



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS RECIFE
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - ÊNFASE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

PEDRO VITOR FERREIRA DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CERA CUTICULAR FOLIAR DE
Paubrasilia echinata (FABACEAE) E POTENCIAL
QUIMIOTAXONÔMICO DOS *n*-ALCANOS**

Recife
2025

PEDRO VITOR FERREIRA DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CERA CUTICULAR FOLIAR DE
Paubrasilia echinata (FABACEAE) E POTENCIAL
QUIMIOTAXONÔMICO DOS *n*-ALCANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Ciências Biológicas - ênfase em ciências
ambientais do Campus Recife da
Universidade Federal de Pernambuco –
UFPE, na modalidade de monografia,
como requisito parcial para a obtenção do
grau de bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Antônio Fernando Morais de Oliveira
Departamento de Botânica - UFPE

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferreira de Lima, Pedro Vitor .

Caracterização química da cera cuticular foliar de *paubrasilia echinata* (Fabaceae) e potencial quimiotaxonômico dos n-alcanos / Pedro Vitor Ferreira de Lima. - Recife, 2025.

47p. : il., tab.

Orientador(a): Antônio Fernando Morais de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Biociências, Ciências Biológicas /Ciências Ambientais - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. n-Alcanos. 2. Composição química. 3. Lipídios cuticulares. 4. Quimiotaxonomia. I. Morais de Oliveira, Antônio Fernando . (Orientação). II. Título.

580 CDD (22.ed.)


PEDRO VITOR FERREIRA DE LIMA

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CERA CUTICULAR FOLIAR DE *Paubrasilia echinata* (FABACEAE) E POTENCIAL QUIMIOTAXONÔMICO DOS *n*-ALCANOS


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Ciências Biológicas - ênfase em ciências ambientais do Campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciências Biológicas.

Aprovada em: 17/11/2025


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO FERNANDO MORAIS DE OLIVEIRA**
Data: 17/11/2025 13:08:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Fernando Moraes de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **KARLA VIVIANE DE FIGUEIREDO LIMA**
Data: 18/11/2025 11:47:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karla Viviane de Figueiredo Lima (Examinador externo)
Secretaria de Educação e Esportes de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **JOSE JAILSON LIMA BEZERRA**
Data: 17/11/2025 13:31:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. José Jailson Lima Bezerra (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu irmão Caio Henrique que ainda em vida via um futuro para mim e tinha orgulho de quem eu seria, mesmo você não estando mais aqui saiba que consegui terminar e acredito que você estaria feliz com isso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, fé e sanidade para trilhar e concluir esta jornada de quatro anos.

À minha família, minha base e maior apoio. Em especial, às duas mulheres mais importantes da minha vida: minha mãe, **Rosemere**, por sua luta incansável e por sempre me proporcionar o melhor, mesmo diante das dificuldades; e minha avó, **Angelina**, que, com sua sabedoria e amor, está sempre ao meu lado, independentemente da idade ou das circunstâncias.

Meu sincero agradecimento ao professor **Antônio Fernando Moraes de Oliveira**, que me orientou desde o **PIBIC** até este **Trabalho de Conclusão de Curso**. Sob sua orientação, descobri uma área fascinante da Botânica, que despertou em mim um profundo interesse. Sua leveza e dedicação tornaram o aprendizado prazeroso e motivador.

Agradeço também à professora **Jarcilene Silva de Almeida**, minha “mãe acadêmica”, por ter me acolhido em seu laboratório no momento em que eu mais precisava de estágio. Sua orientação, apoio e incentivo foram fundamentais, especialmente na busca por oportunidades e bolsas durante a graduação.

Aos meus amigos da graduação: **Fábio, Jadson, Pablo, João, Kevin, Geyci, Laisa e Letícia** (Fabaceae) e **John, Geisi, Luisa (Biii), Joam, Malena, Eduarda, Artur, Ellen, e Antonia** (Biólogos?) sem vocês esse ambiente não seria o mesmo. Sempre terei comigo aqueles que estiveram ao meu lado e vocês são muito especiais na minha vida. Obrigado por tudo que vivemos e viveremos! Vocês tornaram a caminhada da graduação mais leve e divertida.

Obrigado também à minha querida “PLACA - **Lais, Andrey, Camila e Alinne**”, que, mesmo sendo de fora da faculdade, obrigada por estarem sempre presentes, mesmo sem entenderem totalmente o que eu vivia. Nosso “cafofo” e nossos momentos juntos sempre terão um lugar especial em meu coração.

Também agradeço ao grupo “**Nós 5**” e à minha melhor amiga **Maria**, que sempre me incentivaram e me deram forças para não desistir. A todos vocês, citados ou não, deixo meu mais sincero “muito obrigado”. Cada um teve um papel importante nesta trajetória.

Meu reconhecimento especial ao meu “coorientador não oficial”, **Erick Andrade da Silva**, pela paciência, disponibilidade e constante disposição em ajudar, mesmo sem que eu pedisse. Sua colaboração fez toda diferença.

Agradeço ainda à equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada e Fitoquímica (**LEAF**) do Departamento de Botânica da UFPE, pelo acolhimento e aprendizado, e ao suporte do Laboratório de Bioprospecção do Núcleo de Prospeção e Gestão da Biodiversidade do Nordeste (**NPGBio, FINEP**).

Por fim, agradeço a **mim mesmo**, por não ter desistido. Foram quatro anos intensos de alegrias, desafios, lágrimas, conquistas e muito crescimento pessoal. Essa jornada me moldou, e sou profundamente grato por tudo o que vivi e por todos que fizeram parte dela.

Muito obrigado!!!

*Seremos gratos
Por tudo que temos
Todos nós
Sempre juntos a sonhar
Cultivar nossa fé
Pra no fim da jornada
Compreender que outra vai começar*

(Irmão Urso, 2003).

RESUMO

As plantas estão frequentemente expostas a uma combinação de fatores ambientais adversos, incluindo elevação da temperatura, redução da disponibilidade hídrica, compactação do solo, elevada incidência de radiação solar e presença de poluentes atmosféricos. Esses estresses podem comprometer suas funções estruturais, resultando em ajustes fisiológicos e bioquímicos que contribuem para a tolerância a tais condições. As ceras cuticulares foliares representam importantes barreiras físico-químicas nas plantas, contribuindo para a redução da perda de água e para a defesa contra estresses ambientais. Diante da escassez de estudos sobre os constituintes cuticulares de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil), espécie endêmica da Mata Atlântica, este trabalho teve como objetivo caracterizar a composição química de suas ceras foliares e avaliar o potencial quimiotaxonômico dos *n*-alcanos. Folhas de seis indivíduos foram coletadas no Campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco, e a extração das ceras foi realizada com as folhas secas por imersão em clorofórmio. As análises químicas foram conduzidas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e cromatografia em camada delgada preparativa (CCD). O teor médio total de ceras foi de $111,12 \pm 23,92 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, indicando alta deposição cuticular. A fração lipídica foi composta predominantemente por *n*-alcanos (70,66%), seguida por ácidos graxos (6,83%), álcoois (6,06%) e ésteres (6,61%). Entre os constituintes identificados, destacaram-se o hentriacontano (*n*-C31) e o tritriacontano (*n*-C33) como principais componentes, além do nonacosano (*n*-C29) e da monopalmitina. Não foram identificadas diferenças qualitativas na composição química de *P. echinata*, entretanto, houve diferença quantitativa significativa. *Cenostigma pyramidale*, outra espécie da família Fabaceae, foi utilizada como grupo externo para a análise quimiotaxonômica. A análise fenética revelou a formação de dois grupos distintos, separando *P. echinata* de *C. pyramidale*, o que confirma a utilidade dos *n*-alcanos como marcadores quimiotaxonômicos.

Palavras-chave: *n*-Alcanos, Composição química, Lipídios cuticulares, Quimiotaxonomia.

ABSTRACT

Plants are frequently exposed to a combination of adverse environmental factors, including elevated temperatures, reduced water availability, soil compaction, high solar radiation, and the presence of air pollutants. These stresses can compromise their structural functions, resulting in physiological and biochemical adjustments that contribute to tolerance to such conditions. Leaf cuticular waxes represent important physicochemical barriers in plants, contributing to the reduction of water loss and defense against environmental stresses. Given the scarcity of studies on the cuticular constituents of *Paubrasilia echinata* (pau-brasil), an endemic species of the Atlantic Forest, this work aimed to characterize the chemical composition of its leaf waxes and evaluate the chemotaxonomic potential of *n*-alkanes. Leaves from six individuals were collected at the Recife Campus of the Federal University of Pernambuco, and wax extraction was performed on leaves dried by immersion in chloroform. Chemical analyses were conducted using gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS) and preparative thin-layer chromatography (TLC). The average total wax content was $111.12 \pm 23.92 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, indicating high cuticular deposition. The lipid fraction was predominantly composed of *n*-alkanes (70.66%), followed by fatty acids (6.83%), alcohols (6.06%), and esters (6.61%). Among the identified constituents, hentriacontane (*n*-C31) and tritriacontane (*n*-C33) stood out as the main components, in addition to nonacosane (*n*-C29) and monopalmitin. No qualitative differences were identified in the chemical composition of *P. echinata*; however, there was a significant quantitative difference. *Cenostigma pyramidale*, another species from the Fabaceae family, was used as an outgroup for chemotaxonomic analysis. Phenetic analysis revealed the formation of two distinct groups, separating *P. echinata* from *C. pyramidale*, which confirms the usefulness of *n*-alkanes as chemotaxonomic markers.

Keywords: *n*-alkanes, Chemical composition, Chemotaxonomy, Cuticular lipids

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Árvore de Pau-brasil.	16
Figura 2: Locais de ocorrência de Pau-brasil no território brasileiro.	17
Figura 3. Estruturas moleculares da brasilina (a) e brasileína (b)	18
Figura 4: Aspecto geral dos seis indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> estudados.	23
Figura 5: Locais de ocorrência dos seis indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> estudados e <i>C.pyramidale</i> .	24
Figura 6: Classes de constituintes (%) que compõe a cera cuticular foliar de quatro indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> .	28
Figura 7. Perfil cromatográfico (CCD) dos extratos cuticulares de indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> e <i>Cenostigma pyramidale</i> (P7) sob luz UV a 366 nm.	30
Figura 6. Fenograma do agrupamento UPGMA baseado em distância Euclidiana com base na distribuição quantitativa de <i>n</i> -alcanos cuticulares de diferentes indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> . <i>Cenostigma pyramidale</i> foi utilizada como grupo externo. Coeficiente de correlação cofenética ($r = 0,95$). Nonacosano (<i>n</i> -C29), hentriacontano (<i>n</i> -C31) e tritriacontano (<i>n</i> -C33).	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos indivíduos coletados.	24
Tabela 2 : Valores de massa total e teor total de ceras cuticulares ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) para os seis indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> estudados	27
Tabela 3. Composição relativa (%) da cera cuticular foliar de quatro indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> (P1 a P4).	29
Tabela 4. Distribuição e abundância de <i>n</i> -alcanos cuticulares foliares de indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> (P1 a P6) e <i>Cenostigma pyramidale</i> (P7).	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Fabaceae Lindl. e sua riqueza metabólica	15
2.1.2 <i>Paubrasilia echinata</i> : aspectos taxonômicos, ecológicos e químicos	16
2.3 Ceras cuticulares	19
2.4 Ceras cuticulares e o potencial quimiotaxonômico	20
3. OBJETIVOS	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Local de ocorrência das plantas	23
4.2 Coleta de material vegetal	24
4.3 Determinação da área foliar e extração de ceras cuticulares	25
4.4 Cromatografia gasosa e espectrometria de massas (GC-MS)	25
4.5 Cromatografia em camada delgada e isolamento dos <i>n</i> -alcanos	26
4.6 Análise de dados	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 Teor total de ceras cuticular foliar	27
5.2 Composição química da cera cuticular	27
5.3 Cromatografia em camada delgada preparativa	29
5.4 Quimiotaxonomia de <i>Paubrasilia echinata</i>	30
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS	37
ANEXO A - Cromatogramas (GC-MS) das ceras cuticulares foliares de quatro indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> . Nonacosano (<i>n</i> -C29), hentriacontano (<i>n</i> -C31) e tritriacontano (<i>n</i> -C33).	46
ANEXO B - Cromatogramas (GC-FID) das frações de <i>n</i> -alcanos das ceras cuticulares foliares de cinco indivíduos de <i>Paubrasilia echinata</i> . Heneicosano (<i>n</i> -C21), hentritriacontano (<i>n</i> -C31), tritriacontano (<i>n</i> -C33), tetracontano (<i>n</i> -C40). Picos em verde correspondem ao padrão de <i>n</i> -alcanos.	47

1. INTRODUÇÃO

As plantas que se desenvolvem em ambientes urbanos estão expostas a múltiplos tipos de estresse abiótico, como o efeito de ilhas de calor, a escassez hídrica, a compactação do solo, a elevada radiação solar e a poluição atmosférica (Calfapietra *et al.*, 2015). A metabolômica, ciência que investiga de forma abrangente o conjunto de metabólitos produzidos por organismos vivos, tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para compreender as respostas fisiológicas e bioquímicas das plantas diante dessas condições adversas (Figueiredo *et al.*, 2022).

Os metabólitos secundários exercem papéis ecológicos essenciais, incluindo a defesa contra herbívoros e patógenos, a atração de polinizadores e dispersores de frutos, a proteção contra radiação ultravioleta, o suporte estrutural e a inibição do crescimento de plantas competidoras (Yeats e Rose, 2013; Taiz e Zeiger, 2006). Quando associada à análise das ceras cuticulares, a metabolômica permite investigar não apenas a quantidade total de compostos, mas também sua qualidade química, revelando variações em classes como alcanos, álcoois e ésteres, alterações que podem refletir mecanismos adaptativos (Sumbur *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2017).

As ceras cuticulares são estruturas lipídicas depositadas na epiderme foliar que constituem uma das principais barreiras físicas das plantas frente ao ambiente. Desempenham funções cruciais na redução da perda de água, na proteção contra radiação ultravioleta, na resistência térmica e na defesa contra poluentes, microrganismos e insetos (Shi *et al.*, 2024). Além disso, modulam a refletância solar e influenciam as interações planta-ambiente. A composição química dessas ceras pode variar entre espécies, fases de desenvolvimento e condições microclimáticas (Jetter e Riederer, 2016). Do ponto de vista taxonômico, ceras cuticulares, especialmente os *n*-alcanos, são utilizados com finalidades quimiotaxonômicas (Maffei, 1996; Bakker e Alvarado, 2006; Costa Filho *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2012).

A família Fabaceae destaca-se por sua ampla diversidade, compreendendo cerca de 650 gêneros e 18 mil espécies distribuídas globalmente, adaptadas a diferentes biomas e condições ambientais (Lewis *et al.*, 2005). No Brasil, são registradas aproximadamente 2.807 espécies, caracterizadas por grande variação morfológica e diversidade de hábitos (BFG, 2015). Essa família apresenta 48

adaptações morfofisiológicas que conferem alta tolerância ao estresse hídrico, o que a torna relevante em programas de restauração ecológica (Gusmão *et al.*, 2016).

Entre suas representantes, destaca-se *Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, H.C. Lima & G.P. Lewis, o pau-brasil, espécie endêmica da Mata Atlântica, símbolo nacional brasileiro e atualmente classificada como “Criticamente em perigo” (CR) (CNCFlora, 2025). Historicamente explorada pela qualidade de sua madeira e pigmentos, a espécie vem sendo incorporada a projetos de arborização urbana, adaptando-se a condições microclimáticas distintas de seu habitat natural, como temperaturas elevadas, alta radiação solar e solos compactados ou com baixa umidade (Cunha *et al.*, 1992).

Apesar de sua relevância ecológica e simbólica, ainda são escassos os estudos que investigam os mecanismos bioquímicos de adaptação como a cutícula ou seus constituintes de *P. echinata* em ambientes urbanos (Andrade e Silva, 2017; Andrade *et al.*, 2022).

Estudos prévios demonstram que o déficit hídrico induz aumento na deposição de ceras e modificações estruturais como a elevação na proporção de alcanos de cadeia longa, evidenciando plasticidade química e funcional (Xue *et al.*, 2017; Ramos Campos *et al.*, 2013). Assim, a análise integrada do perfil metabolômico das ceras cuticulares foliares de *P. echinata* pode revelar assinaturas químicas associadas à adaptação ou vulnerabilidade da espécie em ambientes urbanos. É conhecido que os *n*-alcanos cuticulares, por exemplo, são úteis para estabelecimento de grau de afinidade entre as espécies, sendo, portanto, utilizados como marcadores quimiosistemáticos (Costa Filho *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2012).

Diante da relevância ecológica, histórica e cultural de *P. echinata*, compreender seus mecanismos de adaptação metabólica a diferentes condições ambientais é fundamental. Apesar de seu uso crescente em arborização, faltam estudos que relacionem o metabolismo secundário da espécie às condições de estresse urbano. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo compreender a composição química das ceras cuticulares foliares de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) e o potencial dos *n*-alcanos como marcadores quimiosistemáticos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fabaceae Lindl. e sua riqueza metabólica

Fabaceae Lindl. figura entre as maiores famílias botânicas, abrangendo cerca de 650 gêneros e aproximadamente 18.000 espécies distribuídas de forma cosmopolita, o que evidencia sua notável capacidade de adaptação a uma ampla variedade de ecossistemas (Ahmad *et al.*, 2016; Souza, 2012; EMBRAPA, 2021). No Brasil, essa diversidade é particularmente expressiva, com o registro de cerca de 200 gêneros e 1.500 espécies, tornando o país um importante centro de biodiversidade para o grupo (Queiroz, 2009; EMBRAPA, 2021).

A importância das Fabaceae transcende sua amplitude taxonômica, estendendo-se a contribuições fundamentais para a agricultura sustentável e a segurança alimentar. Muitas espécies são capazes de fixar biologicamente o nitrogênio atmosférico, enriquecendo o solo e contribuindo para o aprimoramento das práticas agrícolas, além de fornecerem alimentos essenciais como leguminosas comestíveis e forrageiras de alto valor nutricional e econômico (Souza, 2012; Ahmad *et al.*, 2016).

Do ponto de vista ecológico, Fabaceae demonstra extraordinária plasticidade fenotípica, permitindo sua colonização de ambientes como florestas densas (Polhill, 1994). Essa resiliência se manifesta em respostas adaptativas a estresses abióticos, especialmente à deficiência hídrica, nas quais as plantas desenvolvem mecanismos morfológicos e bioquímicos de tolerância, como o aprofundamento do sistema radicular, a redução foliar e a síntese de solutos osmóticos que contribuem para a manutenção da homeostase celular (Chakraborty, 2015).

Além disso, Fabaceae é reconhecida por sua rica diversidade metabólica, caracterizada pela produção de uma ampla gama de metabólitos secundários, principalmente polifenóis, que desempenham funções ecológicas e fisiológicas relevantes. Dentre os compostos mais representativos destacam-se antocianinas, flavonoides, ácidos fenólicos, taninos, procianidinas e terpenos, cuja biossíntese está fortemente relacionada à via do ácido chiquímico, resultando em elevadas concentrações em diversas angiospermas da família (Lima, 2018; Santos-Sánchez, 2019). Outras classes, como alcaloides e terpenoides, também são amplamente

encontradas (Rocha e Silva *et al.*, 2007). Tais compostos conferem vantagens adaptativas, atuando como antioxidantes contra danos induzidos pela radiação ultravioleta e como agentes de defesa contra patógenos e herbívoros. Paralelamente, esses metabólitos despertam crescente interesse em áreas como farmacologia, nutrição e biotecnologia, devido ao seu potencial bioativo (Veitch, 2013; Havsteen *et al.*, 2002; Niveltdt *et al.*, 2001). A composição química diversificada da Fabaceae reforça, portanto, seu papel estratégico tanto na conservação ambiental quanto no desenvolvimento sustentável.

2.1.2 *Paubrasilia echinata*: aspectos taxonômicos, ecológicos e químicos

A espécie atualmente reconhecida como *Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, H.C.Lima & G.P.Lewis foi originalmente descrita por Lamarck (1785) sob o nome *Caesalpinia echinata* Lam. (Figura 1). Estudos filogenéticos recentes demonstraram características morfológicas e genéticas singulares que justificaram sua alocação em um gênero monoespecífico, proposta por Gagnon *et al.* (2016), consolidando o gênero *Paubrasilia* dentro da subfamília Caesalpinioideae. Essa subfamília compreende cerca de 60 gêneros e 2.700 espécies, distribuídas principalmente em regiões tropicais e subtropicais (EMBRAPA, 2021).

Figura 1: Árvore de Pau-brasil.



Fonte: Autor, 2025

Conhecida popularmente como pau-brasil, *P. echinata* é uma espécie endêmica da Mata Atlântica, com ocorrência registrada nos estados do Espírito Santo, Alagoas, Bahia, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco (Borges apud Aguiar e Aoki, 1983). Em Pernambuco, populações remanescentes são encontradas na Reserva Ecológica de Tapacurá, em São Lourenço da Mata, estendendo-se até Vitória de Santo Antão (Figura 2).

Figura 2: Locais de ocorrência de Pau-brasil no território brasileiro.



Fonte: Autor, 2025

A espécie pode atingir 30 metros de altura e 60 cm de diâmetro em condições naturais, apresentando copa irregular ou arredondada, folhas compostas, flores amarelas e frutos do tipo vagem deiscente e espinescente. Sua madeira avermelhada, de alta densidade e durabilidade, foi amplamente explorada, conferindo-lhe valor histórico e comercial (Cunha, *et. al.*, 1992; Borges, 2009). Historicamente, a exploração intensiva da espécie, motivada pelo uso de seu corante vermelho (brasilina) e da madeira na fabricação de instrumentos musicais, levou à sua quase extinção comercial, resultando na inclusão do pau-brasil na lista oficial de espécies ameaçadas (Cunha *et. al.*, 1992; IUCN, 1998).

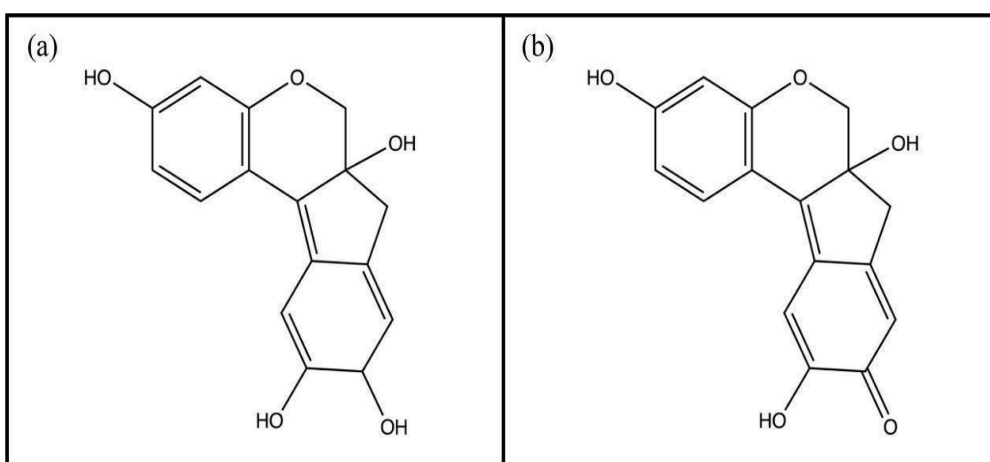
Ecologicamente, *P. echinata* é uma espécie heliófita, com adaptações a ambientes de alta luminosidade, que favorecem o desenvolvimento radicular e o

crescimento em áreas abertas (Lorenzzi, 2002). Essas características tornam-na relevante em processos de sucessão ecológica e restauração de ecossistemas degradados (Mitsumori, 2018).

O bioma Mata Atlântica, onde *P. echinata* é endêmica, é de vital importância ecológica e socioeconômica, abrigando cerca de 120 milhões de brasileiros e contribuindo com aproximadamente 70% do PIB nacional (IBF, 2020). Apesar do aumento de áreas protegidas, grande parte de sua vegetação nativa permanece fragmentada e vulnerável à pressão antrópica (ICMBio, 2007). Atualmente, o pau-brasil tem sido utilizado de forma sustentável em arborização urbana e paisagismo, valorizando suas características estéticas e adaptativas (Aguiar *et al.*, 2007).

Quimicamente *P. echinata*, destaca-se pela presença da brasilina, cujo derivado oxidado, a brasileína ($C_{16}H_{14}O_5$), um composto pertencente a subclasse dos homoisoflavonoides, um tipo raro e flavonoides (Mottaghipisheh e Stuppner, 2021) (Figura 3). Apresenta atividade neuroprotetora e anti-inflamatória, com potenciais aplicações farmacológicas (Bastos apud Silva., 2006). Além disso, são relatadas propriedades adstringentes, antimicrobianas e antioxidantes, atribuídas principalmente aos extratos da casca (Ramalho apud Aguiar, 2007; Campos, 2015). Outros estudos apontam que extratos de *P. echinata* apresentam atividade antitumoral em modelos experimentais, com redução significativa de tumores em camundongos (Gomes *et al.*, 2014). Tais resultados reforçam o potencial bioativo e biotecnológico da espécie, cuja exploração sustentável pode aliar conservação ambiental e inovação farmacêutica.

Figura 3. Estruturas moleculares da brasilina (a) e brasileína (b)



Fonte: Rondão *et al.* (2013)

2.3 Ceras cuticulares

O termo cutícula significa “pele fina”, o que reflete bem seu papel de agir como uma fina barreira de proteção frente a estresses ambientais (Riederer, 2006). A cutícula pode ser encontrada em toda planta como superfície foliar, flores, frutos e caule em crescimento primário, com exceção da raiz, visto que não seria favorável para absorção de água e em caules de crescimento secundário (Taiz e Zeiger, 2006; Jefferie, 2006).

Quimicamente, a cutícula vegetal é constituída por uma matriz polimérica insolúvel e também por lipídios solúveis (ceras). Sua matriz polimérica (Insolúvel) é composta principalmente por ácidos graxos que possuem cadeias carbônicas de cadeias longas, como C16 e C18 (Baker, 1982). Já os lipídios (constituintes cerosos) podem ser formados por uma mistura de compostos de cadeia alifática como *n*-alcanos, álcoois, ésteres, ácidos graxos e cetonas (Barthlott, 1998; Jetter, 2006; Dragota *et al.* 2007). Tanto a matriz polimérica quanto os lipídios podem ser denominados respectivamente de cutina e cera cuticular, respectivamente.

A formação de uma barreira hidrofóbica sobre as partes aéreas das plantas vasculares é apontada como um elemento fundamental para a adaptação dos vegetais ao ambiente terrestre (Baker, 1982, Oliveira e Salatino, 2000; Oliveira *et al.*, 2003). Essa estrutura, conhecida como cutícula, recobre as folhas e atua como tecido de proteção, garantindo maior resistência frente a diferentes condições adversas do ambiente, notadamente conferir proteção contra a perda de água em ambientes sujeitos a déficit hídricos (Riederer e Schreiber, 2001). Além disso, possui outras funções como a defesa contra o ataque de patógenos (ex. microrganismos e insetos) e a proteção contra radiação solar excessiva (Eigenbrode e Esperlie, 1995; Buschhaus e Jetter, 2011; Pfundel *et al.*, 2006).

As ceras cuticulares, possuem diversos compostos em sua composição, dentre eles, destacam-se os triterpenos que estão localizados frequentemente no compartimento de cera intracuticular (Jetter e Schäffer, 2001). Esses compostos são amplamente utilizados na indústria farmacêutica, visto que possuem inúmeras atividades biológicas, como propriedades anti-inflamatórias, antibacterianas, antivirais (incluindo anti-HIV), imunomoduladoras, e redutoras do colesterol, cicatrizantes, anticoagulantes (Szakiel, 2012).

Estudos sobre as ceras cuticulares de *P. echinata* podem permitir compreender respostas adaptativas ao estresse ambiental, evidenciando ajustes na composição lipídica frente à radiação UV, poluição atmosférica e déficit hídrico. Andrade e Silva (2017) investigaram os efeitos da chuva ácida simulada na morfoanatomia de folhas de duas espécies nativas da Mata Atlântica brasileira: *P. echinata* e *Libidibia ferrea* var. *leiostachya*. Eles observaram que *P. echinata* mostrou-se mais sensível, apresentando sintomas mais precoces, mas o dano anatômico em *L. ferrea* var. *leiostachya* foi mais severo. Ao testar um conjunto de características epidérmicas em duas espécies de leguminosas com características químicas, físicas e micromorfológicas contrastantes da superfície foliar, a retenção de material particulado foi significativamente maior em *P. echinata* (Andrade *et al.*, 2022).

2.4 Ceras cuticulares e o potencial quimiotaxonômico

A quimiotaxonomia, também denominada taxonomia química, constitui uma vertente da sistemática biológica que utiliza características químicas, especialmente os metabólitos secundários, como critérios complementares na identificação e classificação de organismos vegetais (Umoh, 2020). Tradicionalmente, a taxonomia baseava-se predominantemente em caracteres morfológicos, como forma, estrutura foliar e floral; contudo, com o avanço das técnicas analíticas instrumentais, tornou-se possível empregar perfis químicos como ferramentas taxonômicas. Esses metabólitos exibem padrões específicos e consistentes dentro de determinados grupos taxonômicos, permitindo uma abordagem mais precisa e integrativa (Wink, 2018).

Os metabólitos secundários são produtos do metabolismo vegetal que, embora não participem diretamente de processos vitais como crescimento e reprodução, refletem adaptações evolutivas e filogenéticas (Dixon *et al.*, 2024). Entre as principais classes destacam-se alcaloides, flavonoides, terpenoides e compostos fenólicos, os quais podem atuar como marcadores taxonômicos em função de sua distribuição diferencial entre famílias, gêneros e espécies (Amin, 2025). O emprego desses compostos em estudos sistemáticos é de grande relevância, uma vez que muitos apresentam rotas biossintéticas conservadas, o que possibilita identificar

relações de parentesco entre táxons e distinguir espécies morfológicamente semelhantes (Pilon *et al.*, 2020). Em Fabaceae, alguns estudos quimiotaxonômicos baseados no perfil de *n*-alcanos já foram realizadas em algumas espécies como *Robinia pseudoacacia* L. (Bakker e Alvarado, 2006), *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis (Ribeiro *et al.*, 2021), *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze (Pereira *et al.*, 2003), *Lupinus* spp. (Merino *et al.*, 1999) e para representantes pertencentes à família Papilionoideae (Maffei, 1996).

Segundo Cerda-Peña *et al.* (2022), as ceras cuticulares têm se mostrado úteis como marcadores sistemáticos, pois suas variações composicionais, especialmente no perfil de *n*-alcanos, podem refletir diferenças taxonômicas em níveis de família, gênero e espécie. Esses hidrocarbonetos lineares constituem componentes importantes das ceras epicuticulares foliares e são amplamente distribuídos no reino vegetal. A variação no comprimento da cadeia carbônica e nas proporções relativas entre homólogos fornece parâmetros químicos consistentes para a diferenciação taxonômica.

Estudos demonstram que os perfis de *n*-alcanos refletem tanto características genéticas intrínsecas quanto respostas adaptativas às condições ambientais, sendo, portanto, indicadores valiosos em análises comparativas de espécies relacionadas (Thomas *et al.*, 2021). Entretanto, deve-se considerar que fatores ambientais e fisiológicos, como idade foliar, estação do ano e condições de estresse abiótico, podem influenciar a composição das ceras e, conseqüentemente, a proporção dos *n*-alcanos. Dessa forma, a interpretação dos resultados quimiotaxonômicos deve ser conduzida com cautela e, preferencialmente, associada a dados morfológicos e moleculares, a fim de garantir maior robustez e confiabilidade às inferências taxonômicas (Wink, 2018).

3. OBJETIVOS

Objetivo geral

Compreender a diversidade química e o perfil metabolômico das ceras cuticulares foliares de diferentes indivíduos de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) e o potencial dos *n*-alcanos como marcadores quimiosistemáticos.

Objetivos específicos

Especificamente, o trabalho propõe: (i) Quantificar o teor de cera cuticular de *P. echinata*; (ii) caracterizar quimicamente a composição das ceras cuticulares foliares por GC-MS; e (iii) utilizar o perfil de *n*-alcanos como marcadores quimiotaxonômicos utilizando *C. pyramidale* como grupo externo para comparação com *P. echinata*.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de ocorrência das plantas

A população de *Paubrasilia echinata* estudada está localizada na Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife (08°03'01"S, 34°56'54"W). A área apresenta alta densidade de ocupação humana e baixa cobertura vegetal, características típicas de ambientes urbanos (Figura 2). O clima local é classificado como tropical úmido, com temperatura média anual de aproximadamente 26 °C e precipitação anual esperada de 988 mm, onde setembro apresentou precipitação de 100,4mm (APAC, 2025).

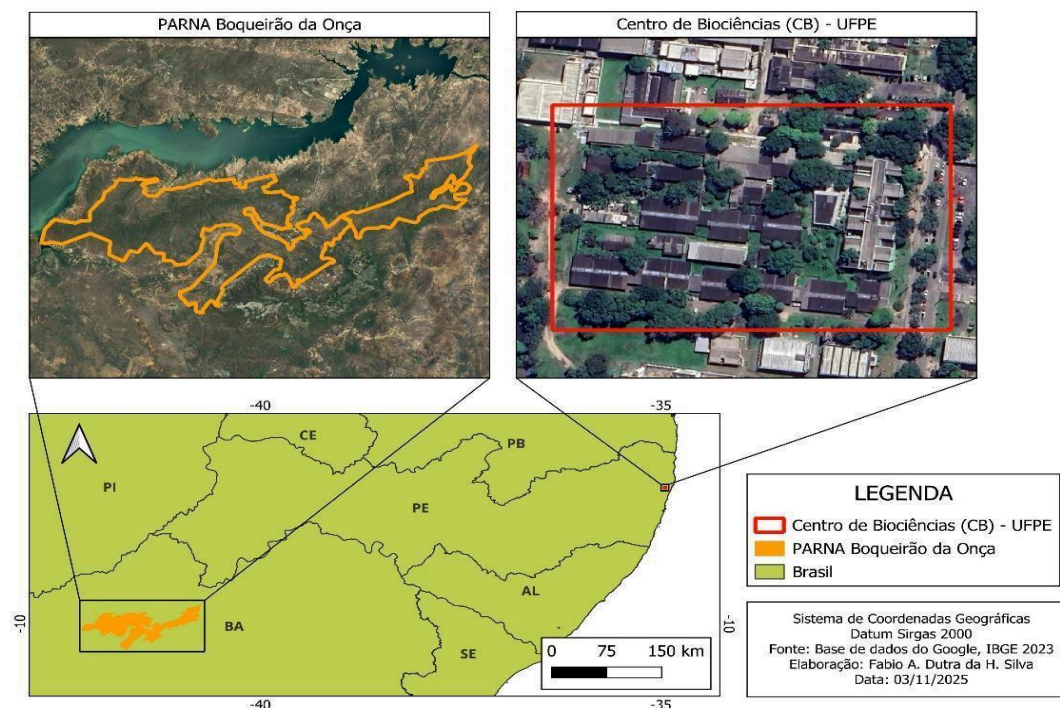
Adicionalmente, foram coletadas amostras de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis (FABACEAE) provenientes do Parque Nacional do Boqueirão da Onça (BA) nas coordenadas 9°55'22.0"S 41°09'19.1"W, visando compor um grupo externo para os estudos quimiotaxonômicos (Figura 3).

Figura 4: Aspecto geral dos seis indivíduos de *Paubrasilia echinata* estudados.



Fonte: Autor, 2025

Figura 5: Locais de ocorrência dos seis indivíduos de *Paubrasilia echinata* estudados e *C. pyramidale*.



Fonte: Silva, 2025

4.2 Coleta de material vegetal

Foram coletados ramos *P. echinata* no mês de setembro de 2025, a amostra foi depositada no herbário UFP - Geraldo Mariz sob o número UFP 102.926. Foi utilizado aproximadamente 30 ou mais foliólulos para a extração de cera cuticular e aproximadamente 100 foliólulos adicionais para extração e isolamento dos *n*-alcanos. Os indivíduos foram previamente georreferenciados com o aplicativo GPS Map Câmera V1.8.2. Todo o material foi seco em estufa por quatro dias a 55 °C e acondicionado separadamente em recipientes distintos.

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos indivíduos coletados.

Identificação	Local de coleta	Latitude	Longitude
P1	Recife, PE	8°03'00"S	34°56'56"W
P2	Recife, PE	8°03'00"S	34°56'56"W
P3	Recife, PE	8°03'00"S	34°56'56"W
P4	Recife, PE	8°03'00"S	34°56'55"W
P5	Recife, PE	8°02'59"S	34°56'53"W
P6	Recife, PE	8°03'00"S	34°56'52"W
P7	Boqueirão da Onça (BA)	9°55'22.0"S	41°09'19.1"W

Fonte: Autor, 2025. P1 a P6 = *Paubrasilia echinata*; P7 = *Cenostigma pyramidale*

4.3 Determinação da área foliar e extração de ceras cuticulares

A área foliar foi determinada utilizando o software ImageJ (versão 1.53t). Trinta folíolos totalmente expandidos e sem injúrias, provenientes de cada um dos seis indivíduos de *P. echinata*, foram escaneados separadamente. Para o cálculo do teor de cera, a área foliar (folíolos) de cada indivíduo foi multiplicada por dois, correspondendo às superfícies adaxial e abaxial das folhas.

A extração das ceras cuticulares seguiu o protocolo descrito por Silva *et al.* (2017), utilizando duas imersões sucessivas dos folíolos em clorofórmio por 60 segundos cada. O extrato obtido foi concentrado em rotaevaporador, e o teor de cera foi determinado pela razão entre a massa extraída e a área dos folíolos, sendo os resultados expressos em $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

O mesmo procedimento foi adotado para a extração das ceras de *C. pyramidale*, com exceção do cálculo da área foliar, que não foi realizado para essa espécie, pois a mesma foi utilizada apenas como grupo taxonômico.

4.4 Cromatografia gasosa e espectrometria de massas (GC-MS)

As análises qualitativas e quantitativas dos constituintes cuticulares foram conduzidas em cromatógrafo gasoso acoplado a espectrômetro de massas (GC-MS/MS, modelo TQ8040NX, NX, Shimadzu, Kyoto, Japão). A cera bruta de cada indivíduo foi derivatizada com 60 μL de N,O-bis(trimetilsil)trifluoroacetamida (BSTFA, Sigma-Aldrich) e 40 μL de piridina, mantendo a mistura em banho-maria a 60 °C por 1 hora. Foi utilizado uma coluna Shimadzu SH-5MS (30 m \times 0,25 mm \times 0,25 μm) com as seguintes condições operacionais: temperatura inicial do forno de 100 °C (mantida por 3 min), aumento de 10 °C/min até 300 °C (mantida por 30 min), totalizando 50 min de corrida. As temperaturas do injetor, da fonte de íons e da interface foram ajustadas para 250 °C, 250 °C e 300 °C, respectivamente. A ionização foi realizada por impacto eletrônico (70 eV) no modo de aquisição full-scan, com faixa de detecção entre 45–750 m/z. A identificação dos compostos foi efetuada por comparação dos espectros de massa com os registros da biblioteca NIST 2020 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA).

4.5 Cromatografia em camada delgada e isolamento dos *n*-alcanos

Aproximadamente 50 g de sílica gel GF 254 nm (Sigma-Aldrich) foram solubilizadas em uma solução aquosa de fluoresceína sódica a 0,02%. Após a ativação das placas em estufa a 110 °C por 30 minutos, o extrato cuticular de *C. pyramidale* e *P. echinata* foram submetidos à cromatografia em camada delgada preparativa, utilizando *n*-hexano como fase móvel. Ao término da corrida, a placa foi exposta à luz UV a 366 nm, permitindo a visualização das bandas fluorescentes. A faixa superior, correspondente aos *n*-alcanos, foi cuidadosamente removida, filtrada e analisada por cromatografia gasosa com detector de ionização em chama (GC-FID 2010Plus, Shimadzu), seguindo o mesmo programa cromatográfico previamente descrito.

A identificação e quantificação dos *n*-alcanos foram realizadas por comparação dos tempos de retenção com padrões autênticos de uma solução de *n*-alcanos C21–C40 (Fluka S.A., Costa Rica), conforme o método descrito por Silva *et al.* (2012). A correlação cofenética foi gerada (algoritmo COPH) para verificar a adequação entre o cluster no dendrograma e a matriz de coeficientes de similaridade.

4.6 Análise de dados

A análise de variância (ANOVA) foi conduzida, seguida do teste de Tukey para comparação de médias, considerando um nível de significância de $P < 0,05$, utilizando o software Minitab ver. 22.2.1. A distribuição quantitativa dos *n*-alcanos foi avaliada por meio de análise de agrupamento hierárquico, empregando distância euclidiana e o método de ligação UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean), com o auxílio do software NTSYS ver. 2.11. As concentrações de *n*-alcanos inferiores a 0,5% foram excluídas da análise estatística.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teor total de ceras cuticular foliar

O teor total de ceras cuticulares dos seis indivíduos de *P. echinata* variou de 73,43 a 141,72 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Tabela 2). A média do teor de cera entre os seis indivíduos de *P. echinata* amostrados foi de $111,12 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 23,92 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ de cera para cada um conjunto de 30 foliólulos analisados. Este valor equivale a 51,8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ de cera por folíolo. Ainda assim, este número deve ser visto com ressalva, pois há variação morfológica, particularmente no número de pinas e na forma e tamanho dos folíolos em *P. echinata* (Gagnon *et al.*, 2025). Segundo Baker (1982), teores de ceras acima de 60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, são considerados altos. Deste modo, considerando a variação populacional, para os indivíduos estudados, *P. echinata* destaca-se como espécie com relevante teor de cera cuticular.

Tabela 2: Valores de massa total e teor total de ceras cuticulares ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) para os seis indivíduos de *Paubrasilia echinata* estudados.

Indivíduos	Frasco (g)	Frasco pós extração (g)	Massa total de Cera (μg)	Área de 30 foliólulos (cm^2)	Teor de Cera ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
P1	25,7567	25,778	21,300	189.426	112,44
P2	25,4333	25,4542	20,900	193.806	107,83
P3	25,8600	25,8800	20,000	272.244	73,46
P4	25,2162	25,2401	23,900	237.660	100,56
P5	25,2284	25,2508	22,400	171.364	130,71
P6	25,2591	25,2797	20,600	145.350	141,72

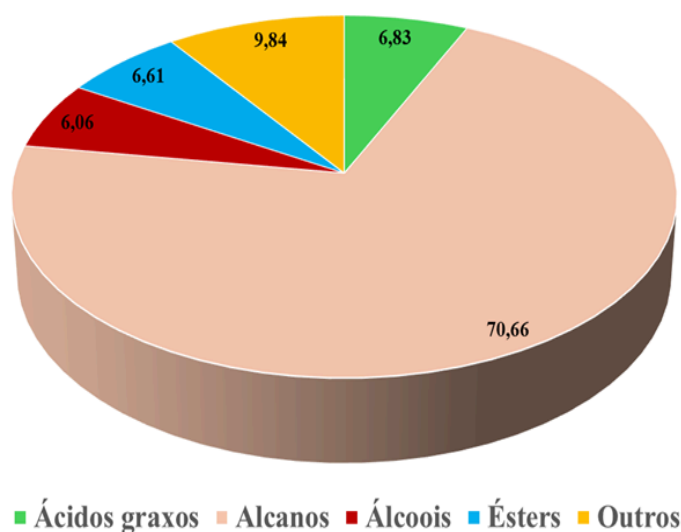
Fonte: Autor, 2025

5.2 Composição química da cera cuticular

Nas análises por GC-MS foi verificado que os principais componentes presentes na cera cuticular de *P. echinata* são os *n*-alcanos (70,66%) seguindo por ácidos graxos, álcoois primários e ésteres (figura 4). Essa composição é consistente

com a literatura sobre ceras cuticulares, onde ceras são complexas misturas de lipídios predominantemente alifáticos (Jetter *et al.*, 2006). Vale salientar que dos seis indivíduos amostrados, dois deles (P5 e P6) não puderam ter sua composição conhecida devido a problemas operacionais. Deste modo, somente a composição das ceras dos indivíduos P1, P2, P3 e P4.

Figura 6: Classes de constituintes (%) que compõe a cera cuticular foliar de quatro indivíduos de *Paubrasilia echinata*.



Fonte: Autor, 2025

A análise da composição relativa da cera cuticular foliar de quatro indivíduos de *Paubrasilia echinata* (Tabela 3) revelou a presença predominante de hidrocarbonetos de cadeia longa (*n*-alcanos) e álcoois graxos, seguidos por ácidos graxos e ésteres (Anexo A). Entre os constituintes identificados, destacaram-se o hentriacontano (*n*-C₃₁) e o tritriacontano (*n*-C₃₃), com médias de $29,85 \pm 7,21\%$ e $29,36 \pm 9,46\%$, respectivamente, configurando-se como os principais componentes da fração cerosa.

Outros constituintes relevantes incluíram o nonacosano (*n*-C₂₉), com $11,28 \pm 8,84\%$, e a monopalmitina (C₁₉-éster), com $6,61 \pm 2,26\%$. Em menores proporções foram observados álcoois como o hexacosanol e o octacosanol, além dos ácidos graxos palmítico, esteárico e mirístico. Além disso, houve uma média de 9,85% de outros compostos que não puderam ser identificados pelo banco de dados. A variação observada entre os indivíduos (P1–P4) sugere diferenças intraespecíficas

na composição cuticular, possivelmente relacionadas a fatores ambientais e/ou genéticos.

Tabela 3. Composição relativa (%) da cera cuticular foliar de quatro indivíduos de *Paubrasilia echinata* (P1 a P4).

Tr (min)	Constituintes	P1	P2	P3	P4	Média ± DP
15,37	Ácido láurico (C12:0)	0,13	0,06	0,15	0,07	0,10 ± 0,04 ^d
18,57	Ácido mirístico (C14:0)	0,31	0,13	0,19	0,04	0,17 ± 0,11 ^d
21,48	Ácido palmítico (C16:0)	7,02	3,11	6,91	1,06	4,53 ± 2,94 ^c
24,14	Ácido esteárico (C18:0)	2,61	1,54	3,48	0,51	2,04 ± 1,29 ^{c,d}
24,83	Heptacosano (<i>n</i> -C27)	0,29	0,07	0,21	0,13	0,18 ± 0,10 ^d
28,40	Monopalmitina (C19-éster)	5,61	4,69	9,86	6,27	6,61 ± 2,26 ^c
31,58	Nonacosano (<i>n</i> -C29)	3,64	7,76	9,73	23,97	11,28 ± 8,84^b
32,04	Hexacosanol (C26-ol)	4,33	0,57	0,7	0,13	1,43 ± 1,95 ^d
33,84	Hentriacontano (<i>n</i> -C31)	22,89	29,99	26,77	39,74	29,85 ± 7,21^a
34,39	Octacosanol (C28-ol)	4,69	1,22	1,77	0,57	2,06 ± 1,82 ^{c,d}
36,81	Tritriacontano (<i>n</i> -C33)	33,08	40,98	20,67	22,71	29,36 ± 9,46^a
37,52	Triacontanol (C30-ol)	3,13	1,4	5,17	0,56	2,57 ± 2,04 ^{c,d}
	Outros	12,27	8,48	14,39	4,24	9,85 ± 4,47

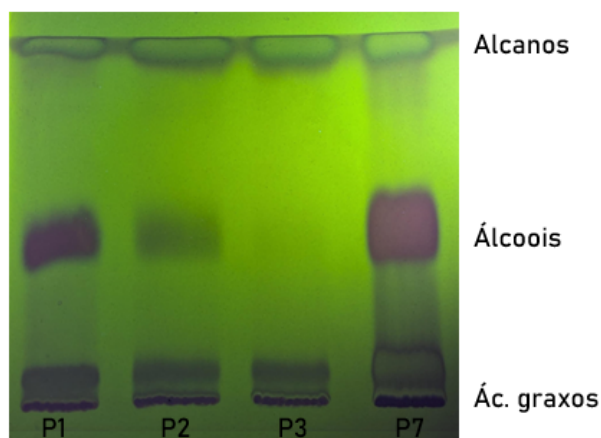
Médias seguidas de mesma letra (coluna) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. Números em negrito correspondem aos constituintes majoritários. Tr = tempo de retenção.

Fonte: Autor, 2025

5.3 Cromatografia em camada delgada preparativa

A análise cromatográfica em camada delgada preparativa dos extratos revelou perfis químicos similares tanto entre as amostras de *P. echinata* como desta em relação a *C. pyramidale*. Sob luz UV foi possível observar a presença de diferentes bandas correspondendo aos ácidos graxos, álcoois primários e alcanos, indicando variação na composição dos metabólitos secundários (Figura 5).

Figura 7. Perfil cromatográfico (CCD) dos extratos cuticulares de indivíduos de *Paubrasilia echinata* e *Cenostigma pyramidale* (P7) sob luz UV a 366 nm.



Fonte: Autor, 2025

5.4 Quimiotaxonomia de *Paubrasilia echinata*

Este é o primeiro estudo a caracterizar a distribuição de *n*-alcanos cuticulares em *P. echinata*. Foram identificados 17 *n*-alcanos, com cadeias variando de 21 a 37 átomos de carbono (Tabela 4). O padrão de distribuição dos *n*-alcanos entre os indivíduos de *P. echinata* revelou predominância do hentriacontano (*n*-C31) e do tritriacontano (*n*-C33) (Anexo B). Em dois dos indivíduos analisados, o nonacosano (*n*-C29) também se destacou como componente majoritário. As porcentagens de *n*-C31 variaram entre 34 e 42%, enquanto as de *n*-C33 oscilaram de 34 a 49%. Devido a problemas operacionais, não foi possível determinar o perfil de *n*-alcanos do indivíduo P3 através de CCD preparativa.

Tabela 4. Distribuição e abundância de *n*-alcanos cuticulares foliares de indivíduos de *Paubrasilia echinata* (P1 a P6) e *Cenostigma pyramidale* (P7). Valores expressos em porcentagem (%).

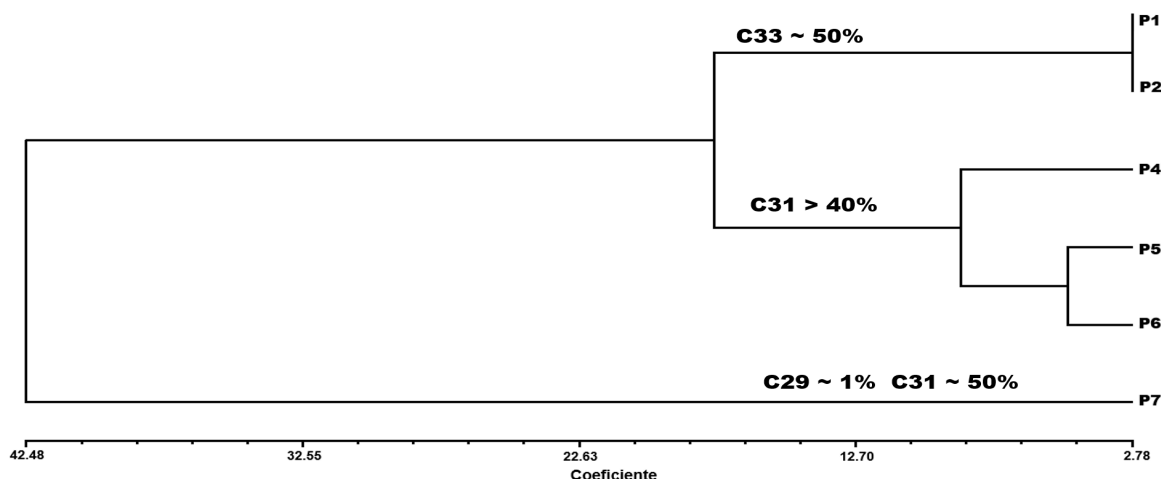
<i>n</i> -alcanos	<i>Paubrasilia echinata</i>					<i>Cenostigma pyramidale</i>
	P1	P2	P4	P5	P6	P7
C21	0,00	0,06	0,08	0,09	0,08	0,00
C22	0,00	0,10	0,16	0,15	0,12	0,00
C23	0,00	0,06	0,11	0,10	0,07	0,00
C24	0,00	0,05	0,09	0,06	0,08	0,00
C25	0,02	0,04	0,07	0,15	0,03	0,50

C26	0,02	0,04	2,90	0,03	0,04	0,46
C27	0,06	0,06	0,09	0,05	0,08	4,70
C28	1,18	0,36	2,70	0,41	1,05	5,39
C29	5,36	7,23	15,20	13,19	10,34	1,11
C30	0,86	0,97	1,77	1,61	0,97	4,01
C31	35,45	34,47	40,41	42,63	42,15	48,78
C32	4,87	5,73	4,73	4,29	4,49	4,17
C33	49,78	48,45	29,82	34,83	38,85	1,12
C34	1,39	1,49	0,87	0,97	0,78	0,00
C35	1,39	1,49	0,87	0,97	0,33	0,00
C36	0,00	0,03	0,62	0,51	0,53	0,00
C37	0,00	0,10	0,00	0,09	0,00	0,00

Fonte: Autor, 2025

A análise do perfil de *n*-alcanos permitiu distinguir dois grupos de táxons. O primeiro grupo compreende os cinco indivíduos de *P. echinata*, enquanto o segundo é representado exclusivamente pela amostra de *C. pyramidale*. A principal diferença observada entre esses grupos foi o baixo teor de *n*-C29 (1,11%) e *n*-C33 (1,12%) em *C. pyramidale*. O perfil dessa espécie foi ainda caracterizado pelo elevado teor de *n*-C31 (48,78). Em *P. echinata*, por sua vez, os *n*-alcanos majoritários foram *n*-C31 e *n*-C33.

Figura 6. Fenograma do agrupamento UPGMA baseado em distância Euclidiana com base na distribuição quantitativa de *n*-alcanos cuticulares de diferentes indivíduos de *Paubrasilia echinata*. *Cenostigma pyramidale* foi utilizada como grupo externo. Coeficiente de correlação cofenética ($r = 0,95$). Nonacosano (*n*-C29), hentriacontano (*n*-C31) e tritriacontano (*n*-C33).



Fonte: Autor, 2025

Os resultados deste estudo evidenciam variação expressiva no teor total e na composição química das ceras cuticulares em *P. echinata*, indicando que a espécie apresenta plasticidade metabólica. Quanto às variações no teor total de cera e na composição química entre os indivíduos, não é possível identificar qual fator ambiental poderia ter sido determinante, uma vez que todas as amostras foram coletadas no mesmo local e sem registro detalhado das condições ambientais. A literatura enfatiza que, na ausência desses controles, a variação observada deve ser interpretada como variabilidade natural, e não como resultado de um fator ambiental específico (Shepherd & Griffiths, 2006; Buschhaus & Jetter, 2011). O teor médio de cera cuticular ($111,12 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) encontra-se dentro da faixa descrita para espécies arbóreas tropicais adaptadas a ambientes de alta radiação solar e estresse hídrico (Baker, 1982; Xue *et al.*, 2017). A variação observada entre os indivíduos analisados ($73,46$ – $141,72 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) possivelmente reflete diferenças ambientais, como intensidade luminosa, disponibilidade hídrica e níveis de poluição atmosférica, fatores conhecidos por influenciar o aumento da deposição de cera foliar (Shepherd e Griffiths, 2006; Franchini *et al.*, 2010).

Os hidrocarbonetos de cadeia longa, especialmente o hentriacontano ($n\text{-C}_{31}$) e o tritriacontano ($n\text{-C}_{33}$), desempenham papel predominante na composição da cera cuticular, corroborando observações de estudos anteriores em Fabaceae e outras espécies lenhosas (Merino *et al.*, 1999; Oliveira e Salatino, 2000; Bakker e Alvarado, 2006; Jetter *et al.*, 2006; Cerda-Peña *et al.*, 2022). Esses compostos, típicos das ceras epicuticulares, estão associados à redução da perda de água e à proteção contra fatores ambientais adversos, como altas temperaturas e poluição urbana (Buschhaus e Jetter, 2011; Shi *et al.*, 2024).

A variabilidade nas proporções relativas dos principais componentes observada entre os indivíduos (P1–P4) indica que, embora o padrão químico seja conservativo, ocorrem modificações quantitativas que refletem respostas adaptativas da planta. Estudos prévios demonstram que o estresse hídrico e a exposição à radiação UV promovem tanto o aumento do conteúdo total de cera quanto o alongamento das cadeias dos n -alcanos, favorecendo compostos de maior comprimento (Ramos Campos *et al.*, 2013; Shepherd e Griffiths, 2006). Essa tendência pode explicar o maior teor de cera encontrado nos indivíduos P5 e P6,

cuja maior produção cerosa possivelmente confere eficiência superior na impermeabilização e proteção foliar. Notavelmente, esses indivíduos estavam localizados em áreas mais urbanizadas que P1–P4.

Além dos hidrocarbonetos, foram identificados álcoois como o hexacosanol (*n*-C26ol), octacosanol (*n*-C28ol) e triacontanol (*n*-C30-ol), além do éster monopalmitina, que, embora em menores proporções, também exercem papéis relevantes na estruturação e funcionalidade da cutícula (Barthlott et al., 1998; Riederer e Schreiber, 2001). Esses compostos contribuem para a coesão da matriz lipídica e influenciam propriedades como refletância da luz e resistência mecânica da superfície foliar. Os álcoois atuam como agentes de barreira contra a perda de água, enquanto os esteróis funcionam como elementos estruturais que reforçam a matriz lipídica (Yeats e Rose, 2013).

A presença de ácidos graxos, como o palmítico e o esteárico, ainda que em baixas concentrações, é comum em ceras cuticulares, uma vez que esses compostos servem como precursores para a síntese de alcanos e álcoois (Kunst e Samuels, 2003). A maioria desses ácidos graxos é formada por cadeias saturadas e não ramificadas, contendo números pares de átomos de carbono, tipicamente variando de C16 a C34 (Wu, et al., 2023), como os C12:0, C14:0, C16:0 e C18:0 identificados neste estudo.

A composição química observada em *P. echinata* reforça o potencial quimiotaxonômico das ceras cuticulares, uma vez que a distribuição e o tipo de *n*-alcanos tendem a ser específicos em nível de gênero ou espécie (Cerdeira-Peña et al., 2022; Wink, 2018). Esse padrão químico, conservado evolutivamente, permite diferenciar grupos taxonômicos próximos e compreender relações filogenéticas dentro da família Fabaceae, conforme sugerido por Oliveira e Salatino (2000).

Na análise quimiotaxonômica, os *n*-alcanos de cadeia ímpar foram os mais abundantes, o que, segundo Kolattukudy (1969), é característico das ceras cuticulares variando apenas em quantidade entre indivíduos. O fenograma obtido pela análise UPGMA (Figura 6) revelou a formação de dois grupos distintos: o primeiro composto pelos cinco indivíduos de *P. echinata* e o segundo representado exclusivamente por *C. pyramidale*. Essa separação reflete a elevada similaridade interna entre os perfis de *n*-alcanos de *P. echinata* e a acentuada diferenciação química em relação a *C. pyramidale*. A predominância de *n*-C₃₁ em *P. echinata* e *C. pyramidale* e de *n*-C₃₃ em *P. echinata* e o baixo teor de *n*-C₂₉ e *n*-C₃₃ em *C.*

pyramidale explicam a distância entre os grupos, confirmando que a composição cuticular constitui um marcador químico eficiente para distinções taxonômicas entre espécies próximas (Barthlott et al., 1998; Dragota e Riederer, 2007). A separação entre indivíduos da mesma espécie observada no fenograma reflete a variabilidade química intraespecífica típica de metabólitos presentes na cera cuticular. Estudos anteriores demonstram que a composição das ceras, especialmente de *n*-alcanos, pode apresentar flutuações mesmo entre plantas geneticamente próximas e coletadas na mesma área, devido a microvariações ambientais, ao estágio de desenvolvimento das folhas e a diferenças genéticas sutis que nem sempre são perceptíveis em campo (Shepherd & Griffiths, 2006; Buschhaus & Jetter, 2012). Dessa forma, a divergência observada entre indivíduos no agrupamento multivariado não deve ser interpretada como uma resposta fisiológica comprovada, mas sim como expressão da variabilidade química natural da espécie." Dessa forma, o perfil identificado para *P. echinata* deve ser interpretado principalmente sob a perspectiva quimiotaxonômica, uma vez que este era o objetivo do estudo. A composição das ceras cuticulares, especialmente a distribuição de *n*-alcanos de cadeias longas (C29, C31, C33), tem sido amplamente empregada como marcador taxonômico para distinguir espécies, populações e grupos filogenéticos (Eglinton e Hamilton, 1967; Baker, 1982; Maffei, 1996; Kunst e Samuels, 2003). Assim, a variabilidade registrada contribui para estabelecer uma assinatura química da espécie, mesmo que dentro de uma única população.

Dessa forma, o perfil de cera de *P. echinata* e *C. pyramidale* apresenta relevância não apenas ecológica, mas também sistemática, podendo auxiliar na caracterização química de espécies de leguminosas relacionadas. Embora fatores ambientais e fisiológicos possam influenciar a biossíntese das ceras, este estudo não registrou parâmetros ambientais — como luminosidade, temperatura, umidade do solo ou radiação incidente nas folhas. Assim, não é possível afirmar que os padrões observados resultem de ajustes fisiológicos. A literatura indica que tais relações só podem ser estabelecidas quando as variáveis ambientais são mensuradas e correlacionadas estatisticamente com os perfis químicos (Shepherd & Wynne Griffiths, 2006; Jetter & Kunst, 2008). A variabilidade química registrada entre os indivíduos sugere que fatores ambientais e genéticos interagem na determinação do perfil cuticular. Estudos de Reinhard e Riederer (2016) e Shi *et al.* (2024) demonstram que a resistência da cutícula está associada à composição

acíclica das ceras e que mudanças no padrão biossintético desses compostos podem ser induzidas por estresses osmóticos e térmicos.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo constitui a primeira caracterização detalhada das ceras cuticulares foliares de *Paubrasilia echinata*, revelando um padrão químico consistente com a função protetiva e reguladora desempenhada pela cutícula em ambientes sujeitos a estresse. Além de demonstrar a predominância dos *n*-alcanos de cadeia longa, especialmente *n*-C₃₁ e *n*-C₃₃, os resultados evidenciaram diferenças quantitativas marcantes entre os indivíduos estudados, tanto no teor total de ceras quanto na distribuição relativa dos constituintes.

Essas variações intraespecíficas, observadas mesmo em indivíduos expostos a um mesmo contexto urbano, refletem a plasticidade metabólica de *P. echinata* e sugerem ajustes fisiológicos modulados por microvariações ambientais ou diferenças genéticas. Tais diferenças reforçam que a composição cuticular não é totalmente uniforme dentro da espécie, sendo influenciada por fatores como radiação, disponibilidade hídrica e poluentes atmosféricos, elementos típicos do ambiente urbano onde as coletas foram realizadas.

A análise quimiotaxonômica confirmou ainda o potencial dos *n*-alcanos como marcadores químicos robustos, permitindo distinguir de forma clara *P. echinata* de *Cenostigma pyramidale*, utilizada como grupo externo. A forte similaridade interna entre os indivíduos da primeira espécie e sua nítida separação de *C. pyramidale* demonstram o valor sistemático das ceras cuticulares na diferenciação dentro de Fabaceae.

Assim, este estudo não apenas descreve o perfil químico da cera cuticular do pau-brasil, mas também evidencia que as diferenças quantitativas observadas entre os indivíduos carregam significado ecológico e fisiológico, reforçando a importância de considerar variações populacionais em análises químicas e quimiotaxonômicas.

Os resultados aqui apresentados estabelecem uma base sólida para investigações futuras envolvendo populações naturais, mudanças ambientais, estratégias adaptativas e aplicações sistemáticas voltadas à conservação de *P. echinata* na Mata Atlântica.

7. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F. F. A.; PINHO, R. A. *Pau-brasil (Caesalpinia echinata Lam.): árvore nacional*. São Paulo: [s.n.], 2007.
- AHMAD, F.; ANWAR, Farzana; HIRA, S. *Review on medicinal importance of fabaceae family*. Pharmacologyonline, 2016, 3, p.151-156.
- ALVARADO, P. I.; BAKKER, M. L. *Alcanos lineales de la cera cuticular de hojas de Populus alba, Populus deltoides (Salicaceae), Robinia pseudoacacia (Fabaceae), Ulmus pumila (Ulmaceae) y Fraxinus americana (Oleaceae) en Tandil, Buenos Aires, Argentina*. Darwiniana, 2006, 44(1), p.58–63.
- AMIN, A.; PARK, S. Chemotaxonomy, an Efficient Tool for Medicinal Plant Identification: Current Trends and Limitations. Plants, 2025, 14(14), 2234.
- ANDRADE, G.C., SILVA, L.C. Responses of tropical legumes from the Brazilian Atlantic Rainforest to simulated acid rain. Protoplasma 254, 1639–1649 (2017).
- ANDRADE, G.C.; Santana, B.V.D.; Rinaldi, M.C.S.; Ferreira, S.O.; Silva, R.C.; Silva, L.C. Leaf surface traits related to differential particle adsorption – A case study of two tropical legumes. Science of The Total Environment, Volume 823, 2022, 153681,
- BAKER, E. A. *Chemistry and morphology of plant epicuticular waxes*. In Linnean Society symposium series, 1982.
- BARONI, E. *Sucessão ecológica em florestas tropicais: o papel das Fabaceae*. Ecologia Aplicada, 2005, 4(1), p.12-20.
- BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C.; CUTLER, D.; DITSCH, F.; MEUSEL, I.; THEISEN, I.; WILHELMI, H. *Classification and terminology of plant epicuticular waxes*. Botanical Journal of the Linnean Society, 1998, 126, p.237–260.
- BASTOS, V. G. A.; SOUZA, I. A. de. *Avaliação da atividade farmacológica de Caesalpinia echinata Lam. (flores)*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

BFG – THE BRAZIL FLORA GROUP. *Growing knowledge: an overview of seed plant diversity in Brazil*. Rodriguésia, 2015, 66(4), p.1085-1113.

BORGES, I. F. *et al.* *Maturação de sementes de Caesalpinia echinata Lam. (pau-brasil), uma leguminosa ameaçada de extinção da Mata Atlântica brasileira*. Arquivos Brasileiros de Biologia e Tecnologia, 2005, 48(6), p.851–861.

BORGES, Laís Angélica; SOBRINHO, Mellissa Sousa; LOPES, Ariadna Valentina. *Phenology, pollination, and breeding system of the threatened tree Caesalpinia echinata Lam. (Fabaceae), and a review of studies on the reproductive biology in the genus*. Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2009, 204(2), p.111-130.

BUSCHHAUS, C.; JETTER, R. Composição e função fisiológica das camadas de cera que revestem as folhas de *Arabidopsis*: β -amirina afeta negativamente a barreira de água intracuticular. *Plant Physiology*, 2012, 160(2), p.1120–1129.

BUSCHHAUS, C.; JETTER, R. *Composition differences between epicuticular and intracuticular wax substructures: how do plants seal their epidermal surfaces?* Journal of Experimental Botany, 2011, 62(3), p.841–853.

CALFAPIETRA, C.; PEÑUELAS, J.; NIINEMETS, Ü. Urban plant physiology: adaptation–mitigation strategies under permanent stress. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(2), p.72–75

CAMPOS, F. F. *et al.* *Fungos endofíticos bioativos isolados de Caesalpinia echinata Lam. (pau-brasil) e identificação de beauvericina como metabólito tripanocida de Fusarium sp.* Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 2015, 110(1), p.65–74.

CERDA-PEÑA, C.; CONTRERAS, S. *Characterization and chemo-taxonomic evaluation of plant leaf waxes (long chain n-alkanoic acids, n-alkanes and n-alkanols) as a vegetation biomarker from species of the South American temperate forest (STF)*. Ecological Indicators, 2022, 136, 108675.

CHAKRABORTY, K.; SINGH, A.; KALARIYA, K. A.; GOSWAMI, N.; ZALA, P. V. *Physiological responses of peanut (Arachis hypogaea L.) cultivars to water deficit*

stress: status of oxidative stress and antioxidant enzyme activities. Acta Botanica Croatica, 2015, 74(1), p.123–142.

COSTA FILHO, L. O.; SILVA, M. H. de M.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; SILVA, S. I. da; OLIVEIRA, A. F. M. *Foliar cuticular n-alkane of some Croton species from Brazilian semiarid vegetation*. Biochemical Systematics and Ecology, 2012, 41, p.13–15.

CUNHA, M. W.; LIMA, H. C. *Viagem à terra do pau-brasil*. Rio de Janeiro: Agência Brasileira de Cultura, 1992.

DA SILVA GOMES, E. C. *et al.* *Evaluation of antioxidant and antiangiogenic properties of Caesalpinia echinata extracts*. Journal of Cancer, 2014, 5(2), p.143–150.

DIXON, R. A.; DICKINSON, A. J. *A century of studying plant secondary metabolism—From “what?” to “where, how, and why?”*. Plant Physiology, 2024, 195(1), p.48–66.

DRAGOTA, S.; RIEDERER, M. *Epicuticular wax crystals of Wollemia nobilis: morphology and chemical composition*. Annals of Botany, 2007, 100, p.225–231.

EGLINTON, G.; HAMILTON, R. J. *Ceras epicuticulares foliares*. Science, 1967, 156, p.1322–1335.

EIGENBRODE, S. D.; ESPELIE, K. E. *Effects of plant epicuticular lipids on insect herbivores*. Annual Review of Entomology, 1995, 40(1), p.171–194.

FIGUEIREDO, A.; HUGUENEY, P.; DURAZZO, A. *Recent advances in plant metabolomics: from metabolic pathways to health impact*. Biology, 2022, 11(2), 238.

FRANCHINI, M.; HERNANDEZ, L.; LINDSTROM, L. *Cuticle and cuticular wax development in the sunflower (Helianthus annuus L.) pericarp grown at the field under a moderate water deficit*. Phyton, 2010, 79, p.153–161.

GAGNON, E.; BRUNEAU, A.; HUGHES, C. E.; QUEIROZ, L. P.; LEWIS, G. P. *A new generic system for the pantropical Caesalpinia group (Leguminosae)*. PhytoKeys, 2016, 71, p.1–160.

GAGNON, E.; LEWIS, G.P.; LIMA, H.C. *Paubrasilia* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB602728>>.

GUEDES, R. APAC – Agência Pernambucana de Águas e Climas. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/climatologia/519-climatologia>.

GUSMÃO, L. F. P.; QUEIROZ, L. P.; QUIJANO, F. R. B.; JUNCÁ, F. A.; OLIVEIRA, R. P.; BASEIA, I. G. *Caatinga: diversidade na adversidade do semiárido brasileiro*. Brasília: MCT, CNPq, PPBio, 2016.

IBAMA. *Lista de espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1992.

JEFFREE, C. E. *The fine structure of the plant cuticle*. In: RIEDERER, M.; MÜLLER, C. (Eds.). *Annual plant reviews, volume 23: Biology of the plant cuticle*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2006.

JETTER, R.; KUNST, L. Vias biossintéticas de lipídios da superfície vegetal e sua utilidade para a engenharia metabólica de ceras e biocombustíveis de hidrocarbonetos. *The Plant Journal*, 2008, 54, p.670–683.

JETTER, R.; RIEDERER, M. Localização da barreira de transpiração nas ceras epicuticulares e intracuticulares de oito espécies de plantas: resistências ao transporte de água estão associadas a componentes acil-graxos em vez de alicíclicos. *Plant Physiology*, 2016, 170(2), p.921–934.

JETTER, R.; SCHÄFFER, S. Composição química da superfície foliar de *Prunus laurocerasus*: alterações dinâmicas da película cerosa epicuticular durante o desenvolvimento foliar. *Plant Physiology*, 2001, 126(4), p.1725–1737.

KOLLATUKUDY, P. E. *Plant waxes*. *Lipids*, 1969, 5(3), p.259–275.

KUNST, L.; SAMUELS, A. L. Biosynthesis and secretion of plant cuticular wax. *Progress in Lipid Research*, 2003, 42(1), p.51–80. DOI: 10.1016/S0163-7827(02)00045-0. PMID: 12467640.

LAMARCK, J.-B. de. *Encyclopédie Méthodique, Botanique*. Paris: Panckoucke, 1785. v.1, pt.2, p.461.

LEWIS, G. P. *Caesalpinia: uma revisão do grupo Poincianella-Erythrostemon*. Richmond: Royal Botanic Gardens, 1998.

LEWIS, G.; SCHRIRE, B.; MACKINDER, B.; LOCK, M. (eds.). *Legumes of the world*. Richmond: Royal Botanic Gardens, Kew, 2005.

LIMA, N. M.; SANTOS, V. N. C.; LA PORTA, F. A. *Quimiodiversidade, bioatividade e quimiossistemática do gênero Inga (Fabaceae): uma breve revisão*. Revista Virtual de Química, 2018, 10, p.459–473.

LORENZI, H. *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora LTDA, 2002. v.1 e 2.

MAFFEI, M. Chemotaxonomic Significance of Leaf Wax n-Alkanes in the Umbelliferae, Cruciferae and Leguminosae (Subf. Papilionoideae). *Biochemical Systematics and Ecology*, Vol 24, pp. 531-545, 1996

MERINO, E. R.; MAESTRI, D. M.; PLANCHUELO, A. M. *Chemotaxonomic evaluation of leaf alkanes in species of Lupinus (Leguminosae)*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 1999, 27, p.297–301.

MITSUMORI, F. Y.; SOUZA, N. M. de; MONTANHA, P.; MARTINS, D. C. *Levantamento florístico das espécies arbóreas da área de reflorestamento do Campus II da FUNEC - Santa Fé do Sul/SP*. UNIFUNEC Científica Multidisciplinar, 2018, 6(8), p.86–102.

MOTTAGHIPISHEH, J.; STUPPNER, H. *Uma revisão abrangente sobre aspectos quimiotaxonômicos e fitoquímicos de homoisoflavonoides, como derivados raros de flavonoides*. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(5), p.2735.

NIVELDT, R. J.; NOOD, E. V.; HOORN, D. V.; BOELEN, P. G.; NORREN, K. V.; LEEUWEN, P. V. *Flavonoids: a review of probable mechanisms of action and*

potential applications. The American Journal of Clinical Nutrition, 2001, 74, p.418–425.

OLIVEIRA AF, MEIRELLES ST, SALATINO A. Epicuticular waxes from caatinga and cerrado species and their efficiency against water loss. An Acad Bras Cienc. 2003 75(4):431-9

OLIVEIRA, A. F.; SALATINO, A. *Major constituents of the foliar epicuticular waxes of species from the Caatinga and Cerrado*. Z Naturforsch C Journal of Biosciences, 2000, 55(9–10), p.688–692.

PACHECO, I. *Pau-brasil 2007 Francismar*. [S.l.]: 2007.

PEREIRA, A. S.; AQUINO NETO, F. R. *Chemical composition of Tipuana tipu, a source for tropical honey bee products*. Z. Naturforsch. C, 2003, 58(3–4), p.201–206.

PFUNDEL, E. E.; AGATI, G.; CEROVIC, Z. G. *Optical properties of plant surfaces*. In: RIEDERER, M.; MÜLLER, C. (Eds.). *Biology of the plant cuticle*. Oxford: Blackwell, 2006. p.216–249.

PILON, A. C.; SELEGATO, D. M.; FERNANDES, R. P.; BUENO, P. C. P.; PINHO, D. R.; CARNEVALE NETO, F.; FREIRE, R. T.; CASTRO-GAMBOA, I.; BOLZANI, V. S.; LOPES, N. P. *Metabolômica de plantas: métodos e desafios*. Química Nova, 2020, 43(3), p.329–354.

POLHILL, R. M. *Classification of the Leguminosae*. In: BISBY, F. A.; BUCKINGHAM, J.; HARBORNE, J. B. (Eds.). *Phytochemical Dictionary of the Leguminosae*. New York: Chapman and Hall, 1994. p.xxxv–xlvi.

PORTAL CNCFLORA. Ficha de *Paubrasília echinata* (Lam.) Gagnon, H.C. Lima & G.P. Lewis. Disponível em: <https://cncflora.jbrj.gov.br/ficha/602728>. Acesso em: 4 de nov. 2025.

QUEIROZ, L. P. *Leguminosas da Caatinga*. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.

RAMALHO, A. (apud AGUIAR, 2007). *Usos medicinais de espécies nativas*. In: *Plantas medicinais brasileiras*. [S.l.]: 2007.

RAMOS CAMPOS, P.; GUERRERO, C.; LOPEZ-LOZANO, A.; et al. *Soil water stress affects both cuticular wax content and cuticle-related gene expression in young saplings of maritime pine (Pinus pinaster Ait.)*. BMC Plant Biology, 2013, 13, 95.

REINHARD, J.; RIEDERER, M. *Localização da barreira de transpiração nas ceras epi e intracuticulares de oito espécies de plantas: as resistências ao transporte de água estão associadas a componentes acil graxos em vez de alicíclicos*. Plant Physiology, 2016, 170(2), p.921–934.

RIBEIRO, I.M.C.; ARRUDA, E.C.P.; OLIVEIRA, A.F.M.; ALMEIDA, J.S. Physical and chemical defenses of *Cenostigma pyramidale* (Fabaceae): a pioneer species in successional caatinga áreas. Revista Caatinga, 34: 398-409, 2021.

RIEDERER, M.; SCHREIBER, L. *Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles*. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(363), p.2023–2032.

ROCHA E SILVA, H.; SILVA, C. C. M.; CALAND-NETO, L. B.; LOPES, J. A. D.; CITÓ, A. M. G. L.; CHAVES, M. H. *Constituintes químicos das cascas do caule de Cenostigma macrophyllum: ocorrência de colesterol*. Química Nova, 2007, 30, p.1877–1881.

RONDÃO, R.; MELO, J. S. S. de; PINA, J.; MELO, M. J.; VITORINO, T.; PAROLA, A. *J. Brazilwood reds: the (photo)chemistry of brazilin and brazilein*. The Journal of Physical Chemistry A, 2013, 117, p.10650–10660.

RYMER, R. *Saving the music tree*. Smithsonian, 2004, 35(1), p.52–63.

SANTOS-SÁNCHEZ, N. F. et al. *Via do ácido chiquímico na biossíntese de compostos fenólicos*. In: *Aspectos fisiológicos das plantas dos compostos fenólicos*. Londres: IntechOpen, 2019.

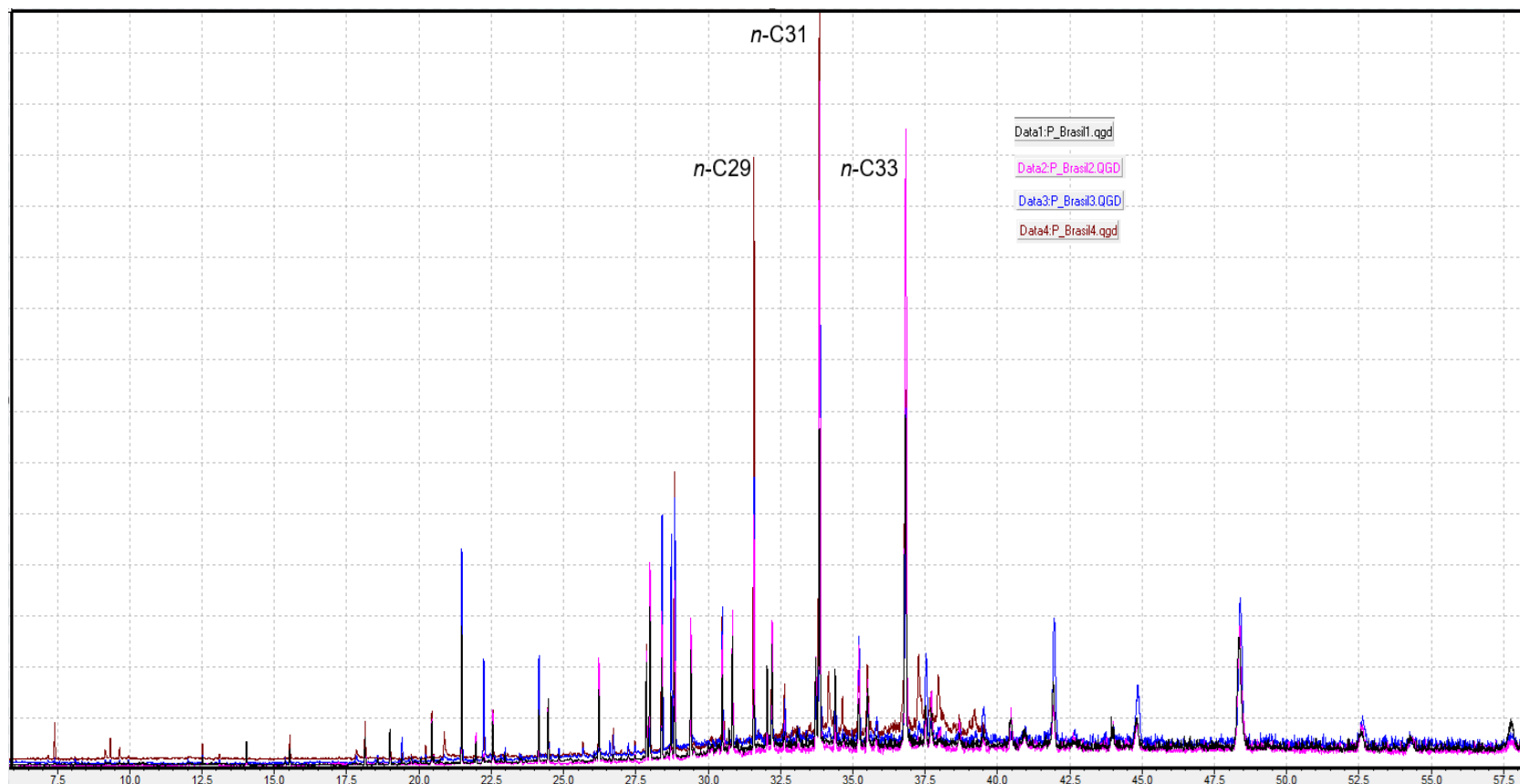
SHEPHERD, T.; GRIFFITHS, D. W. The effects of stress on plant cuticular waxes. *New Phytologist*, 2006, 171(3), p.469–499.

- SHI, S.; LIU, Z.; LI, Y.; ZHANG, Q.; WANG, L. *Chemical and transcriptomic analyses of leaf cuticular wax metabolism in Ammopiptanthus mongolicus under osmotic stress*. *Biomolecules*, 2024, 14(2), 227.
- SILVA, K. M. M.; AGRA, M. F.; SANTOS, D. Y. A. C.; OLIVEIRA, A. F. M. *Leaf cuticular alkanes of Solanum subg. Leptostemonum Dunal (Bitter) of some northeast Brazilian species: composition and taxonomic significance*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2012, 44, p.48–52.
- SOUZA, L. A. G. *Biodiversidade e importância madeireira das Fabaceae da Amazônia brasileira*. In: VIANEZ, B. F.; VAREJÃO, M. de J. C.; ABREU, R. L. S.; SALES-CAMPOS, C. (Org.). *Potencial tecnológico de madeiras e resíduos florestais da Amazônia Central*. Manaus, AM: Editora do INPA, 2012. p.11–30.
- SUMBUR, B.; ZHOU, M.; DORJEE, T.; BING, J.; HA, S.; XU, X.; ZHOU, Y.; GAO, F. *Análises químicas e transcriptômicas do metabolismo da cera cuticular foliar em Ammopiptanthus mongolicus sob estresse osmótico*. *Biomolecules*, 2024, 14(2), 227.
- SZAKIEL, A.; PAČZKOWSKI, C.; PENSEC, F.; BERTSCH, C. *Fruit cuticular waxes as a source of biologically active triterpenoids*. *Phytochemistry Reviews*, 2012, 11(2–3), p.263–284.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Metabólitos secundários e defesa vegetal*. In: *Fisiologia vegetal* (3ª ed.). Porto Alegre: Artmed Editora S.A., 2006.
- THOMAS, C. L. *et al. Transformation of n-alkanes from plant to soil: a review*. *Soil* (Copernicus preprint), 2021.
- VARTY, N. *IUCN Red List of Threatened Species: Paubrasilia echinata*. IUCN, (s.d.).
- VEITCH, N. C. *Isoflavonoids of the Leguminosae*. *Natural Product Reports*, 2013, 30(7), p.988–1027.
- WINK, M.; BOTSCHEN, F.; GOSMANN, C.; SCHÄFER, H.; WATERMAN, P. G. *Quimiotaxonomia vista de uma perspectiva filogenética e evolução do metabolismo secundário*. In: *Annual Plant Reviews online*. Londres: J. A. Roberts (Ed.), 2018.

XUE, D.; ZHANG, X.; LU, X.; CHEN, G.; CHEN, Z.-H. *Molecular and evolutionary mechanisms of cuticular wax for plant drought tolerance*. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8, 621.

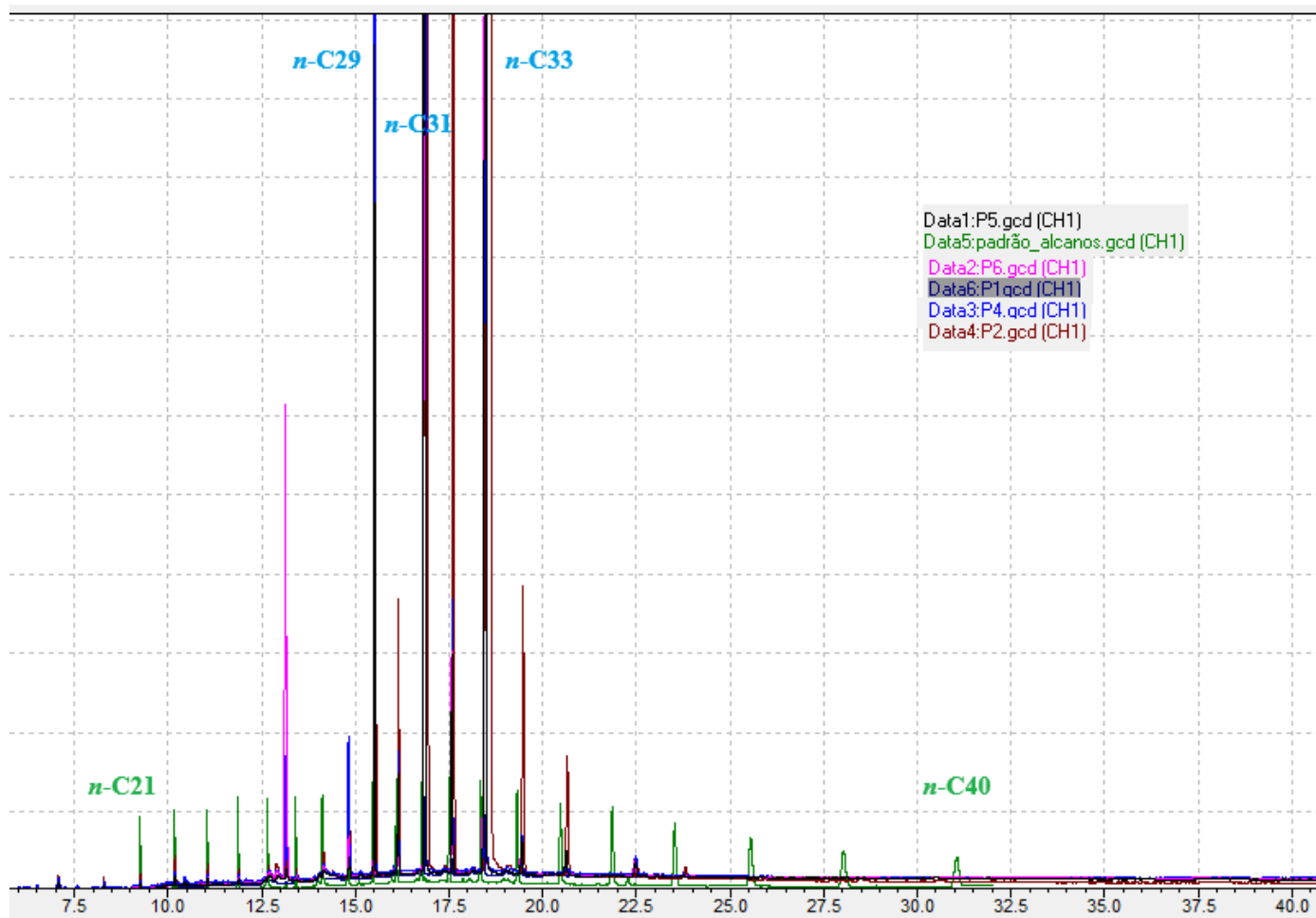
YEATS, T. H.; ROSE, J. K. *The formation and function of plant cuticles*. *Plant Physiology*, 2013, 163(1), p.5–20.

ANEXO A - Cromatogramas (GC-MS) das ceras cuticulares foliares de quatro indivíduos de *Paubrasilia echinata*. Nonacosano (*n*-C29), hentriacontano (*n*-C31) e tritriacontano (*n*-C33).



Fonte: Autor, 2025

ANEXO B - Cromatogramas (GC-FID) das frações de *n*-alcanos das ceras cuticulares foliares de cinco indivíduos de *Paubrasilia echinata*. Heneicosano (*n*-C21), hentritriacontano (*n*-C31), tritriacontano (*n*-C33), tetracontano (*n*-C40). Picos em verde correspondem ao padrão de *n*-alcanos.



Fonte: Autor, 2025