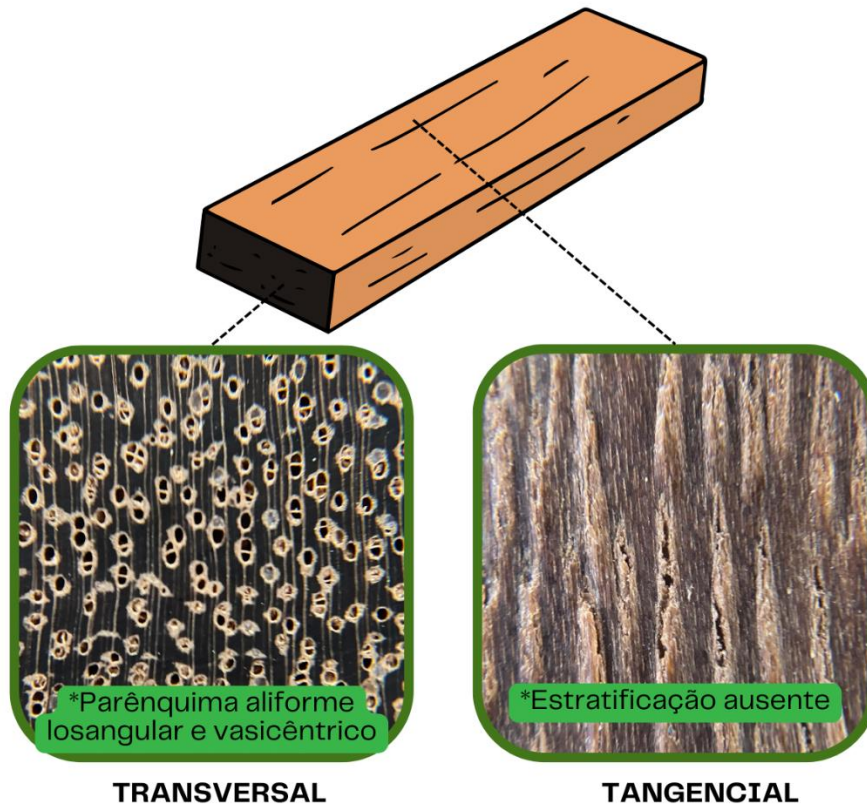


SUCUPIRA DIPLOPTROPIS

Cód. de rastreio: 0006.25698-19



- **Espécie:** *Diploptropis* sp.
- **Família:** Fabaceae
- **Nome Comercial:** Sucupira
- **Distribuição geográfica:** Amazônia, Mata Atlântica
- **Principais Usos:** Construção civil, acabamento interno e mobiliário



Fonte: do autor (2023).

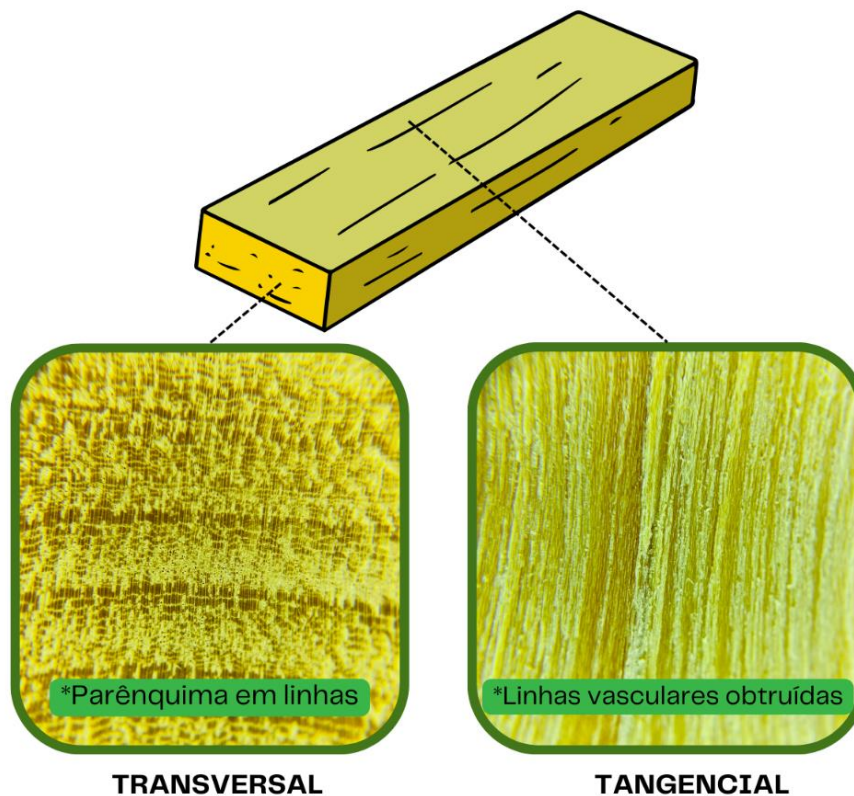
Existem dois gêneros de leguminosas comumente vendidas como Sucupira: *Bowdichia* Kunth e *Diploptropis* Benth., ambos são idênticos à primeira vista, com características sensoriais similares, entretanto, *Bowdichia* possui estratificação dos raios, enquanto *Diploptropis* não tem esse arranjo estratificado (SANTINI JUNIOR, 2013), nesse trabalho coletou-se a madeira sem estratificação de raios, como o de *Diploptropis* sp.

A madeira de *Chrysophyllum* sp. pertencente à família Sapotaceae tem ampla distribuição pelo País. Ela é empregada na construção civil e na fabricação de móveis de baixo custo (SANTINI JR, FLORSHEIM; TOMMASIELLO FILHO, 2021). A figura 7 mostra a identidade digital de *Chrysophyllum* sp.

Figura 7. Identidade digital madeira tropical *Chrysophyllum* sp.



- **Espécie:** *Chrysophyllum* sp.
- **Família:** Sapotaceae
- **Nome Comercial:** Sucupira
- **Distribuição geográfica:** Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa, Pantanal
- **Principais Usos:** Construção civil e mobiliário



Fonte: do autor (2023).

Identificar as madeiras da família Sapotaceae é desafiador, devido as similaridades anatômicas que acontecem entre as espécies, como os vasos em cadeias radiais e parênquima axial em linhas aproximadas (CORADIN et al., 2010); essas características também foram encontradas na amostra coletada. Essa madeira também ocorre no comércio de Minas Gerais como Guajará, contudo, esse nome deve ser evitado devido a miscelânea de madeiras agrupadas por esse nome (DUARTE et al., 2020).

O gênero *Dipteryx* está em oitava no ranking de madeiras mais comercializadas do Brasil (LENTINI et al., 2022) e valorizadas, principalmente para construção civil interna e pisos de decks. A figura 8 apresenta a identidade digital de *Dipteryx odorata*.

Figura 8. Identidade digital madeira tropical *Dipteryx odorata*.



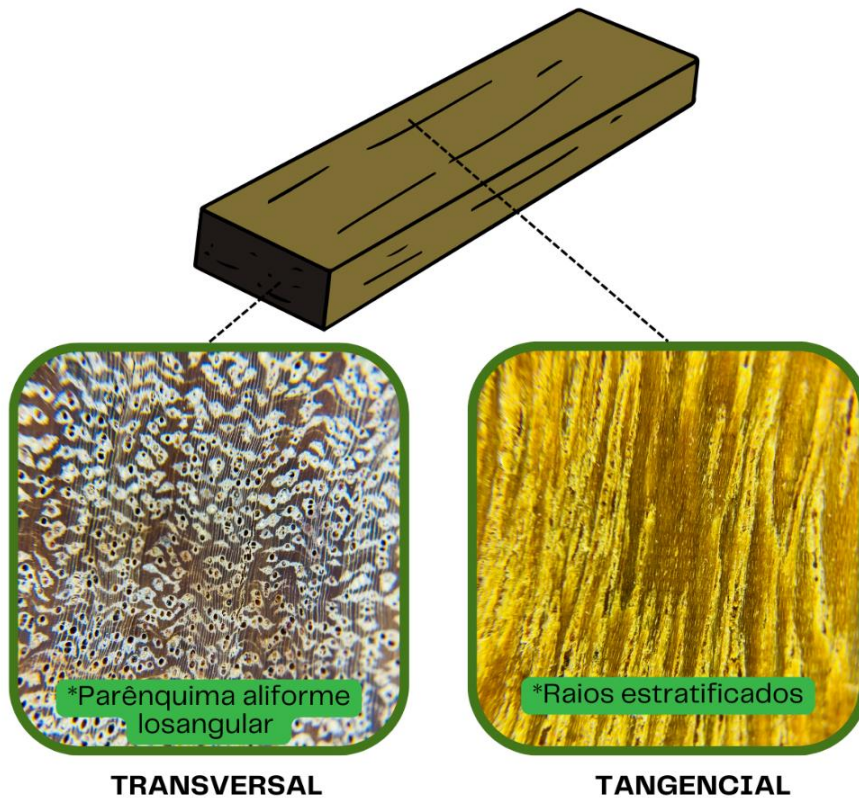
CUMARU ODORATA

Cód. de rastreio: 0004.33364-74



VULNERÁVEL

- **Espécie:** *Dipteryx odorata*
- **Família:** Fabaceae
- **Nome Comercial:** Cumaru
- **Distribuição geográfica:** Amazônia
- **Principais Usos:** Construção civil, decks e dormentes



Fonte: do autor (2023).

Dipteryx odorata é uma madeira muito dura ao corte, apresenta aspecto fibroso atenuado, causado pelo contraste entre as fibras e o tecido parenquimático. Os raios são

nitidamente estratificados e o parênquima axial é o aliforme losangular. Devido a exploração intensa ao gênero *Dipteryx*, essa madeira foi listada e está com comércio temporariamente regulamentado pela CITES (2023).

A madeira de Jatobá é pesada, possui coloração avermelhada e pode ser agrupada com outras espécies nativas (DUARTE et al., 2021). Contudo, ela pode ser identificada de maneira ágil observando o padrão de parênquima axial do tipo marginal e a porosidade difusa no lenho. A figura 9 apresenta a identidade digital de ade digital de *Hymenaea* sp.

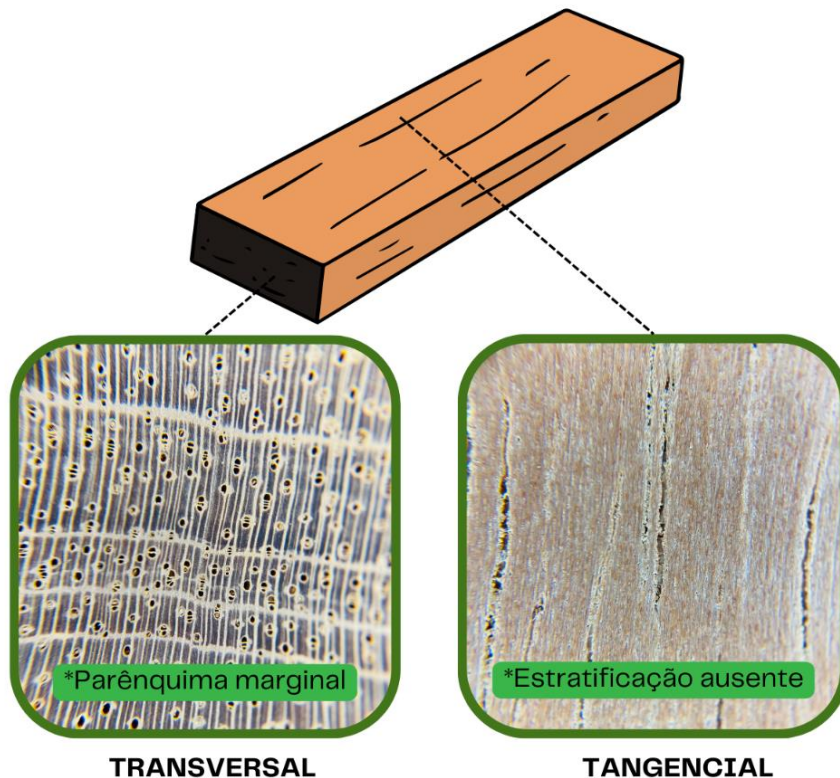
Figura 9. Identidade digital da madeira tropical *Hymenaea* sp.



JATOBÁ HYMENAEA
Cód. de rastreio: 0010.55587-02



- **Espécie:** *Hymenaea* sp.
- **Família:** Fabaceae
- **Nome Comercial:** Jatobá
- **Distribuição geográfica:** Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal
- **Principais Usos:** Construção civil, dormentes e mobiliário



Fonte: do autor (2023).

Hymenaea sp. é bem valorizada no comércio, este gênero está na lista das principais madeiras brasileiras utilizadas, representando 3,1% do total de volume produzido de produtos madeireiros. Também vale destacar na lista, a espécie *Hymenolobium petraeum*, o Angelim-pedra. Essa, está em quarto lugar entre as madeiras mais usadas, atingindo 6,8% do volume total de produtos madeireiros gerados (LENTINI et al., 2022). A figura 10 apresenta a identidade digital *Hymenolobium petraeum*.

Figura 10. Identidade digital da madeira tropical *Hymenolobium petraeum*

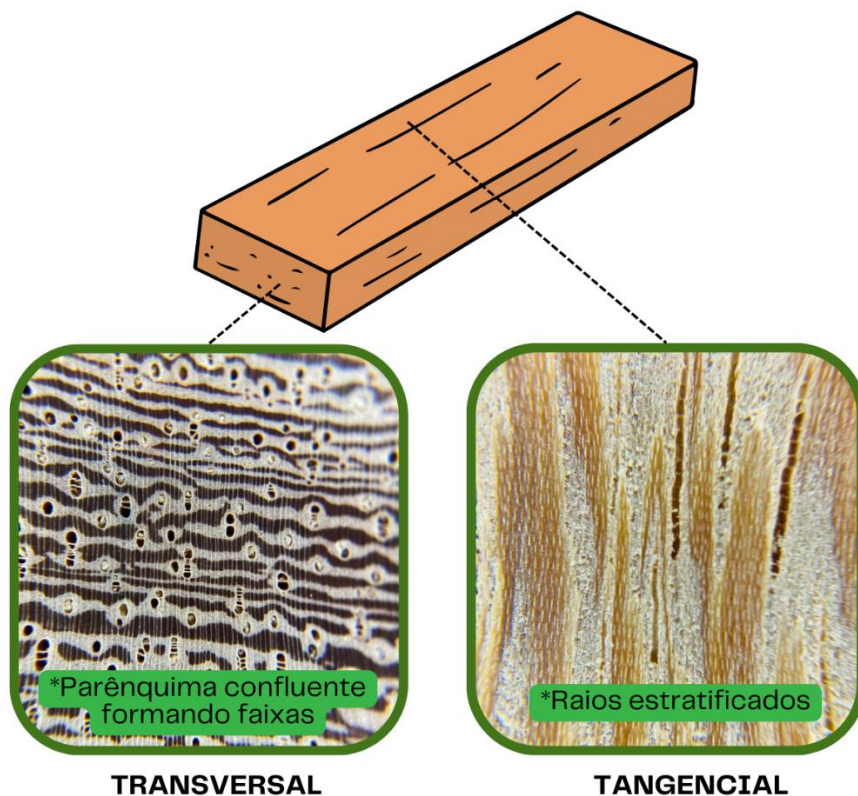


ANGELIM PETRAEUM

Cód. de rastreio: 0001.37526-08



- **Espécie:** *Hymenolobium petraeum*
- **Família:** Fabaceae
- **Nome Comercial:** Angelim-pedra
- **Distribuição geográfica:** Amazônia
- **Principais Usos:** marcenaria, construção civil e construção naval



Fonte: do autor (2023).

A madeira de *H. petraeum* possui textura grossa e aspecto fibroso destacado que forma os desenhos únicos na face tangencial. O parênquima axial confluyente é bem contrastado nessa espécie, observado mesmo sem lupa de aumento, além disso, na face tangencial é possível observar estratificação de raios de maneira irregular. De acordo com Ferreira e Hopkins (2004), a identificação do angelim é bem complexa, são 97 táxons de 17 famílias botânicas distintas agrupadas como angelim.

Os resultados obtidos sustentam a hipótese inicial de que o parênquima axial seja determinante para identificar espécies tropicais. As diferentes tipologias de parênquima axial segregaram os oito táxons estudados, alguns trabalhos com espécies tropicais ressaltaram a importância de reconhecer esse atributo durante a identificação de madeiras (DUARTE et al. 2021; FERREIRA et al., 2023).

Além do parênquima axial, observou-se que a estratificação dos raios também pode ser considerado padrão determinante para diferenciar táxons de Fabaceae, por exemplo *Apuleia leiocarpa*, *Dipteryx odorata* e *Hymenolobium petraeum*. A estratificação dos raios é uma característica chave para identificação de algumas madeiras, sua visualização é feita no plano longitudinal tangencial, os raios possuem o mesmo tamanho e se encontram dispostos um do lado do outro (ZENID; CECCANTINI, 2012; DUARTE et al. 2021). De acordo com Angyalossy, Amano e Alves (2005), em madeiras estratificadas, os elementos celulares do lenho estão organizados formando faixas horizontais regulares ou estratos, dando o efeito visual de listrado da estratificação.

Dentre as madeiras analisadas, identificou-se três que possuem algum tipo de restrição quanto ao comércio, *Bertholletia excelsa* (Lecythidaceae), *Apuleia leiocarpa* e *Dipteryx odorata* (ambas Fabaceae). A primeira delas, a castanheira excelsa é uma árvore de relevante importância socioeconômica na região Amazônica, embora seja protegida por força de lei (MMA, 2014), ela ainda tem sido comercializada ilegalmente e utilizada na fabricação de embarcações na região Norte (BRAGA JR et al., 2020). As madeiras mais recentes a integrar as listas de regulamentação da CITES no ano de 2023 pertencem ao gênero *Dipteryx*, também conhecidas por cumaru ou baru, essa madeira está entre as dez mais comercializadas no País (LENTINI et al., 2022), o exemplar identificado foi a espécie *Dipteryx odorata*, apesar dessa nova ordenação internacional, no mercado interno brasileiro é possível achar com certa facilidade essa madeira serrada, sobretudo para pisos para decks e outros tipos de peças serradas. A espécie *Apuleia leiocarpa* também é protegida pela instrução normativa do MMA (2014), incluída como vulnerável, contudo, ela está entre as cinco madeiras mais procuradas no

país (LENTINI et al., 2022), principalmente para uso na construção civil (NASCIMENTO et al., 2017), assim como para a indústria naval (BRAGA JR. et al., 2020). O nome comercial empregado para *A. leiocarpa* no norte do País é amarelão, já no Sudeste podemos encontrá-la como garapa ou garapeira (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023), esse achado representa certa preocupação para compradores de madeira e deve alertar os fiscais de linha de frente. A introdução de nomes comerciais não favorece a sustentabilidade do mercado madeireiro, dessa forma, sugerimos a adoção do nome garapa leiocarpa para essa espécie como medida de conservação, uma vez que ela se encontra em status vulnerável.

Os principais erros cometidos na identificação de madeiras acontecem devido às inúmeros nomes populares e comerciais que dificultam a fiscalização pelos órgãos responsáveis (HERMANSON; WIEDENHOEFT, 2011). Embora a substituição do nome comercial seja uma solução que mitigaria parte dos problemas e fraudes na comercialização, a adoção do nome botânico não emplacou no mercado (GASSON et al., 2021). Pensando em resolver este problema dos nomes populares, introduzimos na identidade Smart Timber ID uma sugestão de nome comercial que integra o nome tradicional junto a nomenclatura taxonômica.

Oportunidades de melhoria na transparência do mercado podem ser implementadas por meio da ciência aplicada em alguns pontos da cadeia de abastecimento, como na classificação nos pontos finais do varejo (LOWE et al. 2016). No Brasil, os esforços focados na cadeia de suprimentos de madeira, incluindo certificação e verificação legal da madeira comercializada, foram limitados pela natureza fragmentada da produção de madeira da Amazônia (MCDERMONTT et al., 2015).

A cadeia de suprimentos da madeira é complexa, uma vez que as árvores são colhidas num local e transportadas por um, dois ou mais regiões e/ou países antes de se transformarem em produtos beneficiados, como móveis, pisos ou papel. Em todo o caso, há a necessidade de desenvolver um mecanismo de verificação científica que entregue a certificação e a documentação exigida. Isso significa a verdade de dois atributos fundamentais para autenticação da espécie - origem da árvore colhida e a identidade da madeira – podem permanecer incerta, mesmo quando são realizadas investigações ou aplicadas sistemas de *Due Diligence* (GASSON et al., 2021; VAN BRUSSELEN; CRAMM; TEGEGNE, 2023).

A proposta da identidade digital da madeira apresentada neste trabalho é criar algo útil para a sociedade e ser parte de uma revolução no mercado, trazendo transparência e legalidade para o comércio de madeiras, esse documento digital pode ser emitido para lojas e consumidores preocupados com a transparência da cadeia de suprimentos da madeira, de

maneira a auxiliar compradores e negociadores de produtos madeireiros durante o processo comercial.

Nos próximos anos, esperamos que esse mecanismo seja um aliado ao empreendedor e consumidor de madeira no combate ao comércio ilegal, uma vez que a identidade possa ser emitida após a validação da classificação de um sistema de identificação botânica, como o Smart Timber System ®. A primeira versão conta com informações que atestam a identidade correta da madeira, informações botânicas das espécies, status de conservação de acordo com MMA (2014) e CITES (2023) e os principais usos da madeira para o consumidor final, contudo, nada impede que outros documentos como o DOF e dados relacionados a devida diligência sejam integrados a identidade digital Smart Timber ID. Antes disso, precisamos validar na prática uma Prova de Conceito (POC) da identidade digital em locais estratégicos como pontos finais de venda ou lojas de varejo madeireiros, trabalhos similares foram realizados por Arévalo et al. (2021) e Ravindran et al. (2021). Por meio das POCs espera-se coletar as percepções sobre a nomenclatura comercial sugerida e investigar se esse documento realmente pode ser a engrenagem que faltava para alcançarmos a sustentabilidade do mercado, principalmente, aqueles que desejam exportar madeiras com documento que ateste a procedência do material. Acreditamos que o mercado internacional pode se beneficiar com todas as informações rastreáveis e agregar ainda mais valor aos produtos madeireiros com a certidão de identidade digital Smart Timber ID.

Chave de identificação das madeiras nativas

A chave dicotômica de identificação de madeiras nativas visa auxiliar fiscais de linha frente e anatomistas no combate ao comércio ilegal de madeiras. Neste estudo, elaborou-se uma chave para classificar as oito madeiras identificadas por meio de padrões na anatomia da madeira e peculiaridades sensoriais das mesmas.

A descrição anatômica da madeira permite que elas sejam agrupadas em grupos taxonômicos com características comuns, após a identificação de cada espécie. Este princípio está subjacente à construção de chaves de identificação das espécies arbóreas tropicais utilizando a estrutura anatômica da madeira e disponíveis na literatura especializada em identificação (SANTINI JR, FLORSHEIM; TOMMASIELLO FILHO, 2021; FERREIRA et al., 2021; FERREIRA et al., 2023).

I Madeiras com parênquima axial distinto sob lente de aumento.

1. Parênquima axial em linhas marginais

- a. Madeira com cerne avermelhado, vasos em porosidade difusa, ausência de obstruções por tiloses..... jatobá hymenaea, *Hymenaea* sp.

2. Parênquima axial em linhas

- a. Madeira com cerne amarelado, camadas de crescimento delimitadas por zonas fibrosas mais escuras e linhas vasculares obstruídas..... goiabão chrysophyllum, *Chrysophyllum* sp.

3. Parênquima axial vasicêntrico

- a. Madeira com cerne enegrecido, aspecto fibroso destacado..... sucupira diplotropis, *Diplotropis* sp.

4. Parênquima axial aliforme losangular

- a. Madeira dura ao corte, com cerne pardacento, aspecto fibroso destacado e presença de raios estratificados – estratificação regular..... cumaru odorata, *Dypterix odorata*.

5. Parênquima axial confluyente

- a. Madeira com cerne pardacento, presença de raios estratificados, sem aspecto fibroso e textura fina garapa leiocarpa, *Apuleia leiocarpa*.
 b. Madeira com cerne pardacento, presença de raios estratificados – estratificação regular, aspecto fibroso destacando figuras na face tangencial e textura grossa..... angelim-petraeum, *Hymenolobium petraeum*.

6. Parênquima axial reticulado

- a. Madeira, com cerne amarelado, presença de tiloses nos vasos, bem como canais axiais traumáticos..... castanheira excelsa, *Bertholletia excelsa*.

7. Parênquima axial pouco distinto sob lente

- a. Camadas de crescimento distintas, delimitadas por zonas fibrosas tangencias enegrecidas, canais radiais presentes..... muiracatiara lecointei, *Astronium lecointei*.

CONCLUSÃO

O campo científico da anatomia da madeira segue contribuindo como metodologia científica de verificação de identidade e auxilia o combate ao comércio ilegal de madeiras. O uso dessa técnica centenária revelou evidências-chave para identificação de oito táxons tropicais comercializados no varejo. Os resultados apontaram que as madeiras tropicais realmente possuem “digitais” no lenho, sendo o tipo de parênquima axial o padrão essencial para segregar espécies. A hipótese inicial foi superada, já que os inúmeros tipos de parênquima axial foram determinantes para identificar oito madeiras tropicais, incluindo espécies de alto valor no mercado e ameaçadas de extinção, como *Apuleia leiocarpa*, *Bertholletia excelsa* e *Dipteryx odorata*. Destacamos ainda que a presença de estratificação de raios foi um padrão determinante para separar táxons da família Fabaceae, *Apuleia leiocarpa*, *Dipteryx odorata* e *Hymenolobium petraeum*. Além dessas madeiras, identificamos nesse trabalho a espécie *Astronium lecointei*, bem como os gêneros *Diploptropis*, *Hymenaea* (ambas Fabaceae) e *Chrysophillum* (Sapotaceae).

Vale ressaltar que este estudo piloto dá um passo importante para a transformação digital na identificação macroscópica, uma vez que esse processo fora realizado usando uma lente de aumento de 24 vezes acoplada a um SmartPhone. A metodologia adotada demonstrou ser prática e permitiu certa agilidade no processo de triagem de madeiras.

Em busca de atender os anseios do mercado internacional de madeiras, apresentamos a primeira versão da identidade da madeira Smart Timber ID, protótipo digital para identificação do produto madeireiro para exportação, esse documento contém informações relevantes para certificação legal de um produto de origem florestal sustentável e entrega várias informações de valor, a classificação taxonômica, status de conservação, usos mais comuns das madeiras, padrões anatômicos determinantes para a verificação de identidade da madeira e um número serial de rastreabilidade de origem.

Novos trabalhos envolvendo a melhoria da identidade digital poderão ser realizados, incluindo a integração deste documento a um sistema de visão computacional para a identificação de madeiras e a inserção do número do DOF na identidade digital. Nesse momento, nosso grupo estuda a possibilidade de implantar e monitorar os efeitos dessa tecnologia no mercado por meio de Provas de Conceito (POCs), para isso, buscamos parcerias estratégicas com entidades governamentais, organizações não governamentais e empresas privadas preocupadas com a conservação das espécies nativas.

AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) por providenciar o material de estudo e a sua infraestrutura. Também agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante a pesquisa (Código financeiro 141553/2019-7).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, B. G.; BASSO, V. M.; LATORRACA, J. V. F. Machine vision for field-level wood identification. **IAWA Journal**, 41(4): 681-698, 2020. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10001>
- ANGYALOSSY, V.; AMANO, E.; ALVES, E. S. Madeiras utilizadas na fabricação de arcos para instrumentos de corda: aspectos anatômicos. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 4, p. 819-834, 2005.
- ARÉVALO, R. et al. Imaged based identification of colombian timbers using the xylotron: A proof of concept international partnership. **Colombia forestal**, v. 24, n. 1, p. 5-16, 2021.
- BARBOSA, A. C. F.; GEROLAMO, C. S.; LIMA, A. C.; ANGYALOSSY, V.; PACE, M. R. Polishing entire stems and roots using sandpaper under water: an alternative method for macroscopic analyses. *Appl Plant Sci*. 9(5): aps3.11421, 2021. <https://doi.org/10.1002/aps3.11421>.
- BRAGA JÚNIOR, M. M. et al. Technological properties of woods used in boat's production in the Southeast of Pará, Brazil. **Rodriguésia**, v. 71, 2020.
- BRANCALION, P. H. S et al. Fake legal logging in the Brazilian Amazon. **Science advances**, v. 4, n. 8, p. eaat1192, 2018.
- BRANDES, A.; NOVELLO, B.; LEMOS, D.; NASCIMENTO, L.B.; ALBUQUERQUE, R.; TAMAIO, N.; BARROS, C. Wood anatomy of endangered Brazilian tree species. **IAWA Journal**, 41(4): 510-576, 2022. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10037>
- CONVENTION ON INTERNATIONAL TRADE OF ENDANGERED SPECIES. (CITES). Disponível em: <www.cites.org>. Acesso em: 20 nov. de 2023.
- CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. **Madeiras comerciais do Brasil**: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais: Brasília, 2010. CD-ROOM. Disponível em:

https://keys.lucidcentral.org/keys/v4/madeiras_comerciais_do_brasil/index_pt.html. Acesso em: 20 nov. 2023.

CORADIN, V. T. R.; MUNIZ, G. I. B. **Normas de procedimentos em estudos de anatomia de madeira: Angiospermae e Gymnospermae**. Brasília: IBAMA, DIRPED, LPF, 1992. 19 p. (Série Técnica, 15).

DORMONTT, E. E; BONER, M; BRAUN, B.; BREULMANN, G.; DEGEN, B.; ESPINOZA, E.; GARDNER, S.; GUILLERY, P.; HERMANSON, J. C.; KOCH, G.; LEE, S. L.; KANASHIRO, M.; RIMBAWANTO, A.; THOMAZ, D.; WIEDENHOEFT, A. C.; YIN, Y.; ZAHNEN, J.; LOWE, A. Forensic timber identification: it's time to integrate disciplines to combat illegal logging. **Biological Conservation**. 191:790–798. 2015.

DOS SANTOS, L. J. et al. Use of wood by indigenous peoples of the Eastern Amazon, Brazil. **IAWA Journal**, v. 43, n. 4, p. 448-468, 2022.

DUARTE, P. J. **Caracterização anatômica das principais madeiras comercializadas na região de Lavras/MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – UFLA, Lavras. 2018. 80p.

DUARTE, P. J.; BORGES, C.C.; FERREIRA, C.A.; CRUZ, T.M; SOUSA, W.R.Q.; MORI, F.A. Anatomical identification of tropical woods traded in Lavras, Brazil. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 33, n. 1, p. 95-104, 2021.

DUARTE, P. J. et al. Macroscopic identification of tropical woods traded by Guajará in Lavras, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 60830-60838, 2020.

FERREIRA, C. A. et al. Identification of 20 species from the Peruvian Amazon tropical forest by the wood macroscopic features. **CERNE**, v. 29, p. e-103134, 2023.

FERREIRA, C. A.; INGA, J. G.; VIDAL, O. D.; GOYTENDIA, W. E.; MOYA, S. M.; CENTENO, T. B., VELÉZ, A.; TOMAZELLO-FILHO, M. Identification of tree species from the Peruvian Tropical Amazon “Selva Central” forest according to wood anatomy. **Bioresources** 16(4), 7161-7179, 2021.

FERREIRA, G. C; HOPKINS, M. J. G. **Manual de identificação botânica e anatômica–angelim**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. 102 p.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Acesso em: 21 nov. 2023.

GASSON, P.E; LANCASTER, C.A; YOUNG, R. et al. (2021) WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber. **Plants, People, Planet** 3: 130–141. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10164>

HERMANSON, J. C; WIEDENHOEFT, A. C. A brief review of machine vision in the context of automated wood identification systems. **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 233-250. 2011.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2013. 104 p.
- LENTINI, M.W.; BEZERRA, M.H.M.; DIAS, A.S.; BERNARDES, A.T.; ERDMANN, A.A. **Acertando o Alvo 4: Panorama Atual e Tendências para Mercados Sustentáveis de Madeira da Amazônia**. Piracicaba, São Paulo: Imaflora. 2022. 96p.
- LOW, M. C. et al. Tracing the world's timber: the status of scientific verification technologies for species and origin identification. **Iawa Journal**, v. 1, n. aop, p. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10097>
- LOWE, A. J.; DORMONTT, E. E; BOWIE, M. J.; DEGEN, B; GARDNER, S.; THOMAZ, D.; CLARKE, C.; RIMBAWANTO, A.; WIEDENHOEFT, A. C.; YIN, Y.; SASAKI, N. Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. **BioScience**, v. 66, n. 11, p. 990-998, 2016.
- MCDERMOTT, C. L.; IRLAND, L. C.; PACHECO, P. Forest certification and legality initiatives in the Brazilian Amazon: Lessons for effective and equitable forest governance. **Forest Policy and Economics**, v. 50, p. 134-142, 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Lista nacional oficial de espécies da flora ameaçadas de extinção**. Portaria nº 443 de 17 de dezembro de 2014. Anexo I. Diário Oficial da União- Seção 1, 18/12/2014. 2014.
- MORI, S. A.; PRANCE, G. T. Taxonomy, ecology, and economic botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). **Advances in Economic Botany**, p. 130-150, 1990.
- NASCIMENTO, L. B.; BRANDES, A. F. N.; VALENTE, F. D. W.; TAMAIO, N. Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, n. 1, p. 291-329, 2017.
- RAVINDRAN, P.; OWENS, F. C.; WADE, A. C.; VEGA, P.; MONTENEGRO, R.; SHMULSKY, R.; WIEDENHOEFT, A. C. Field-Deployable Computer Vision Wood Identification of Peruvian Timbers. **Front. Plant Sci.** 12:647515, 2021.
- RUFFINATTO, F.; CRIVELLARO, A.; WIEDENHOEFT, A. C. Review of macroscopic features for hardwood and softwood identification and a proposal for a new character list. **IAWA Journal**, v. 36, n. 2, p. 208-241, 2015.
- SANTINI JUNIOR, L. **Descrição macroscópica e microscópica da Madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo** – Programas “São Paulo Amigo da Amazônia” e “Cadmadeira”. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - ESALQ, Piracicaba. 2013. 272 p.

SANTINI JR, L.; FLORSHEIM, S. M. B.; TOMMASIELLO FILHO, M. **Anatomia e identificação da madeira de 90 espécies tropicais comercializadas em São Paulo**. Ponta Grossa – PR, EditoraAtena, 2021. 231p.

SCARANO, F. R.; SILVA, J. M. C. Production and international trade: challenges for achieving targets 6 and 11 of the Global Strategy for Plant Conservation in Brazil. **Rodriguésia** 69: 1577–1585, 2018.

VAN BRUSSELEN, J.; CRAMM, M.; TEGEGNE, Y. T. Wood identification services in support of legal supply chains: A market study. **Sustainable Futures**, v. 6, p. 100128, 2023.

WIEDENHOEFT, A.C.; SIMEONE, J.; SMITH, A.; PARKER-FORNEY, M.; SOARES R.; FISHMAN, A. Fraud and misrepresentation in retail forest products exceeds U.S. forensic wood science capacity. **PLoS ONE**, 14(7): e0219917.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219917>

ZENID, G. J; CECCANTINI, G. C. T. **Identificação macroscópica de madeiras**. São Paulo: IPT; 2012.

TERCEIRA PARTE – CONCLUSÃO DA TESE

Pelos resultados apresentados nesta obra, confirmamos que o comércio de madeiras praticado atualmente no Brasil não adota boas práticas de sustentabilidade, haja vista que, inúmeras espécies tropicais ameaçadas, principalmente da região Amazônica são vendidas comumente no varejo madeireiro. O jeito tradicional de identificar madeira precisa evoluir se quisermos combater o comércio ilegal de madeiras, para isso, é necessário integrar métodos científicos de identificação com tecnologia avançada em ferramentas para acelerar o processo.

A abordagem tecnológica usando Aprendizagem de Máquinas demonstrou enorme potencial na resolução de fraudes no comércio, apresentando acurácia global superior a 95% na identificação de madeiras nativas encontradas no varejo. O modelo baseado na CNN *Inception* V3 mostrou alta capacidade para a classificação de madeiras nativas, inclusive espécies ameaçadas de extinção como *Amburana cearensis* (Fabaceae), *Bertholletia excelsa* (Lecythidaceae) e *Cedrela odotata* (Meliaceae) (Artigo 1).

Da mesma forma, a anatomia da madeira, técnica tradicional de identificação de espécies usada há mais de 100 anos, continua na vanguarda da ciência, consolidando-se como método de verificação confiável para obter a identidade da madeira. A partir da análise macroscópica foram identificados oito táxons tropicais de origem Amazônica, incluindo espécies ameaçadas como *Bertholletia excelsa* (Lecythidaceae), *Apuleia leiocarpa* e *Dipteryx odorata* (ambas Fabaceae). A identificação anatômica revelou que entre os padrões determinantes, o parênquima axial fornece a evidência-chave para diferenciar as espécies tropicais (Artigo 2).

O algoritmo Inception V3 apresentou desempenho regular na identificação de espécies similares e agrupadas pelo mesmo nome comercial “cedrinho”. Ao avaliar a anatomia macroscópica dessas madeiras, observou-se que o parênquima axial também foi capaz de diferenciar essas madeiras semelhantes comercializadas na região de Lavras, Minas Gerais. Comparando as amostras, foi possível identificar a presença de parênquima axial marginal no gênero *Cedrela* (Meliaceae), parênquima axial em faixas para *Erismia uncinatum* (Vochysiaceae), parênquima axial confluyente em *Guarea* sp. (Meliaceae) e parênquima axial aliforme losangular como padrão em *Vochysia* sp. (Vochysiaceae). Casos assim, reforçam que métodos avançados de identificação de espécies necessitam de apoio e integração com métodos tradicionais de classificação (Artigo 1).

A demanda por mecanismos de verificação da origem da madeira incentivou o nosso grupo de pesquisa a desenvolver tecnologias para este fim. Foram apresentados protótipos de identidade digital da madeira para espécies nativas de alto valor, como a Smart Timber ID, que tem o propósito de fornecer transparência no processo de comercialização de madeiras.

Importante salientar que este documento no formato digital contém informações relevantes sobre a classificação taxonômica da espécie, o status de conservação, os principais usos da madeira, além de um código rastreável para o produto (Artigo 2).

Estudos futuros visando aprimorar o uso da identidade digital podem ser empreendidos, incluindo a integração deste documento a um sistema de visão computacional destinado à identificação de madeiras (Artigo 1), bem como a incorporação do número do Documento de Origem Florestal (DOF) na identidade digital. Consoante ao trabalho científico, nosso grupo de pesquisa desenvolveu um sistema de identificação de madeiras comerciais inovador, o Smart Timber. Esse sistema baseado em Inteligência Artificial está registrado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual – INPI, sob o processo N°: BR512024000980-9, até o momento o aplicativo é capaz de identificar dez espécies nativas (madeiras do Artigo 1).

Uma das prioridades para os próximos trabalhos consiste em melhorar continuamente a acurácia do modelo no software, sendo necessário incorporar novas imagens das espécies com lastro de rastreabilidade de Xilotecas ou Herbários dentro do nosso banco de dados.

Imaginem nos próximos anos, o perito de linha de frente ou empreendedor acessando o aplicativo Smart Timber, selecionando a espécie que deseja identificar, podendo obter imagens após preparar a madeira, fazer a identificação de forma ágil no próprio aplicativo e emitindo uma versão da identidade digital Smart Timber ID em tempo real, garantindo assim a identificação correta do produto de origem florestal e a devida diligência exigida pelo mercado internacional de madeiras.

A Inteligência Artificial não substitui a sensibilidade humana na identificação de madeiras em campo, mas proporciona agilidade e efetividade para a classificação de espécies madeireiras, inclusive aquelas ameaçadas de extinção. No momento, nosso grupo está explorando a viabilidade de implementar e monitorar os impactos das tecnologias no mercado por meio de Provas de Conceito (POCs). Para tal, buscamos parcerias estratégicas com entidades governamentais responsáveis pela fiscalização ambiental, organizações não governamentais interessadas na conservação das espécies, bem como as empresas privadas que compartilham preocupações relacionadas ao manejo florestal sustentável e desejam exportar madeiras legais com certificação de procedência.