



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

LORENA DE ALMEIDA

TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS:
uma revisão bibliométrica entre 2015 e 2024

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2026

LORENA DE ALMEIDA

TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS:
uma revisão bibliométrica entre 2015 e 2024

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira.

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2026

LORENA DE ALMEIDA

TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS:
uma revisão bibliométrica entre 2015 e 2024

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira.

Aprovada em 13 de Fevereiro de 2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JORDAO CABRAL MOULIN
Data: 24/02/2026 13:14:39-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
 STEFFANY DE LIMA ARAUJO
Data: 24/02/2026 13:21:24-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Stéffany de Lima Araujo
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 THAYANNE CAROLINE CASTOR NETO
Data: 24/02/2026 12:27:54-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Thyanne Caroline Castor Neto
Universidade Federal do Espírito Santo

"Acredite que você pode, e você estará no meio do caminho".

Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, por sempre me mostrar que sou capaz, mesmo quando não compreendo isso. Sou grata pelo milagre de todos os dias.

Aos meus pais, Paulo e Eliana, minha eterna gratidão. Obrigada por não medirem esforços para que eu realize meus sonhos e, por entenderem a minha ausência em muitos momentos.

Obrigada aos meus irmãos, Eduardo e Patrick, pelo carinho.

Agradeço ao professor Jordão, por confiar em mim e permitir a realização deste trabalho. Sou grata por todas as suas orientações e o constante incentivo pela minha evolução ao longo da graduação.

Agradeço ao senhor José Geraldo, pelos valiosos conhecimentos transmitidos que me inspiram nos estudos em anatomia da madeira.

Agradeço ao senhor Elecy pelos conhecimentos durante suas inúmeras aulas práticas.

Obrigada ao Douglas e toda a equipe da SMMARH 2022 pelos ensinamentos, pela oportunidade de estágio e pelas experiências compartilhadas. O período em que estive com a equipe foi fundamental para o meu crescimento.

Agradeço a Vaniele, a professora Rejane e ao Gilson pelos ensinamentos em bibliometria e treinamento na plataforma, que possibilitaram a realização deste trabalho.

Sou grata a todos(as) docentes que contribuíram de forma significativa para a minha formação. Agradeço por todas as conversas que instigaram minha curiosidade, pelo incentivo constante a buscar mais conhecimentos e por ampliar minha visão sobre a área. Sentirei falta de cada palavra que me trouxe aprendizado e novas perspectivas.

Minha imensa gratidão às amigas que a vida me deu ao longo dessa caminhada. A convivência diária com vocês tornou a graduação mais leve e significativa. Obrigada, meninas: Aline, Ayra, Débora, Laysa, Rayara, Samara e Vitória.

Gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até este momento. Àqueles que me incentivaram, me apoiaram e me motivaram a persistir ao longo da graduação, deixo minha sincera gratidão.

Obrigada a todos por terem feito parte desta caminhada!

RESUMO

A exploração ilegal de madeira representa um dos principais desafios ambientais e econômicos do setor florestal, exigindo mecanismos eficazes de controle e identificação das espécies comercializadas. Nesse contexto, a identificação anatômica da madeira desempenha papel fundamental, uma vez que, após o processamento, as árvores perdem suas características botânicas externas, tornando o lenho a principal fonte de informação diagnóstica. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliométrica da produção científica sobre técnicas de identificação de madeiras, abrangendo métodos macroscópicos, microscópicos e abordagens emergentes, no período de 2015 a 2024 e identificar as limitações de uso na fiscalização florestal. A pesquisa foi conduzida exclusivamente na base de dados Scopus, contemplando apenas artigos científicos. Os resultados indicam crescimento da produção científica, com taxa anual de 11,9% e intensificação a partir de 2019, além de concentração das publicações em instituições e autores vinculados principalmente à China e aos Estados Unidos. Observou-se predominância de estudos voltados a espécies de maior valor comercial e frequentemente associadas a fraudes, bem como o uso recorrente da anatomia macroscópica e microscópica como base da identificação. Técnicas espectroscópicas, moleculares e de *machine learning* concentram-se majoritariamente em países com maior infraestrutura de pesquisa científica, como China e Estados Unidos. Foi percebida uma lacuna relacionada à infraestrutura e diversidade de espécies na base de dados. Portanto, a integração das metodologias é essencial para o fortalecimento da fiscalização florestal, combate ao comércio ilegal de madeira, especialmente no contexto brasileiro.

Palavra-chave: Anatomia da madeira; Comércio ilegal de madeira; Técnicas emergentes; fiscalização de madeiras; Bibliometrix.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Problema e sua importância	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Comércio ilegal de madeira e fiscalização florestal	5
2.2 Anatomia e identificação da madeira	6
2.2.1 Identificação macroscópica da madeira	7
2.2.1.1 Propriedades organolépticas da madeira	7
2.2.1.2 Características anatômicas macroscópicas	9
2.2.2 Identificação microscópica da madeira	10
2.3 Ferramentas para a identificação de madeiras	11
2.4 Métodos de identificação de madeira	13
3 METODOLOGIA	17
4 RESULTADOS DA PESQUISA	20
5 CONCLUSÃO	30
6 REFERÊNCIAS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma metodologia de pesquisa	18
Figura 2. Produção científica anual	20
Figura 3. Produção científica por países	25
Figura 4. Espécies mais estudadas.....	27
Figura 5. Evolução de metodologia de identificação de madeira.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Afiliações com maior número em publicações científicas	21
Tabela 2. Autores com maior número em publicações científicas.....	23
Tabela 3. Autores com maior número em publicações científicas.....	24
Tabela 4. Número de pesquisas em métodos de identificação da madeira por países.....	26

1. INTRODUÇÃO

A exploração ilegal de madeira é uma das atividades ilícitas mais lucrativas do setor florestal global, movimentando valores estimados de aproximadamente US\$ 157 bilhões por ano (Silva *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2024). Seus impactos ultrapassam o âmbito econômico, resultando em degradação ambiental, perda de biodiversidade e danos irreversíveis aos ecossistemas (Bosch, 2021).

Diante desse cenário, acordos internacionais como a Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Flora e da Fauna Selvagens Ameaçadas de Extinção (CITES), e leis de políticas nacionais, como o Regulamento Madeireiro da União Europeia (UE) e a Lei Lacey nos Estados Unidos (EUA), estabeleceram mecanismos de controle e restrições comerciais que exigem precisão na identificação das espécies comercializadas (Stettinius *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2024).

No Brasil, a verificação de origem dos produtos florestais é regulamentada pelo Documento de Origem Florestal (DOF), instituído pela Portaria nº 253/2006 (Brasil, 2006) e normatizada pela Instrução Normativa do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), IN nº 21/2014 (Brasil, 2014). Constituindo o principal instrumento de registro e controle do transporte e armazenamento de madeira nativa (Ibama, 2014). Entretanto, a efetividade desses mecanismos depende de um ponto crítico, que é a correta identificação das espécies de madeira transportada, uma vez que a análise do lenho exige conhecimento especializado da anatomia da madeira e/ou comparação com amostras ou bancos de referências (Prabu *et al.*, 2021).

A anatomia da madeira fornece um conjunto de caracteres macroscópicos e microscópicos, capazes de diferenciar espécies, gêneros ou grupos botânicos (International Association of Wood Anatomists - IAWA Committee, 1989). Manuais, atlas e chaves de identificação para diversas espécies foram desenvolvidos por pesquisadores ao longo de décadas (Lopes *et al.*, 2022). No Brasil, um dos trabalhos de

destaque é o realizado pelo Serviço Florestal Brasileiro e por Florsheum *et al.*, (2020), no qual mais de 350 espécies comercializadas no país foram descritas detalhadamente quanto às suas características anatômicas.

Neste contexto, a incorporação da microscopia digital, a exemplo de coleções virtuais e bancos de dados online, como DELTA (Richter e Dallwitz, 2019), CITESwoodID (CITESwoodID, [20--?]) ampliam o acesso à informação anatômica e apoiam análises comparativas madeireiras realizadas por fiscais, peritos e pesquisadores. Paralelamente, metodologias baseadas em espectroscopia, análises químicas, Ácido Desoxirribonucleico (DNA), isótopos estáveis, visão computacional e *machine learning* são estudadas para identificação madeireira (Lopes *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Stettinius *et al.*, 2024).

Essas tecnologias emergentes ampliam as possibilidades de identificação anatômica. Contudo, ainda são poucos os estudos que integrem essas ferramentas com a fiscalização madeireira. Assim, compreender a evolução, seus avanços e limitações das diferentes metodologias é fundamental para fortalecer o combate ao comércio ilegal, como agregar o treinamento de profissionais responsáveis pela verificação madeireira e estratégico para o fortalecimento das fiscalizações e políticas públicas.

1.1 O problema e sua importância

A identificação anatômica da madeira na fiscalização florestal é uma ferramenta necessária para averiguar a legalidade no transporte (Silva *et al.*, 2022). O comércio ilegal madeireiro é uma atividade ilícita com movimentação financeira significativa no comércio florestal. Provocando impactos ambientais significativos, muitas vezes com danos negativos à biodiversidade de flora e fauna (Bosch, 2021).

A fiscalização madeireira é complexa e necessita de conhecimento especializado em elementos anatômicos como vasos, parênquimas e raios, uma vez que as madeiras são analisadas sem as características botânicas, cascas, folhas e flores. De forma que a necessidade de intensificação dessas fiscalizações em tempo rápido e objetivo ocasiona a crescente pesquisa científica e a evolução por técnicas novas metodologias de identificação de madeiras (Lopes *et al.*, 2022).

Como subsídio técnico à fiscalização no setor florestal, estudos estão utilizando *machine learning* para a identificação de madeiras, com análise de imagens de amostras de bancos de dados de espécies (Dierickx *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2022; Suraj *et al.*, 2024). Esta evolução de uso de ferramentas computadorizadas para a identificação de madeiras é uma metodologia que busca respostas rápidas, mas até que ponto podem ser eficientes.

Dessa forma, visando compreender a evolução das pesquisas em identificação anatômica da madeira e as metodologias que vêm sendo utilizadas para a análise de espécies lenhosas, os avanços em ferramentas para uso em campo, assim como os desafios que ainda limitam sua aplicabilidade, torna-se essencial a realização de uma revisão bibliométrica para identificar as ações de pesquisadores e elaboração de políticas do setor florestal.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise da produção científica sobre identificação madeireira, no período de 2015 a 2024, a fim de identificar os avanços e as limitações que restringem sua utilização na fiscalização ambiental.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as instituições, autores, países, e anos de publicação mais recorrente sobre a identificação madeireira;
- Identificar as espécies mais estudadas em metodologias de identificação;
- Selecionar as principais metodologias, ferramentas e tecnologias empregadas na identificação de madeiras;
- Apontar as lacunas e as tendências relacionadas à identificação anatômica de madeiras, principalmente no contexto brasileiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Comércio ilegal de madeira e fiscalização florestal

No Brasil, a exploração madeireira possui raízes históricas profundas. Desde o período colonial, espécies de alto valor comercial foram sistematicamente exploradas, moldando a economia florestal brasileira ao longo de mais de 300 anos (Valdiones *et al.*, 2022; Rankin, 1985). O setor madeireiro evoluiu de atividades extrativistas para cadeias produtivas mais complexas, embora ainda marcadas por desafios estruturais, especialmente na região amazônica (Imaflora, 2022).

O comércio ilegal de madeiras representa uma das principais ameaças à conservação das florestas brasileiras, resultando em impactos ambientais severos, perda de biodiversidade, degradação de habitats e aumento de emissões associadas ao desmatamento (Rossi, 2024). Além disso, essa prática causa prejuízos econômicos significativos, ao enfraquecer a competitividade das cadeias legalmente produtivas (Soares, 2017).

No contexto do comércio madeireiro a *Timberflow - A Plataforma da Madeira*, (Imaflora, 2022), divulgou um relatório sobre a diversidade de espécies arbóreas que são exploradas na Amazônia brasileira. No levantamento estudado espécies como maçaranduba (*Manilkara huberi*), cedrinho (*Erismia uncinatum*), cupiúba (*Goupia glabra*), são as três (3) espécies mais exploradas. (Imaflora, 2022)

Muitas dessas espécies apresentam valor elevado no mercado e, por isso, são frequentemente alvo de fraudes documentais e substituição por espécies morfológicamente semelhantes, especialmente na ausência de mecanismos adequados de verificação (Soares, 2017). A fiscalização brasileira identificou um conjunto recorrente de estratégias utilizadas por agentes ilegais, como substituição de espécies visualmente semelhantes, mistura de cargas e falsificação documental (Valdiones *et al.*, 2022).

Para coibir essas atividades, o controle nacional da origem da madeira está regulamentado pelo DOF, normatizado pela Instrução Normativa IBAMA n.º 21/2014,

integrado ao Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (Sinaflor). O DOF constitui uma das principais ferramentas de rastreabilidade da madeira. No entanto, a falsificação de documentos e a dificuldade na identificação precisa das espécies ainda representam gargalos no processo de fiscalização (Ibama, 2014).

A legislação brasileira, por meio da Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998), tipifica como crime ambiental o corte, transporte, comercialização e armazenamento de produtos florestais sem a devida autorização (Brasil, 1998). A atuação de órgãos como o IBAMA, ICMBio, Polícia Federal e Ministérios Públicos Estaduais é essencial para a fiscalização e repressão a essas infrações, muitas vezes em articulação com sistemas de perícia ambiental.

Operações de fiscalização, como Arquimedes (Dittmar, Herbert. 2021), revelam esquemas de grande escala de lavagem de madeira, adulteração de créditos florestais e transporte de espécies de alto valor sob nomenclaturas genéricas ou falsas. Casos em que a identificação de madeira confirma espécies transportadas, detectam substituições ou mistura de espécies, validam a veracidade dos documentos de origem, fortalecem a rastreabilidade e aumentam a confiabilidade da cadeia produtiva.

2.2 Anatomia e identificação da madeira

Os estudos anatômicos possuem origem histórica, com registros desde os trabalhos de Cordus e Caesalpino no século XVI, que iniciaram as primeiras descrições estruturais do lenho (Chimelo, 1992; Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT), 2012). A anatomia da madeira, derivada do grego *anatomé* (incisão, dissecação), se dedica ao estudo dos diferentes tipos de células que constituem o xilema secundário (Burger; Richter, 1991). Essas células desempenham funções essenciais para a árvore, como condução de água, armazenamento e transporte de nutrientes e sustentação.

A madeira é um material orgânico, heterogêneo e de estrutura complexa, formada por diferentes tipos celulares orientados perpendicular e paralelamente ao eixo do tronco (Evangelista, 2021).

O lenho é constituído principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, além de compostos secundários como, extrativos, taninos, óleos e resinas, que contribuem para variações de cor, odor e durabilidade (Burger; Richter, 1991).

A identificação taxonômica de uma árvore se baseia em características morfológicas externas, como cascas, folhas e principalmente flores e frutos. Entretanto, esses componentes são removidos, impossibilitando a identificação botânica convencional (Florsheim *et al.*, 2020). De forma que a análise anatômica do lenho se torna a principal fonte de informação diagnóstica, o que exige conhecimento das características anatômicas macroscópicas e a microscópica.

2.2.1 Identificação macroscópica da madeira

A análise macroscópica de madeira é subdividida em duas categorias, as sensoriais/organolépticas e as anatômicas.

2.2.1.1 Propriedades organolépticas da madeira

As características sensoriais incluem referências percebidas pelos sentidos humanos (visão, paladar, tato e olfato), como a cor, odor, gosto, grã, textura, brilho e desenho. Embora possam ser identificadas primeiramente, não são capazes de distinguir madeiras semelhantes por si só (Santini *et al.*, 2021).

A cor do cerne em muitas espécies se destaca por sua coloração mais escura, devido a impregnação de diversas substâncias orgânicas nas células e nas paredes celulares, durante o processo de cernificação (Burger; Richter, 1991). A cor deve ser observada em superfícies longitudinais do cerne, exposta recentemente, evitando a alteração em decorrência da oxidação de componentes orgânicos quando em contato com ar e a luz (Barros *et al.*, 2024). As categorias de cores de madeira normalmente observadas são: esbranquiçada (*Virola surinamensis*), amarelada (*Simarouba amara*), avermelhada (*Caesalpinia echinata*), acastanhada (*Hymenaea courbaril*), parda (*Ocotea porosa*), enegrecida (*Melanoxylon brauna*), rosado (*Eucalipto* sp.) e arroxeada (*Peltogyne catingae*) (IPT, 2012).

O odor, característica difícil de ser definida, se deve à presença de substâncias voláteis que tendem a diminuir quando expostas, sendo classificado como indistinto ou distinto (Evangelista, 2021). Quando distinto pode ser agradável, como em cerejeira (*Amburana cearensis*), imbuia (*Ocotea porosa*), cabriúva (*Myroxylum* sp.), ou desagradável como cupiúba (*Goupia glabra*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*) e tauari-fedido (*Couratari* sp.) (Florsheim *et al.*, 2020).

O gosto e o odor estão relacionados por surgirem da mesma substância, em casos excepcionais, somente o gosto contribui para a identificação e distinção de espécies (Santini *et al.*, 2021). O gosto pode ser classificado em amargo (angelim-amargoso, *Vatairea guianensis*), adocicado (cerejeira, *Amburana cearensis*), adstringente (aroeira, *Myracrodruon urundeuva*) e ácido (pequi-vinagreiro, *Caryocar edule*) (Florsheim *et al.*, 2020).

A grã se refere à orientação das estruturas do lenho em relação ao eixo vertical, é genético, porém pode sofrer alterações por influências ambientais (Florsheim *et al.*, 2020). Os arranjos podem ser grã direta (Jequitibá Branco, *Cariniana estrellensis*), com os tecidos axiais orientados paralelamente ao eixo principal do tronco ou grã irregular quando os elementos axiais apresentam variações de inclinação quanto ao eixo longitudinal do tronco, que se subdivide em grã: espiral/torcida (Eucalipto, *Eucalyptus* sp.), entrecruzada/reversa (Sucupira, *Bowdichia nitida*), ondulada (Imbuia, *Ocotea porosa*) e inclinada ou diagonal/oblíqua (Louro Vermelho, *Nectandra rubra*) (Santini *et al.*, 2021).

A Textura é o aspecto da superfície do lenho, estando associada ao efeito produzido pelas dimensões, distribuição (organização) e proporção dos diferentes elementos estruturais que o compõem (Santini *et al.*, 2021). Nas angiospermas (folhosas), essa característica é determinada principalmente pelo diâmetro dos vasos e pela largura dos raios. Já nas gimnospermas (coníferas), a textura está relacionada à maior ou menor nitidez, espessura e regularidade dos anéis de crescimento (Burger; Richter, 1991).

As madeiras podem ser classificadas quanto à textura em fibrosa, grosseira ou grossa, média e fina. A textura fibrosa caracteriza-se por uma superfície mais áspera, associada à abundância de parênquima, como ocorre no angelim (*Hymenolobium* sp.). A textura grossa é observada em madeiras que apresentam vasos de grande diâmetro, visíveis a olho nu, como no carvalho (*Quercus* sp.). A textura média ocorre quando há presença variável de parênquimas e vasos de diâmetro médio, a exemplo do jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*). Já a textura fina é característica de madeiras formadas por elementos anatômicos pequenos, geralmente não perceptíveis a olho nu, como o pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum*) (Florsheim *et al.*, 2020).

O brilho e o desenho possuem relevância estética por destacarem a superfície da madeira. O brilho está relacionado à orientação dos elementos celulares e à presença de extrativos (IPT, 2012). O desenho, por sua vez, refere-se às figuras observadas nos planos longitudinais, resultando do contraste entre fibras, parênquima axial e grã (Florsheim *et al.*, 2020). Contudo, não contribuem de forma significativa para a identificação e diferenciação de madeiras (Burger; Richter, 1991).

2.2.1.2 Características anatômicas macroscópicas

As características anatômicas macroscópicas da madeira são aquelas observadas a olho nu ou com o auxílio de uma lupa de 10 vezes (IPT, 2012). Sendo possível visualizar a forma, tamanho e distribuição dos elementos celulares como o parênquima axial e radial (raios), os vasos, as camadas de crescimentos e as fibras, bem como estruturas especiais como canais secretores, floema incluso e máculas (Botosso, 2011).

O parênquima axial é formado por células de paredes finas, geralmente mais claras que a parte fibrosa do lenho, e desempenha função de armazenamento de reservas nutritivas; sua forma e distribuição são essenciais para a identificação de famílias, gêneros e espécies (Burger; Richter, 1991).

Os raios ou parênquima radial têm função de armazenamento e translocação radial de substâncias, radiando do câmbio até a medula, sendo relevantes para distinção de famílias e gêneros, especialmente quando apresentam conteúdo escuro (IPT, 2012).

Os vasos, constituídos por elementos conectados longitudinalmente, conduzem água e minerais desde as raízes até a copa, sendo importantes na macroscopia por sua porosidade, arranjo, diâmetro, frequência e conteúdo, eles podem apresentar obstruções parciais ou totais por tilos ou substâncias, visíveis a olho nu como depósitos brilhantes (IPT, 2012). As camadas de crescimento, observadas no plano transversal, registram variações ambientais, permitindo estimativas de idade, taxas de crescimento e manejo florestal (Florsheim *et al.*, 2020).

As fibras, de extremidades afiladas e paredes espessas, constituem a maior parte do lenho, funcionando como suporte estrutural, mas pouco relevantes na identificação (Botosso, 2011). Estruturas especiais, como canais secretores (axiais ou radiais), floema incluso e máculas, podem ocorrer em determinadas famílias ou como resposta a injúrias, contribuindo para diferenciação de espécies (Burger; Richter, 1991).

A observação dessas características permite distinguir madeiras aparentemente semelhantes, evitar trocas comerciais, fornecer subsídios a órgãos de fiscalização e certificação, apoiar processos jurídicos e separar gêneros, mesmo em pedaços reduzidos ou carbonizados, tornando a análise macroscópica essencial para a identificação e manejo sustentável da madeira (Burger; Richter, 1991).

2.2.2 Identificação microscópica da madeira

A análise microscópica, procedimento mais preciso para identificação anatômica, permite observar detalhes celulares que não são visíveis macroscopicamente. Ela envolve a preparação de lâminas histológicas permanentes ou temporárias examinadas em microscópio óptico ou estereomicroscópio (Jácome *et al.*, 2021).

Nesse nível de observação, torna-se possível examinar com precisão elementos como o tipo e padrão de perfuração das placas de perfuração, espessura de paredes celulares, presença de espiralização, tipos de pontoações e a morfologia dos vasos (Burger; Richter, 1991).

Além dos vasos, a anatomia dos raios, incluindo número de séries celulares, altura e frequência, bem como o padrão de parênquima axial (distribuição e formas), são características diagnósticas importantes na microscopia, permitindo separar grupos taxonômicos mais próximos (Burger; Richter, 1991).

Esses caracteres microscópicos muitas vezes apresentam padrões estáveis e específicos, funcionando como marcadores anatômicos que fortalecem o diagnóstico em níveis de família, gênero e, em muitos casos, até de espécie, especialmente quando combinados com bases de dados e coleções de referência (Florsheim *et al.*, 2020).

A presença e o tipo de cristais, depósitos de extrativos (gomas, resinas) e tilos (que preenchem luzes vasculares) também podem ser observados e fornecem informações distintivas para a determinação de táxon. Normas internacionais, como o IAWA (1989), padronizam essas estruturas e descrições, servindo como base de comparação diagnóstica. Contudo, apesar de sua alta precisão, o método de análise microscópico requer mais tempo e exige infraestrutura laboratorial, o que limita sua aplicação em operações em fiscalização de rotina (Botosso, 2011).

2.3 Ferramentas para a identificação de madeiras

As ferramentas digitais são utilizadas como referência na identificação de madeiras, sendo essenciais para diagnósticos com informações anatômicas detalhadas. Isso se dá, pois eles contêm análises anatômicas de diversas espécies, descrições estruturais, imagens de alta resolução, chaves interativas e dados comparativos permitem a verificação e identificação de espécies. Diversas são as ferramentas disponibilizadas online e gratuitamente.

Uma delas é a DELTA, que é um sistema de identificação interativa desenvolvido originalmente na Alemanha, com descrições de folhosas no comércio internacional. Permite selecionar combinações de caracteres anatômicos para retornar espécies compatíveis, funcionando como uma chave eletrônica e ferramenta de reconhecimento anatômico (Richter; Dallwitz, 2019).

O *Database of Wood Specimens*, é um banco de dados do Instituto de Pesquisa Florestas e de Produtos Florestais (TWtw), com 29 mil espécimes de madeira japonesa, que corrobora na identificação de madeiras, baseados na IAWA. Outro Banco de dados do Instituto é o banco de dados de propriedades de madeiras do Sudeste Asiático desenvolvido na década de 60 para suprir a demanda de informação de espécies lenhosas asiáticas que entravam no mercado (Takeshi *et al.*, 1996).

Sendo uma chave de acesso múltiplo, a *InsideWood*, é uma das plataformas mais completas, desenvolvida em 2004 incluindo chaves de acesso múltiplo baseada na lista de madeiras da IAWA (IAWA COMMITTEE, 1989). Reúne mais de 10 mil descrições e mais de 70 mil imagens, incluindo micrografias de alta qualidade (Silva *et al.*, 2022).

O CITESwoodID é um banco de dados desenvolvido para apoio à fiscalização do comércio internacional de espécies protegidas pela CITES. Sendo fundamental em operações de fiscalização aduaneiras e portuárias, reduzindo o risco de liberação de cargas de espécies ameaçadas rotuladas com nomes falsos (CITESwoodID, [20--?]).

O Laboratório de Produtos Florestais (LPF), vinculado ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB), disponibiliza informações anatômicas, propriedades tecnológicas e imagens de espécies brasileiras no banco de dados Madeiras Brasileiras. Facilitando a correta aplicação e utilização da madeira a partir do conhecimento de suas reais possibilidades de uso (Serviço Florestal Brasileiro, 2023).

O XyloTron é um sistema portátil de visão computacional treinado para a identificação macroscópica da madeira com auxílio de inteligência artificial. Permite identificação rápida em campo, mesmo remotamente, reduzindo a dependência de laboratórios, inclusive usado na operação Arquimedes (XyloTron, 2020).

Contudo, necessita da preparação adequada da superfície, e tem a limitação de conexão permanente com um computador portátil.

Assim, esses bancos de dados fornecem padrões comparativos confiáveis, essenciais para laudos técnicos e para comprovar fraudes. Apoiam fiscais que precisam tomar decisões imediatas sobre cargas suspeitas, intervindo na substituição fraudulenta do comércio ilegal, por consolidação de métodos confiáveis de identificação de espécies madeiras.

2.4 Métodos de identificação de madeira

Os métodos baseados na anatomia da madeira continuam sendo amplamente utilizados e reconhecidos como referência para a identificação taxonômica de espécies lenhosas, uma vez que se fundamentam na observação direta e/ou com lâminas histológicas das características estruturais do tecido lenhoso, como vasos, parênquimas e raios, avaliados em nível macroscópico e microscópico (Santini *et al.*, 2021). Estudos como Capano *et al.*, (2015), Ferreira *et al.*, (2021), Gärtner *et al.*, (2015a; 2015b), TEGEL; CROUTSCH (2016) reforçam a importância dessa abordagem, seguindo os padrões estabelecidos pela IAWA (1989).

Como principal vantagem, a anatomia da madeira apresenta alta confiabilidade e robustez taxonômica, sendo aplicável mesmo em amostras secas ou parcialmente processadas (Evangelista, 2021). Entretanto, esses métodos apresentam limitações relacionadas à dependência de especialistas altamente qualificados, ao caráter interpretativo da análise e ao tempo necessário para preparo e avaliação das amostras em análises microscópicas, o que restringe sua aplicação em contextos que demandam respostas rápidas, como a fiscalização em campo (Hwang; Kobayashi; Sugiyama, 2020).

As técnicas espectroscópicas, especialmente a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e no Infravermelho Próximo (NIR), têm sido amplamente exploradas como métodos de identificação baseados na análise química do material lenhoso (Deklerck *et al.*, 2020).

Essas abordagens fundamentam-se na interação da radiação eletromagnética com os componentes químicos da madeira, como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Gerando assinaturas espectrais associadas à composição química do material, que podem ser utilizadas para a discriminação entre espécies (Deus *et al.*, 2022).

Estudos como os de Jesus *et al.*, (2024), Lacerda *et al.*, (2024) e Xue *et al.*, (2023) demonstram o potencial dessas técnicas para a identificação de espécies comerciais, frequentemente associadas a métodos quimiométricos e algoritmos de *machine learning*. Os resultados indicam elevada acurácia de classificação, rapidez e o potencial de automatização dessas técnicas. Entretanto, sua eficiência depende da qualidade dos dados espectrais, da calibração adequada dos modelos e da existência de bases de referência representativas, o que ainda limita sua aplicação em uma diversidade de espécies.

As abordagens baseadas em visão computacional e *machine learning* têm se destacado pelo potencial de automatização da identificação madeireira, incluindo aplicações em condições de campo. Esses métodos baseiam-se na aquisição e análise de imagens da superfície da madeira, a partir das quais são extraídas características visuais relacionadas a padrões anatômicos, textura, porosidade, arranjo de vasos e fibras, utilizadas no treinamento de modelos de classificação (Yang *et al.*, 2024).

Trabalhos como os de Andrade; Basso; Latorraca, (2020) e Ma *et al.*, (2024) demonstram que modelos supervisionados, como Máquinas de Vetores de Suporte SVM e Redes Neurais Convolucionais (CNN), podem alcançar elevados índices de acurácia quando treinados com bases de dados representativas. Com a possibilidade de aplicação em campo e a redução da dependência de especialistas. No entanto, os autores acima apontam que o desempenho desses sistemas é sensível à variabilidade das imagens, às condições de iluminação, preparo da superfície e à necessidade de calibração criteriosa e bases de dados padronizadas, especialmente quando aplicados fora de ambientes controlados.

As técnicas baseadas na extração e análise de DNA consistem em métodos de identificação molecular, nos quais pequenas amostras de madeira são utilizadas para a

extração de DNA, frequentemente degradado e em baixa concentração, principalmente proveniente de células do parênquima e de fragmentos preservados nos tecidos lenhosos (Jiao *et al.*, 2020).

Após a extração, regiões específicas do DNA, conhecidas como marcadores genéticos ou DNA *barcoding*, são amplificadas e comparadas com sequências de referência em bancos de dados, permitindo a distinção taxonômica de espécies lenhosas (Stettinius *et al.*, 2024). Essas abordagens apresentam alta precisão, sendo particularmente relevantes em contextos forenses e no combate à exploração madeireira ilegal, inclusive para espécies protegidas por acordos internacionais, como a CITES (Bogun *et al.*, 2024; Siong *et al.*, 2016).

Em contextos forenses e arqueológicos, métodos complementares como a datação por radiocarbono e análises isotópicas têm sido utilizados para inferir a idade e a origem geográfica de materiais lenhosos. A análise da razão isotópica de estrôncio, realizada por espectrometria de massa, permite identificar a origem geográfica das árvores, uma vez que diferentes regiões geológicas apresentam assinaturas isotópicas distintas, possibilitando diferenciar madeiras provenientes de áreas locais e não locais (Sichen *et al.*, 2023).

Ostapkowiz *et al.*, (2017) demonstram que a integração entre anatomia da madeira, datação por radiocarbono e análise isotópica de estrôncio permite reconstruções ambientais e culturais detalhadas, evidenciando o potencial dessas abordagens em estudos de proveniência e autenticidade da madeira.

Trabalho como Bogun *et al.*, (2024) ressaltam a necessidade de integração entre laboratórios acadêmicos e órgão de fiscalização, uma vez que a verificação da legalidade de produtos madeireiros depende diretamente da exatidão da identificação taxonômica. Nesse sentido, Lopes *et al.*, (2022) demonstram que o uso de modelos de *machine learning* treinados com bases de dados representativas pode aumentar significativamente a eficiência da identificação forense de madeiras, reforçando o potencial dessas tecnologias como ferramentas de apoio à fiscalização ambiental.

Como uma das tendências mais recentes e relevantes para a fiscalização ambiental, o Serviço Florestal Brasileiro, em parceria com o UNODC e a Unesp, lançou o aplicativo *Lignum Brasilis*, baseado em inteligência artificial, que utiliza modelos treinados com milhares de imagens para apoiar a identificação rápida e precisa de espécies nativas em campo, fortalecendo a detecção de madeira de alto valor comercial e ameaçada de extinção e auxiliando na repressão à exploração ilegal (SFB/UNODC, 2025).

Mesmo assim, apesar de representar um avanço tecnológico significativo, essa e outras iniciativas ainda demandam ampliação de bases de dados, integração com sistemas de fiscalização, capacitação técnica e infraestrutura operacional para que possam ser adotadas de forma rotineira pelos órgãos de controle, especialmente em regiões remotas e com menor cobertura técnica.

3. METODOLOGIA

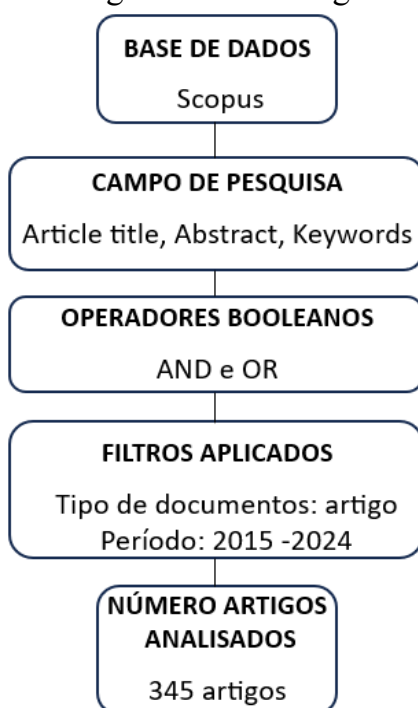
Os dados foram obtidos exclusivamente do banco de dados Scopus, plataforma científica multidisciplinar, reconhecida pela ampla cobertura e confiabilidade de estudos, amplamente utilizada para análises bibliométricas e avaliações do estado atual de áreas de pesquisa específicas (Lucas *et al.*, 2023).

A busca ocorreu aplicada nos campos: título do artigo (*Article Title*), resumo (*Abstract*) e palavras-chaves (*Keywords*), analisando os artigos em todos os idiomas. Em combinação com os operadores booleanos AND, entre os campos de pesquisa e, OR, entre as palavras, de modo a ampliar e, ao mesmo tempo, refinar os resultados, foram aplicados no primeiro campo de pesquisas as seguintes palavras: “*wood identification*” OR “*wood species identification*” OR “*timber identification*” OR “*wood anatomy*” OR “*macroscopic wood identification*” OR “*microscopic wood identification*” OR “*forensic wood analysis*” OR “*forensic timber identification*” OR “*wood taxonomy*”. Após, no segundo campo de pesquisa, foram adicionados as seguintes palavras de busca: “*machine learning*” OR “*deep learning*” OR “*artificial intelligence*” OR “*computer vision*” OR “*image analyses*” OR “*hyperspectral imaging*” OR “*near infrared spectroscopy*” OR “*NIR*” OR “*chemometrics*” OR “*DNA barcoding*” OR “*genetic identification*” OR “*FTIR*” OR “*infrared spectroscopy*” OR “*mass spectrometry*” OR “*stable isotopes*” OR “*X-ray densitometry*” OR “*microtomography*” OR “*X-ray microtomography*” OR “*radiocarbon*” OR “*carbon*”. Essa combinação permitiu integrar diferentes termos relacionados à identificação da madeira, assegurando maior abrangência temática (Elsevier, 2023).

Ademais, foram aplicados filtros para restringir os resultados aos artigos científicos, determinando a busca para o período de 2015 a 2024. O ano de 2025 não foi incluído por ainda não estar concluído no momento da coleta de dados. Adicionalmente, foram limitadas palavras-chave: “*Wood*”, “*Wood Anatomy*”, “*Wood Identification*”, “*Anatomy*”, “*Species Identification*”, “*Quantitative Wood Anatomy*”, “*Image Analysis*”,

“Deep Learning”, “Near Infrared Spectroscopy”, “Machine Learning”, “Infrared Devices”, “Classification”, “Wood Species Identification”, “Radiocarbon Dating”, “Discriminant Analysis”, “Mass Spectrometry”, “Convolutional Neural Networks”, “Wood Species”, “Illegal Logging”, “Infrared Spectroscopy”, “Computer Vision”, “Identification”, “Convolutional Neural Network”, “Species Difference”, “DNA Barcoding”, “Carbon Isotopes”, “Species Specificity”, “Fourier Transform Infrared Spectroscopy”, “Carbon isotope”, “Machine-learning”, “Stable Isotope”, “Neural Networks”, “Identification Method”, “Learning Systems”, “Scanning Electron Microscopy”, “Endangered Species”, “Timber Identification”, “Near-Infrared Spectroscopy”, “Isotopes”, “DNA Barcoding”, “Taxonomic”, “Artificial Intelligence”, “Artificial Neural Network”, com o objetivo de refinar os resultados e assegurar a relevância temática dos documentos selecionados. Ao final da pesquisa foi encontrado um total de 345 artigos (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma metodologia de pesquisa.



Fonte: A Autora (2026).

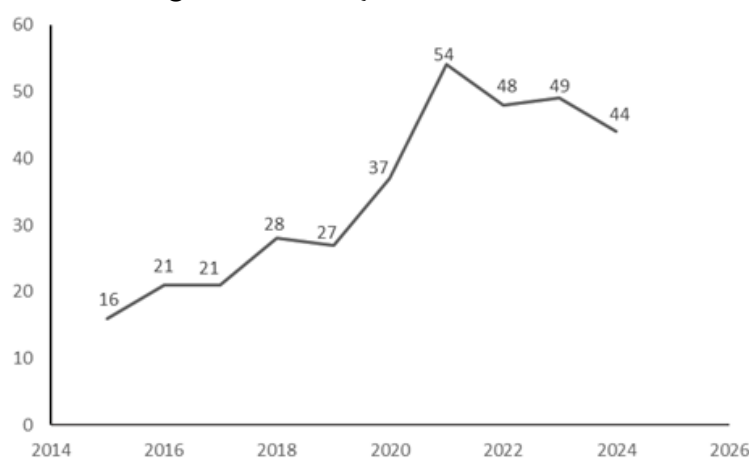
Os registros recuperados da Scopus foram exportados em formato compatível para posterior tratamento e análise no ambiente estatístico *R*, utilizando o pacote *bibliometrix*, ferramenta amplamente empregada em análises bibliométricas por permitir a organização, processamento e visualização de indicadores científicos, como produção anual, periódicos mais relevantes, autores, países, redes de coautoria e tendências temáticas (Aria; Cuccurullo, 2017). Essa abordagem possibilitou uma avaliação sistemática e quantitativa da evolução das técnicas de identificação de madeiras ao longo do período analisado.

4. RESULTADOS DA PESQUISA

A produção científica sobre identificação de madeiras, cresceu de forma consistente na área anatômica, com taxa de crescimento anual de 11,9% devido a crescente demanda por rastreabilidade e combate à exploração ilegal de madeira, avanços de tecnologias associadas com ferramentas computacionais e por cada vez mais exigência do mercado pelas certificações e controle de origem madeireira. De acordo com os parâmetros bibliométricos adotados pelo pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017), taxas de crescimento positivas superiores a 10% indicam campos de pesquisa em expansão, associados a tópicos emergentes que atraem crescente atenção da comunidade científica.

A produção científica apresentou intensificação a partir de 2019 (Figura 2), com uso de espectroscopia e *machine learning*, impulsionada pelo desenvolvimento de técnicas rápidas, objetivas e automatizadas, motivadas pela demanda global por sistemas de verificação de origem e controle das cadeias produtivas madeireiras. Esses crescimentos refletem a consolidação de redes internacionais de pesquisa e a crescente integração entre abordagens tradicionais e tecnologias emergentes, apesar de ser observado uma queda nos anos de 2022 e 2024.

Figura 2: Produção científica anual.



Fonte: A Autora (2026).

Quanto às instituições mais produtivas (Tabela 1), observa-se a predominância de centros de pesquisa e universidades localizadas principalmente na Ásia e na Europa. Na China, destaca-se a *Chinese Academy of Forestry* (31 artigos), seguida pela *Nanjing Forestry University* (22 artigos) e *Beijing Forestry University* (21 artigos). Esses resultados evidenciam o elevado investimento do país em pesquisa aplicada ao setor florestal e no desenvolvimento de métodos analíticos para identificação de espécies comerciais, uma vez que é um dos maiores importadores de madeira tropical e temperado do mundo, e para a exportação dos produtos após processamento, precisão da correta identificação da matéria prima devido às legislações de regulamentação de transporte de produtos florestais (He *et al.*, 2019; Jiao *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2023).

Tabela 1: Afiliações com maior número em publicações científicas.

INSTITUIÇÃO	ARTIGOS
<i>Chinese Academy of Forestry</i> (China)	31
<i>Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald</i> (Suiça)	29
<i>Nanjing Forestry University</i> (China)	22
<i>Beijing Forestry University</i> (China)	21
<i>Universiteit Gent</i> (Bélgica)	19
<i>Wood Collections</i> (WOODPEDIA)	18
Universidade de São Paulo (Brasil)	17
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Brasil)	17
<i>University of Wisconsin–Madison</i> (Estados Unidos)	17
<i>Università degli Studi di Padova</i> (Itália)	14

Fonte: A Autora (2026).

Na Europa, instituições consolidadas, como o Instituto Florestal da Suíça, *Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald* (29 artigos), a *Universiteit Gent*, na Bélgica (19 artigos), e a *Università degli Studi di Padova*, na Itália (14 artigos) contribuem significativamente, associadas à tradição europeia em estudos anatômicos, com pesquisas em dendrocronologia, a manutenção de coleções de referência e ao desenvolvimento de metodologias padronizadas para identificação de madeiras (Wheeler; Bass; Gasson, 1989).

Na América do Norte, a *University of Wisconsin–Madison*, nos Estados Unidos (17 artigos), forte pela produção científica que integra estudos de anatomia da madeira, com uso de coleções de referência e aplicações forenses (Liu *et al.*, 2022; Prabu *et al.*, 2021). Na América do Sul, a Universidade de São Paulo e a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” representam o Brasil com 17 artigos publicados cada, demonstrando inserção relevante do país na produção científica sobre identificação de madeiras, apesar das limitações financeiras e de investimento contínuo em pesquisas da área considerando a baixa prioridade política à pesquisas em identificação madeireira, (Rosa da Silva *et al.*, 2017).

Ao analisar os autores mais produtivos (Tabela 2), identificam-se pesquisadores com contribuição expressiva em pesquisas na área. O cenário global é liderado quantitativamente por pesquisadores como Yin (21 publicações), He (17) e Guo (12), cujos esforços concentram-se majoritariamente no desenvolvimento de algoritmos de visão computacional na China. Destaca-se também Wiedenhoeft (18), dos Estados Unidos, como uma referência central na aplicação de tecnologias forenses. Outros autores, como Guo; Jiao; Sugiyama e Von Arx apresentam logo em seguida com menor número de publicações.

Tabela 2: Autores com maior número em publicações científicas.

AUTORES	ARTIGOS
<i>Yin</i> (China)	21
<i>Wiedenhoeft</i> (Estados Unidos)	18
<i>He</i> (China)	17
<i>Guo</i> (China)	12
<i>Jiao</i> (China)	12
<i>Sugiyama</i> (Japão)	12
<i>Von Arx</i> (Suíça)	12
<i>Camarero</i> (Espanha)	11
<i>Carrer</i> (Itália)	11
<i>Fonti</i> (Suíça)	10

Fonte: A Autora (2026).

Entretanto, é fundamental ressaltar que a métrica de produtividade individual por autor, conforme padronizada pelo Scopus, pode ocultar polos de excelência regional quando analisada isoladamente. No Brasil, a dinâmica acadêmica segue uma lógica de orientação em que o primeiro autor é o estudante (mestrando ou doutorando) responsável pela execução técnica, enquanto o líder da pesquisa e orientador, que mantém a continuidade da linha de estudo, aparece como o último autor.

Dessa forma, a aparente ausência de nomes brasileiros nos 10 primeiros autores globais não reflete uma baixa produtividade, mas sim uma distribuição de méritos entre sucessivas gerações de pesquisadores. Na realidade, a ciência brasileira é sustentada por redes de coautoria coordenadas por especialistas que possuem um volume de publicações equivalente aos líderes internacionais (Tabela 3).

Tabela 3: Autores com maior número em publicações científicas.

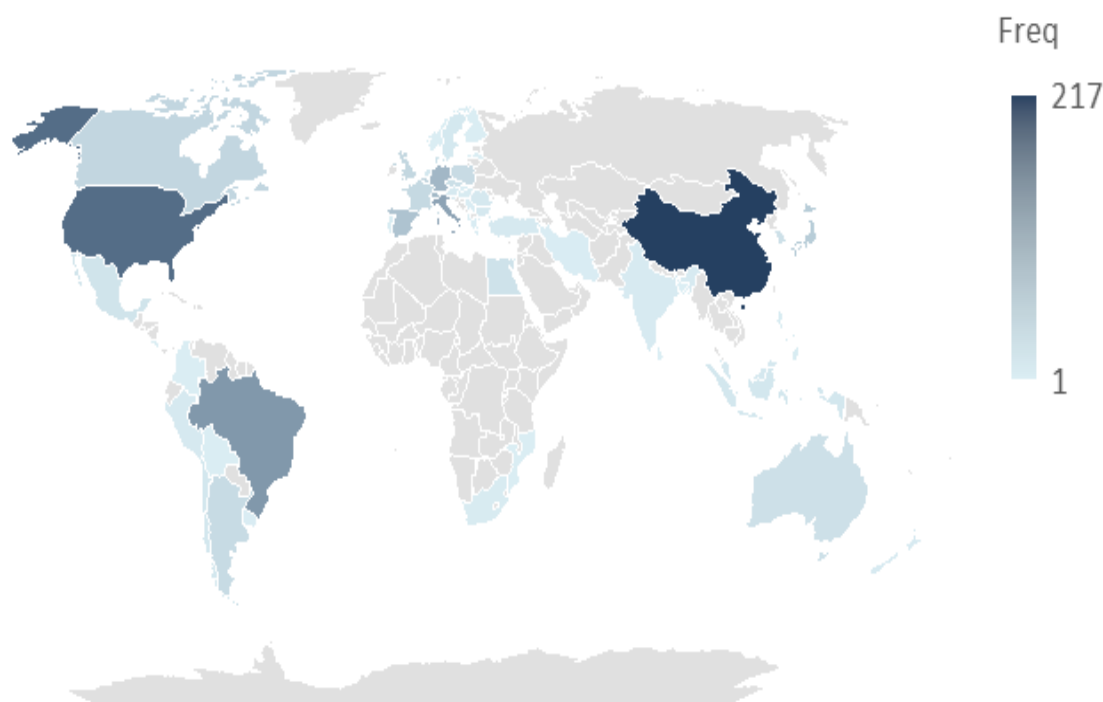
AUTORES BRASILEIRO	ARTIGOS
Togni	14
Nisgoski	12
Braga	11
Pastore	9
Oliveira	7

Fonte: A Autora (2026).

O mapa de produção científica por país (Figura 3) evidencia concentração em países com maior infraestrutura e investimentos em ciência e tecnologia, com liderança da China e dos Estados Unidos, seguidos por Alemanha, Brasil e Itália, enquanto outros países da América Sul, da Europa e Oceania apresentam menor volume de produção científica. Contudo, grande parte dos países africanos e de regiões da Ásia apresenta baixa ou inexistente produção científica indexada na base analisada, refletindo lacunas e a necessidade de expansão da colaboração internacional.

Entretanto, ainda que em menor número, foi verificado uma diversificação de países nas publicações, indicando um movimento gradual de internacionalização e disseminação do conhecimento na área. A presença de instituições de diferentes países demonstra que a pesquisa em anatomia da madeira, identificação e tecnologias associadas tem se expandido globalmente (Ergun, 2024; Tuncer, 2023).

Figura 3: Produção científica por países.



Fonte: A Autora (2026).

A análise da distribuição geográfica das publicações e dos artigos encontrados na base de dados Scopus (Tabela 4) revela forte participação de instituições de pesquisa da Europa, Ásia e América do Norte no desenvolvimento de métodos espectroscópicos, quimiométricos e de visão computacional. Em contraste, a América do Sul apresenta maior representatividade em estudos anatômicos clássicos, análise de densidade, identificação forense e desenvolvimento de chaves regionais, por ter menor investimento em estrutura de pesquisa aplicada a metodologias computacionais e pela alta demanda em identificação de espécies tropicais nativas, essas que ainda precisam de ser inseridas em banco de dados de tecnologias emergentes décadas (Lopes *et al.*, 2022).

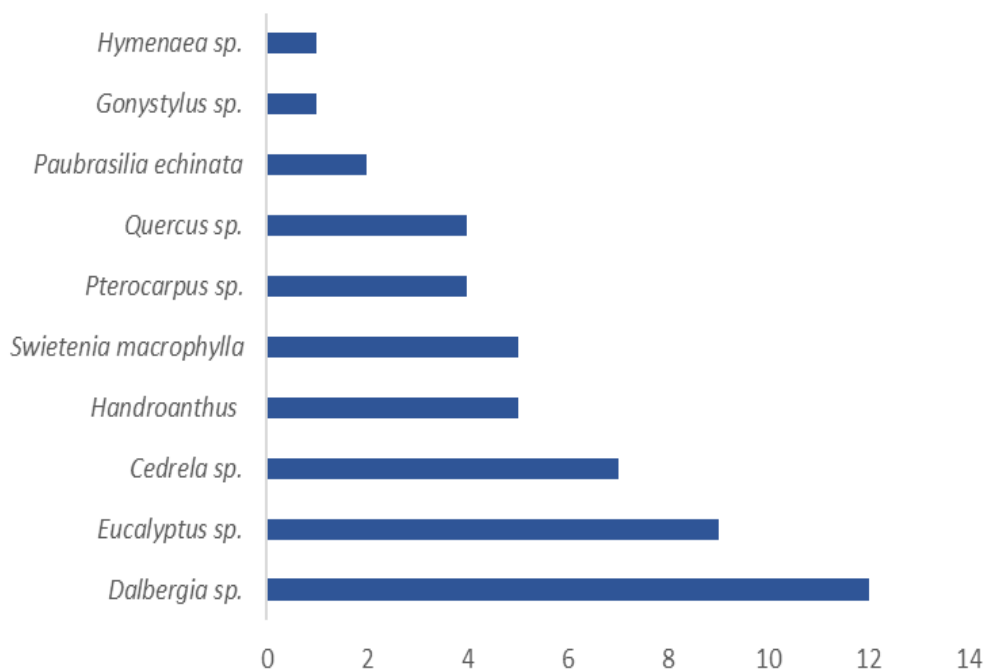
Tabela 4: Número de pesquisas em métodos de identificação da madeira por países.

País	Espectroscopia	DNA	<i>machine learning</i>	Anatomia	Isótopos
China	29	11	24	15	7
Estados Unidos	18	6	17	9	6
Brasil	11	3	11	27	1
Itália	5	4	7	8	7
Suíça	6	2	5	21	11

Fonte: A Autora (2026).

Em relação às espécies mais estudadas (Figura 4) observa-se predominância de gêneros e espécies de elevado valor comercial ou frequentemente associados a fraudes e exploração ilegal, *Pterocarpus* e *Gonystylus*, incluindo espécies listadas na CITES, como *Swietenia* sp., *Cedrela* sp., *Dalbergia* sp., além do gênero de *Eucalyptus*, e coníferas comerciais. Essas espécies são comumente utilizadas como modelos de desenvolvimento e validação de novas metodologias (Kwon *et al.*, 2017; Lacerda *et al.*, 2024; Ravindran *et al.*, 2018; Xue *et al.*, 2023). Esses resultados indicam que a escolha das espécies estudadas está diretamente associada tanto à relevância econômica quanto à necessidade de validação de métodos aplicáveis ao controle e à fiscalização do comércio madeireiro.

Figura 4: Espécies mais estudadas.

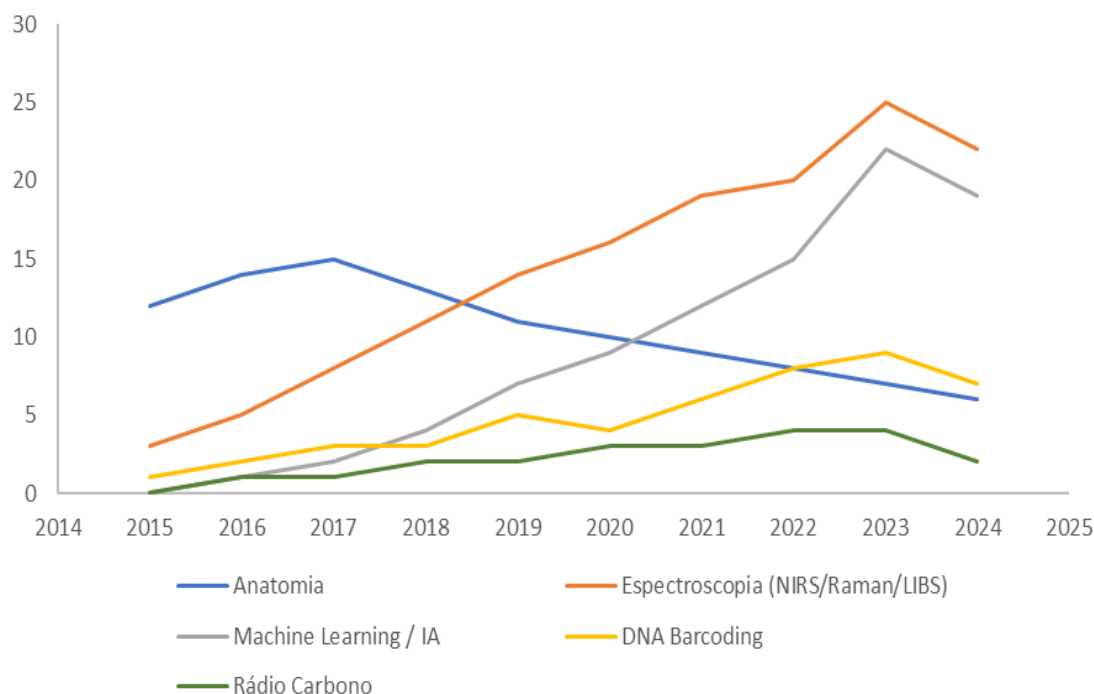


Fonte: A Autora (2026).

No que diz respeito às metodologias, ferramentas e tecnologias utilizadas na identificação de madeiras, observa-se uma evolução temporal ao longo do período analisado. Nos primeiros anos, predominam estudos fundamentados em abordagens clássicas de anatomia da madeira, tanto macroscópica quanto microscópica, que consolidaram a base científica da identificação (Gärtner *et al.*, 2015a; b).

A partir de 2017 (Figura 5) evidencia-se a ampliação do repertório metodológico, com o aumento de estudos que integram a anatomia da madeira a análises químicas, técnicas computacionais e modelos automatizados de identificação. Trabalhos que empregam espectroscopia, *machine learning* e visão computacional, ilustram a transição para abordagens híbridas, voltadas à rapidez, objetividade e potencial aplicação em campo (Lazarescu *et al.*, 2017; Kwon *et al.*, 2017; Rosa da Silva *et al.*, 2017).

Figura 5: Evolução de metodologia de identificação de madeira.



Fonte: A Autora (2026).

No contexto brasileiro, a identificação de madeiras ainda se apoia majoritariamente em métodos anatômicos clássicos e em estudos de identificação forense, que continuam sendo a base técnica mais utilizada para apoiar ações de controle e fiscalização ambiental devido à sua robustez e tradição metodológica. A revisão bibliométrica evidencia que, embora internacionalmente haja crescente adoção de abordagens híbridas e automatizadas, integrando anatomia, espectroscopia, análises de DNA e visão computacional, no Brasil as técnicas moleculares e espectroscópicas avançadas permanecem restritas a poucos centros de pesquisa, refletindo limitações de infraestrutura, calibração de modelos, custo elevado e escassez de profissionais especializados (Jesus *et al.*, 2024; Lacerda *et al.*, 2024; Lopes *et al.*, 2022).

Como uma das tendências mais recentes e relevantes para a fiscalização ambiental, o Serviço Florestal Brasileiro, em parceria com o Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime (UNODC) e a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), lançou o aplicativo *Lignum Brasilis*, baseado em inteligência artificial, que utiliza modelos treinados com milhares de imagens para apoiar a identificação rápida e precisa de espécies nativas em campo, fortalecendo a detecção de madeira de alto valor comercial e ameaçada de extinção e auxiliando na repressão à exploração ilegal (SFB/UNODC, 2025).

Mesmo assim, apesar de representar um avanço tecnológico significativo, essa e outras iniciativas ainda demandam ampliação de bases de dados, integração com sistemas de fiscalização, capacitação técnica e infraestrutura operacional para que possam ser adotadas de forma rotineira pelos órgãos de controle, especialmente em regiões remotas e com menor cobertura técnica.

5. CONCLUSÃO

A revisão bibliométrica realizada revelou um crescimento de produção científica na área, especialmente a partir de 2019, impulsionada pela demanda por rastreabilidade e pelo avanço de tecnologias aplicadas. Quanto às instituições, autores e países mais recorrentes, observou-se liderança da China, Estados Unidos e países europeus, com destaque para centros asiáticos no desenvolvimento de técnicas computacionais e espectroscópicas. O Brasil apresenta participação relevante, sobretudo em anatomia da madeira tradicional, ainda que com menor inserção em tecnologias de maior complexidade instrumental.

As pesquisas concentram-se em espécies de elevado valor comercial e espécies listadas na CITES, evidenciando a relevância da identificação madeireira para a fiscalização e o comércio internacional de produtos florestais. No que se refere às metodologias, a anatomia da madeira permanece como base técnica e científica da identificação, enquanto técnicas espectroscópicas, moleculares e computacionais representam tendências voltadas à automatização e à aplicação em campo. Contudo, a aplicação efetiva dessas metodologias é limitada pela necessidade de base de dados padronizados contendo diversidade de espécies, pela calibração adequada dos modelos e analíticos e pela capacitação técnica, especialmente no contexto brasileiro.

Como lacunas e perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de integração entre métodos tradicionais e emergentes, ampliação de bases de dados com espécies tropicais, validação de modelos em condições reais de fiscalização, maior cooperação internacional e fortalecimento da articulação entre centros de pesquisa e órgãos ambientais. Assim, conclui-se que a identificação madeireira evolui para um modelo integrado, no qual a anatomia continua sendo o fundamento científico, enquanto as tecnologias emergentes ampliam a precisão e o potencial de aplicação no controle do comércio ilegal de madeira.

6. REFERÊNCIAS

- Andrade, B. G. de; Basso, V. M.; Latorraca, J. V. de F. (2020). Visão mecânica para identificação de madeira em nível de campo. *Jornal IAWA*, 41 (4), 681-698. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10001>.
- Aria, M.; Cuccurullo, C. bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v.11, 959–975. 2017.
- BARROS JUNIOR, U. de O.; NUNES, S. M. V.; ARAUJO, S. de L.; CASTOR NETO, T. C.; SILVA, J. G. M. da; LEMOS, A. V.; VIDAURRE, G. B. Variabilidade longitudinal e radial da cor da madeira de *Corymbia* e sua relação com a densidade e o teor de extrativos. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 13, p. e11595, 2024.
- Bogun, A. C.; Paredes-Villanueva, Kathelyn, Mascarello, Maurizio and Magel, Elisabeth A.. "Development of a DNA macroarray for the molecular biological identification of trade-relevant tropical CITES timber species and their look-alikes" *Holzforschung*, vol. 78, no. 9, 2024, pp. 471-486. <https://doi.org/10.1515/hf-2023-0114>.
- Bösch, M. Qualidade institucional, desenvolvimento econômico e extração ilegal de madeira: uma análise quantitativa transnacional. *European Journal of Forest Research* 2021 , 140 , 1049–1064.
- BOTOSSO, P. C. **Identificação macroscópica de madeiras**: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. Disponível em: <https://lrfp.paginas.ufsc.br/files/2016/05/Documentos-194-EMBRAPA-identificaçãomacrosópica-de-Madeiras.pdf>.
- BRASIL. **Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Portaria nº 253, de 18 de agosto de 2006**. Institui o Documento de Origem Florestal - DOF. Brasília, DF: MMA, 2006.
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). **Instrução Normativa nº 21, de 23 de dezembro de 2014**. Estabelece procedimentos para o Sistema DOF. Brasília, DF: Ibama, 2014.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.
- Capano, M., Pignatelli, O., Capretti, C., Lazzeri, S., Pizzo, B., Marzaioli, F., Martinelli, N., Gennarelli, I., & Gigli, S. (2015). Anatomical and chemical analyses on wooden artifacts from a Samnite sanctuary in Hirpinia (Southern Italy). *Journal of Archaeological Science*, 57, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.03.002>.

CHIMELO, J.P. Disciplina 782 - **Identificação de madeiras**. Curso de pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Madeiras - ESLAQ/USP. 1992.

CITESwoodID. THÜNEN INSTITUTE; FEDERAL AGENCY FOR NATURE CONSERVATION (BfN). **CITESwoodID**: computer-aided identification of CITES-protected timbers. Braunschweig; Bonn, [20--?]. Disponível em: <http://www.delta-intkey.com/citeswood/en/index.htm>.

Deklerck, V.; Lancaster, C.A.; Van Acker, J.; Espinoza, E.O.; Van den Bulcke, J.; Beeckman, H. Chemical Fingerprinting of Wood Sampled along a Pith-to-Bark Gradient for Individual Comparison and Provenance Identification. *Forests* 2020, *11*, 107. <https://doi.org/10.3390/f11010107>

Deus, D. A. de, Zaú, A. S. ., Muniz, G. I. B. de ., Nisgoski, S. ., Abreu, H. dos S. ., & Gama, D. C. (2022). Lignina: uma importante tecnologia química da madeira. *E-Acadêmica*, 3(3), e7233391. <https://doi.org/10.52076/eacad-v3i3.391>

Dierickx, S., Genbrugge, S., Beeckman, H. *et al.* Identificação não destrutiva de madeira usando tomografia computadorizada de raios X (μ CT): qual resolução precisamos? *Plant Methods* 20 , 98 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01216-0>.

Dittmar, Herbert. (2021). OPERAÇÃO ARQUIMEDES E A DESTRUIÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA COM A ANUÊNCIA DO ESTADO. RECIMA21 - **Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218. 2. e210817. 10.47820/recima21.v2i10.817.

ELSEVIER. **Scopus: Content coverage guide**. Elsevier, 2023.

Ergun H. 2024. Wood identification based on macroscopic images using deep and transfer learning approaches. *Peer J* 12:e17021 <https://doi.org/10.7717/peerj.17021>

EVANGELISTA, W. V. (Org.). *Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisa e atualidades*. Guarujá: Editora Científica, 2021. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/books/978-65-89826-38-5.pdf>.

Ferreira, CA, Inga, JG, Vidal, OD, Goytendia, WE, Moya, SM, Centeno, TB, Vélez, A., Gamarra, D., e Tomazello-Filho, M. (2021). "Identificação de espécies arbóreas das florestas da Amazônia tropical peruana “Selva Central” de acordo com a anatomia da madeira", *BioResources* 16(4), 7161-7179. doi 10.15376/biores.16.4.7161-7179.

FLORSHEIM, SMB; RIBEIRO, AP; LONGUI, EL; DE ANDRADE, IM; SONSIN-OLIVEIRA, J.; CHIMELO, JP; SOARES, RK; GOUVEIA, TC; MARQUES, VN **Identificação macroscópica de madeiras comerciais do estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo**. 2020.

Gärtner, H., Banzer, L., Schneider, L., Schweingruber, F.H., Bast, A. Preparing micro sections of entire (dry) conifer increment cores for wood anatomical time-series analyses, **Dendrochronologia**, Volume 34, ,doi:10.1016/j.dendro.2015.03.004 (2015a).

Gärtner, H., Cherubini, P., Fonti, P., von Arx, G., Schneider, L., Nievergelt, D., Verstege, A., Bast, A., Schweingruber, F. H., Büntgen, U. A Technical Perspective in Modern Tree-ring Research - How to Overcome Dendroecological and Wood Anatomical Challenges. **Journal of Visualized Experiments** (97), e52337, doi:10.3791/52337 (2015b).

He, T., Jiao, L., Wiedenhoeft, AC *et al.* Abordagens de aprendizado de máquina superam métodos baseados em distância e em árvores para o código de barras de DNA da madeira de *Pterocarpus*. **Planta** 249 , 1617–1625 (2019). <https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00425-019-03116-3>

Hwang, SW., Kobayashi, K. & Sugiyama, J. Detecção e visualização de características locais codificadas como preditores anatômicos em imagens de seção transversal de Lauraceae. **J Wood Sci** 66 , 16 (2020). <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01864-5>.

IAWA COMMITTEE. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219–332, 1989.

IBAMA. **Instrução Normativa nº 21, de 24 de dezembro de 2014**. Estabelece normas para o controle da origem dos produtos florestais por meio do DOF.

Imaflora (Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola). Boletim Timberflow julho 2022. **Produção de madeira e diversidade de espécies arbóreas exploradas na amazônia brasileira**: situação atual e recomendações para o setor florestal. imaflora, 2022. nº 8. Disponível em: <https://timberflow.org.br/> Acesso em: julho, 2025.

INSIDEWOOD. **InsideWood database**. 2004 em diante. Publicado na Internet. <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

Instituto de Pesquisa Florestal e de Produtos Florestais. **Banco de Dados de Madeiras Japonesas do Instituto de Pesquisa Florestal e de Produtos Florestais**. Disponível online: <https://db.ffpri.go.jp/WoodDB/index-E.html>.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Identificação Macroscópicas de Madeiras**. José Zenid, Gregório C. T. Ceccantini. Laboratório de Madeira e Produtos Derivados Centro de Tecnologia de Recursos Florestais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. Abril de 2012.

JÁCOME, C. C.; DUARTE, P. J.; PIRES, M. R.; MORI, F. A.; LAFETÁ, B. O.; SARTORI, C. J. Anatomia macroscópica de madeiras comercializadas no município de São João Evangelista, estado de Minas Gerais, Brasil. **Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades**. São Paulo: Editora Científica Digital, p. 230-243, 2021.

JESUS, E.; FRANCA, T.; CALVANI, C.; LACERDA, M.; GONÇALVES, D.; OLIVEIRA, S. L.; MARANGONI, B.; CENA, C. *Making wood inspection easier: FTIR spectroscopy and machine learning for Brazilian native commercial wood species identification*. **RSC Advances**, 2024. DOI: 10.1039/D4RA00174E

Jiao, L., Yu, M., Wiedenhoeft, AC *et al.* Autenticação de código de barras de DNA e desenvolvimento de biblioteca para a madeira de seis espécies comerciais de *Pterocarpus*: o papel crítico dos espécimes de Xylarium. **Sci Rep** 8 , 1945 (2018). <https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-018-20381-6>

Jiao, L., Lu, Y., He, T., Guo, J., e Yin, Y. (2020). Código de barras de DNA para identificação de madeira: revisão global da última década e perspectiva futura. **IAWA Journal** 41, 4, 620-643, Disponível em: Brill <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10041>.

KOBAYASHI, Kayoko; KEGASA, Takahiro; HWANG, Sung-Wook; SUGIYAMA, Junji. Características anatômicas da madeira de *Fagaceae* extraídas estatisticamente por meio de abordagens de visão computacional: algumas relações com a evolução. **PLOS ONE**, v. 14, n. 8, e0220762, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0220762.

KWON, O.; LEE, H. G.; LEE, M. R.; JANG, S.; YANG, S. Y.; PARK, S. Y.; CHOI, I. G.; YEO, H. Automatic wood species identification of Korean softwood based on convolutional neural networks. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, 2017; 45 (6): 797 - 808. DOI: 10.5658/WOOD.2017.45.6.797.

Lacerda M, Franca T, Calvani C, Marangoni B, Teodoro P, Campos CNS, Baio F, Azevedo GB, Cena C. A simple method for Eucalyptus species discrimination: FTIR spectroscopy and machine learning, **Results in Chemistry**, Volume 7, 2024, 101233, ISSN 2211-7156, doi: 10.1016/j.rechem.2023.101233.

Lazarescu C, Hart F, Pirouz Z, et al. Identificação de espécies de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo. **International Wood Products Journal** . 2017;8(1):32-35. doi: 10.1080/20426445.2016.1242270.

Liu, S., He, T., Wang, J. *et al.* Os dados quantitativos de anatomia da madeira, aliados à análise de aprendizado de máquina, podem discriminar espécies CITES de suas semelhantes? **INSIDEWOOD. InsideWood database**. 56, 1567–1583 (2022). <https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00226-022-01404-y>

LOPES, D. J. V.; MOULIN, J.C.; MULIN, L.B.; BOBADILHA, G. S.; OLIVEIRA, R. F. Microscopic identification of brazilian commercial wood species via machine-learning. **CERNE**, v.28, e-102978, 2022. doi: 10.1590/01047760202228012978.

Luo, Li, Xu, Zhao-Jun and Na, Bin. "Building machine learning models to identify wood species based on near-infrared spectroscopy" **Holzforschung**, vol. 77, no. 5, 2023, pp. 326-337. <https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1515/hf-2022-0122>

Lucas, F.M.F., Araujo, E.C.G., Fiedler, N.C., Santana, J.A., da, S., Tetto, A.F., Perspective: scientific gaps on forest fires in Brazilian protected areas. **For. Ecol. Manage.** 529, 120739. 2023.

Ma, T., Kimura, F., Tsuchikawa, S., Kojima, M., e Inagaki, T. (2024). “Estudo de validação sobre a precisão prática da identificação de espécies de madeira *via* aprendizado profundo a partir de imagens microscópicas visíveis”, **BioResources** 19(3), 4838-4851. DOI: 10.15376/biores.19.3.4838-4851

Madeiras Brasileiras: banco de dados de espécies de madeira. Brasília: **Serviço Florestal Brasileiro**. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras>.

NG, Kevin Kit Siong; LEE, Soon Leong; TNAH, Lee Hong; NURUL-FARHANAHUM, Zakaria; NGUM, Chin Hong; LEE, Chai Ting; TANI, Naoki; DIWAY, Bibian; LAI, Pei Sing; KHOO, Eyen. Identificação forense de madeira: um estudo de caso de uma espécie listada na CITES, *Gonystylus bancanus* (Thymelaeaceae). **Forensic Science International: Genetics**, v. 23, p. 197–209, jul. 2016. DOI: 10.1016/j.fsigen.2016.05.002.

Ostapkowicz, Joanna. Fiona Brock, Alex C. Wiedenhoeft, Christophe Snoeck, John Pouncett, Yasmin Baksh-Comeau, Rick Schulting, Philippe Claeys, Nadine Mattielli, Mike Richards, Arie Boomert, Black pitch, carved histories: Radiocarbon dating, wood species identification and strontium isotope analysis of prehistoric wood carvings from Trinidad's Pitch Lake, **Journal of Archaeological Science: Reports**, Volume 16, 2017, Pages 341-358, ISSN 2352-409X, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.018>.

Prabu Ravindran, Frank C. Owens, Adam C. Wade, Rubin Shmulsky , Alex C. Wiedenhoeft. Towards Sustainable North American Wood Product Value Chains, Part I: Computer Vision Identification of Diffuse Porous Hardwoods JOURNAL=Frontiers in **Plant Science**. Volume 12 - 2021. DOI=10.3389/fpls.2021.758455

R Core Team, K., 2021. **R: a language and environment for statistical computing**.

Ravindran, P., Costa, A., Soares, R. *et al.* Classificação de imagens de madeira de Meliaceae neotropicais listadas na CITES e outras usando redes neurais convolucionais. **Plant Methods** 14 , 25 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0292-9>

Richter, HG, e Dallwitz, MJ 2000 em diante. **Madeiras comerciais: descrições, ilustrações, identificação e recuperação de informações.** Em inglês, francês, alemão, português e espanhol. Versão: 9 de abril de 2019. delta-intkey.com.

Rohmah Pari , Dyah Ayu Agustiningrum , Danang Sudarwoko Adi , Imran Arra'd Sofianto , Djarwanto , Raden Gunawan Hadi Rahmanto , Ratih Damayanti , Setiowati , Sung-Wook Hwang , Citra Oktapiani; Determinação de três espécies *de Shorea* por espectroscopia no infravermelho próximo e estruturas anatômicas. **Conferência AIP. Processo.** 13 de março de 2024; 2973 (1): 070012. <https://doi.org/10.1063/5.0184594>.

Rosa da Silva, N., De Ridder, M., Baetens, J.M. *et al.* Automated classification of wood transverse cross-section micro-imagery from 77 commercial Central-African timber species. **Annals of Forest Science**, 74, 30 (2017). <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0619-0>.

Rosa da Silva, N., Deklerck, V., Baetens, JM *et al.* Identificação aprimorada de espécies de madeira com base em imagens multivistas dos três planos anatômicos. **Plant Methods** 18 , 79 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00910-1>.

ROSSI, M. P. Combate ao transporte ilegal de madeira nativa: dificuldades enfrentadas pela polícia rodoviária federal na fronteira da amazônia legal em imperatriz/MA entre os anos de 2020 E 2023. **Revista (RE)DEFINIÇÕES DAS FRONTEIRAS**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 139–161, 2024. DOI: 10.59731/rdf.v2i6.94.

Santini Junior., Luiz. **Anatomia e identificação da madeira de 90 espécies tropicais comercializadas em São Paulo** / Luiz Santini Junior., Sandra Monteiro Borges Florsheim, Mario Tommasiello Filho. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **SFB e UNODC lançam o Lignum Brasilis**, aplicativo inovador de identificação de madeira baseado em IA. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/florestal/pt-br/assuntos/noticias/2025/dezembro/sfb-e-unodc-lancam-o-lignum-brasilis-aplicativo-inovador-de-identificacao-de-madeira-baseado-em-ia>

Sichen Liu, Guanben Du, Xin Ran, Hongxing Yang, Jiafeng Yuan, Yingchen Wu, Jun Li, Xu Lin, Wei Gao, Long Yang, Visual, customizable wood-based colorimetric test paper encapsulated with fluorescent carbon dots for rapid explosive detection, *Industrial Crops and Products*, Volume 194, 2023, 116398, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116398>.

Silva, JL; Bordalo, R.; Pissarra, J.; de Palacios, P. Identificação de madeira baseada em visão computacional: uma revisão. **Florestas**. 2022, 13, 2041. <https://doi.org/10.3390/f13122041>.

Soares LF, Silva DC da, Bergo MCJ, Coradin VTR, Braga JWB, Pastore TCM. AVALIAÇÃO DE ESPECTRÔMETRO NIR PORTÁTIL E PLS-DA PARA A DISCRIMINAÇÃO DE SEIS ESPÉCIES SIMILARES DE MADEIRAS AMAZÔNICAS. **Quím Nova** [Internet]. 2017. May;40(4):418–26. Available from: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170014>.

Stettinius A, Holmes H, Mehochko I, Griggs A, Zhang Q, Winters M, Maxwell A, Holliday J, Vlaisavljevich E. Timber DNA release using focused ultrasound extraction (FUSE) for genetic species identification. **Forensic Sci Int Genet.** 2024 Nov;73:103094. doi: 10.1016/j.fsigen.2024.103094. Epub 2024 Jul 25. PMID: 39059037.

Suraj Garg, Akanksha Sharma, Vishal Sharma, Geographical profiling of wood samples via ATR-FTIR spectroscopy and machine learning algorithms: Application in wood forensics. **Forensic Science International: Reports**, Volume 10, 2024, 100377, ISSN 2665-9107, <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2024.100377>.

Takeshi Fujiwara, Tomoyuki Fujii, Toshiaki Shiibayashi, Terunobu Suzuki and Yoshioki Hayashi: Construction of Data-Base on Properties of Woods from South-east Asia, **The International Conference on Forest Products**, 1996. <https://www2.ffpri.go.jp/fdb/esawoodq/wood.html>.

TEGEL, Willy; CROUTSCH, Christophe. *Wood anatomy and construction technique of Late Bronze Age rural cartwheels*. Journal of Archaeological Science: Reports, v. 7, p. 123–128, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.04.001>

Tuncer, F. D. (2023). Comparing modelling performance of chemometric methods for wood discrimination by near infrared spectroscopy. *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 422–433. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2039960>

VALDIONES, A. P. et al. A Evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020 e as oportunidades para o seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década. **SIMEX Network: Imazon, ICV, Imaflora, Idesam**, 2022.

Van Eck, N.J., Waltman, L., Software survey: vOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics** 84, 523–538. 2010.

WHEELER, E. A.; BAAS, P.; GASSON, P., E. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, 1989.

XYLOTRON. **Field-deployable machine vision wood identification system**. Disponível em: <http://xylotron.org/>. 2020.

Xue, X.; Chen, Z.; Wu, H.; Gao, H.; Nie, J.; Li, X. Identificação de oito espécies de *Pterocarpus* e duas espécies de *Dalbergia* usando imagens hiperespectrais

visíveis/infravermelhas próximas (Vis/NIR). **Forests** 2023, 14, 1259. <https://doi.org/10.3390/f14061259>.

Yang, X., Zheng, Z., Zheng, H. *et al.* Deep Learning Method of Precious Wood Image Classification Based on Microscopic Computed Tomography. *Russ J Nondestruct Test* 60, 1136–1148 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1061830924602447>

Zheng, C., Liu, S., Wang, J. *et al.* Abrindo a caixa preta: classificação explicável por aprendizado profundo de imagens microscópicas de madeira de espécies arbóreas ameaçadas de extinção. **Plant Methods** 20, 56 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01191-6>.