



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-graduação em Botânica

Taxonomia e morfoanatomia de taxa relacionados aos cipós do Ayahuasca
(Malpighiaceae Juss.)

Scheila Cristina Biazatti

Orientadora: Regina Célia de Oliveira

Brasília, DF
Março, 2026

SCHEILA CRISTINA BIAZATTI

Taxonomia e morfoanatomia de taxa relacionados aos cipós do Ayahuasca
(Malpighiaceae Juss.)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Botânica, Instituto de Ciências Biológicas,
Universidade de Brasília, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título de
Doutora em Botânica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Regina Célia de Oliveira

Brasília, DF
Março, 2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Biazatti, Scheila Cristina
BB579t Taxonomia e morfoanatomia de taxa relacionados aos cipós
do Ayahuasca (Malpighiaceae Juss.) / Scheila Cristina
Biazatti; orientador Regina Célia de Oliveira. Brasília,
2026.
160 p.

Tese(Doutorado em Botânica) Universidade de Brasília,
2026.

1. Banisteriopsis caapi. 2. Etnobotânica. 3.
Morfoanatomia. 4. Aprendizado de máquina. 5. Nomenclatura
botânica. I. Oliveira, Regina Célia de, orient. II. Título.

SCHEILA CRISTINA BIAZATTI

Taxonomia e morfoanatomia de taxa relacionados aos cipós do Ayahuasca
(Malpighiaceae Juss.)

Tese de doutorado apresentada em 24 de Abril de 2026

Banca examinadora

Prof. Dra. Regina Célia de Oliveira (Orientadora)

Universidade de Brasília

Presidente da banca

Prof. Dr. Igor Ballego Campos

Universidade de Brasília

Membro titular

Prof. Dra. Silvia Rodrigues Machado

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Membro titular

Prof. Dr. Jefferson Rodrigues Maciel

Jardim Botânico do Recife/ Universidade Federal Rural de Pernambuco

Membro titular

Prof. Dra. Julia Sonsin Oliveira

Universidade de Brasília

Membro suplente

Dedicatória

“À minha família que sempre acreditou no meu potencial e me ensinou o valor do conhecimento, que esteve junto em cada desafio superado e cada sonho que um dia foi apenas uma ideia. Aos que me ensinaram que a ciência ilumina e que a persistência constrói caminhos. Aos que nunca duvidaram de mim. Esta conquista é nossa!”

“À memória da minha avó, Ozilia Ventorim Biazatti, presença constante, amorosa e incentivadora em minha vida. Com carinho e sabedoria, transmitiu valores que marcaram profundamente minha formação. Foi com ela que aprendi a rezar, a ter fé e a acreditar nos meus sonhos. Sua presença permanece viva em quem sou e em cada conquista alcançada.”

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda luz e sabedoria, por conduzir meus passos mesmo quando eu não compreendia o caminho. Pela força que se renova no silêncio, pela intuição que orienta além da razão e pela fé que sustenta mesmo nos dias de incerteza.

À minha família, alicerce da minha existência, expresso minha mais profunda gratidão. À minha mãe, Glória, e ao meu pai, Jadir, agradeço pelo amor incondicional, pelos ensinamentos de vida, pelo apoio constante e por acreditarem nos meus sonhos mesmo nos momentos mais difíceis. Ao meu irmão, Renan, pela presença, pela parceria e pelo incentivo ao longo de toda essa caminhada. Cada gesto de carinho, mesmo à distância, foi essencial para que eu mantivesse a coragem e a serenidade durante essa jornada.

Aos amigos que estiveram presentes ao longo desta trajetória, deixo minha sincera gratidão pela companhia, pelas conversas, pelo incentivo e pelo apoio nos diferentes momentos desta caminhada. A amizade, em suas muitas formas, tornou este percurso mais leve, mais humano e mais significativo. De modo especial, agradeço ao Maylon, cuja amizade verdadeira, presença constante e generosidade estiveram entre os pilares que sustentaram este percurso, representando aqui minha gratidão a todos os amigos que fizeram parte dessa caminhada. Estendo também minha gratidão a todos os demais amigos que, de diferentes maneiras e em diferentes momentos, contribuíram para que esta jornada fosse possível.

À minha orientadora, Profa. Dra. Regina Célia de Oliveira, minha profunda gratidão por me desafiar a sair da zona de conforto e, ao mesmo tempo, acreditar genuinamente no meu potencial para construir um trabalho de excelência. Pelas conversas, pelo incentivo constante, pela parceria e pela confiança que ultrapassa as páginas deste trabalho — muito obrigado. Este é apenas o início de uma jornada maior, e tê-la ao meu lado nesse percurso é parte essencial do que torna tudo isso possível.

Aos colegas dos laboratórios e espaços de vivência acadêmica, agradeço pela convivência, pelo apoio mútuo e pelas trocas que enriqueceram tanto o processo de pesquisa quanto os dias de trabalho. A colaboração cotidiana, o bom humor nos momentos difíceis e o compromisso coletivo foram fundamentais para tornar essa caminhada mais leve e inspiradora.

Aos membros da banca examinadora, Profa. Dra. Silvia Rodrigues Machado, Prof. Dr. Jefferson Rodrigues Maciel e Prof. Dr. Igor Ballego Campos, expresso minha sincera gratidão por aceitarem acompanhar este trabalho tanto na etapa de qualificação quanto na defesa. Suas leituras atentas, contribuições, críticas e sugestões foram fundamentais para o amadurecimento desta pesquisa e para o aprimoramento das reflexões apresentadas nesta tese.

À Universidade Federal de Rondônia (UNIR), instituição à qual estou vinculado, deixo meu sincero agradecimento pela liberação institucional que possibilitou a realização deste doutorado. Sou grato também pelo apoio e incentivo recebidos de colegas e professores ao longo dessa etapa. Um agradecimento especial ao Prof. Emanuel, que esteve ao meu lado durante a coleta de dados na Expedição Rondônia e Acre e que, desde o início, foi um dos grandes incentivadores da minha decisão de abraçar a Botânica como campo de estudo e paixão.

Agradeço a todas as pessoas e comunidades que contribuíram com apoio durante as atividades de campo, compartilhando conhecimentos, experiências e contribuindo para a realização das coletas e observações que fundamentam este estudo. Agradeço também aos curadores e equipes técnicas dos herbários que disponibilizaram material e apoio durante as etapas de consulta e análise das coleções botânicas.

À Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade de Brasília (PPGBot/UnB), agradeço por acolherem este trabalho e por oferecerem um ambiente de excelência acadêmica, onde pude aprofundar meus estudos e crescer como pesquisador. Estendo meus agradecimentos a todos os professores que, direta ou indiretamente, contribuíram com este percurso e compartilharam ensinamentos fundamentais para minha formação científica e pessoal.

Agradeço às instituições que viabilizaram meu afastamento institucional e o suporte necessário para a realização desta pesquisa: à Universidade Federal de Rondônia (UNIR), pela liberação institucional para cursar o doutorado; ao Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade de Brasília (PPGBot/UnB); ao Decanato de Gestão de Pessoas da Universidade de Brasília (DGP/UnB); à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF processo 00193-00002220/2023-16) pelo custeio de visitas técnico-científicas à USP/ESALQ (análises no Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira) e à UNESP Botucatu (análises no Centro de Microscopia Eletônica), e grande parte do custeio da viagem para coletas

botânicas aos estados do Acre e Rondônia. O apoio dessas instituições foi fundamental para que esta etapa pudesse ser realizada com dedicação e qualidade.

Agradeço também às instituições e laboratórios que acolheram diferentes etapas desta pesquisa, oferecendo infraestrutura, apoio técnico e um ambiente científico estimulante: ao Herbário da Universidade de Brasília (UB); ao Laboratório de Anatomia Vegetal do Instituto de Biologia da UnB; ao Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira da USP/ESALQ (Piracicaba); ao Centro de Microscopia Eletrônica da UNESP (Botucatu); à Embrapa Acre; ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Rondônia (UNIR); ao Laboratório de Heurística de Sistemas Agroalimentares na Amazônia (LaHorTA/UNIR); e ao Laboratório de Recuperação de Ecossistemas e Produção Florestal (REProFlor/UNIR). Em cada um desses espaços encontrei apoio, colaboração e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Assim como cada pessoa que transforma esses espaços em ambientes confortáveis e produtivos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a construção desta tese. Cada conversa, cada sugestão, cada gesto de apoio e cada partilha de conhecimento tiveram um papel importante nesta caminhada. Sou profundamente grata por todos os encontros e por todas as presenças que deixaram marcas significativas neste percurso.

*A jornada botânica é como a vida subterrânea das raízes: silenciosa,
resiliente e fundamental para que o conhecimento floresça.*

Biazatti, SC (2024)

Sumário

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. HIPÓTESES.....	20
3. OBJETIVOS	20
3.1. Geral.....	20
3.2. Específicos	21
4. REFERÊNCIAS	21
5. CAPÍTULO I.....	30
Typification of names of Malpighiaceae related to little-known species of Ayahuasca	30
6. CAPÍTULO II	46
Machine learning applied to herbarium leaf samples recovers folk classification of <i>Banisteriopsis caapi</i> , the main ayahuasca component	46
7. CAPÍTULO III.....	101
Distinção de etnotaxa de <i>Banisteriopsis caapi</i> e espécies de Malpighiaceae relacionadas à Ayahuasca por morfoanatomia das folhas	101
8. CONCLUSÃO GERAL	160

RESUMO

A Ayahuasca é uma bebida ritualística amazônica que combina, prioritariamente, caules de *Banisteriopsis caapi* (Malpighiaceae) e folhas de *Psychotria viridis* (Rubiaceae). *B. caapi* é considerada uma “planta sagrada” por diversos povos tradicionais e seu uso expandiu-se globalmente em contextos religiosos, terapêuticos e culturais. A complexidade botânica relacionada aos componentes do chá, especialmente à diversidade de etnotaxa e espécies associadas a *B. caapi*, ainda representa um desafio à taxonomia, devido à escassez de materiais férteis em coleções científicas e à frequente sobreposição entre etnotaxa tradicionalmente reconhecidos e espécies formalmente descritas. A presente tese adota uma abordagem integrativa com o objetivo de ampliar o conhecimento taxonômico e morfoanatômico de *B. caapi*, seus etnotaxa e outras espécies de Malpighiaceae associadas ao uso da Ayahuasca. Para isso, foram desenvolvidos estudos de revisão nomenclatural, análises morfonômicas e do uso ferramentas computacionais de apoio à taxonomia. O primeiro capítulo aborda inconsistências nomenclaturais relacionadas a espécies pouco conhecidas da Ayahuasca. Com base em revisões bibliográficas e análise de tipos históricos, foram identificadas incongruências na circunscrição de espécies de *Banisteriopsis*, *Diplopterys* e *Tetrapteryx*. Para solucionar essas questões e garantir estabilidade taxonômica, foram propostas 7 lectotipificações fundamentadas nos preceitos do Código Internacional de Nomenclatura Botânica (ICN), com o intuito de padronizar o uso dos nomes e facilitar futuras investigações etnobotânicas e taxonômicas. No segundo capítulo, avaliou-se a capacidade de algoritmos de aprendizado de máquina em recuperar classificações etnotaxonômicas (categorias tradicionalmente reconhecidas por comunidades Ayahuasqueiras) de *B. caapi* a partir de imagens digitais de folhas herborizadas. Foram analisadas 768 imagens das faces adaxial e abaxial de folhas provenientes de 47 indivíduos, majoritariamente representando nove etnotaxa de *B. caapi*, além de *Diplopteryx cabrerana* como grupo externo. Características relacionadas à cor, forma e textura foram extraídas e submetidas a seis algoritmos de classificação. Embora os desempenhos tenham sido estatisticamente semelhantes, o algoritmo Support Vector Machine (SVM) apresentou a maior acurácia geral (70%), especialmente quando consideradas conjuntamente as duas faces foliares. A matriz de confusão indicou elevada precisão para determinados etnotaxa e maior sobreposição morfológica em outros, refletindo padrões parcialmente consistentes com classificações etnobotânicas prévias. Os resultados demonstram que a integração entre morfologia foliar

e inteligência artificial constitui ferramenta promissora para a validação e sistematização de categorias etnotaxonômicas, contribuindo para o diálogo entre conhecimento tradicional e taxonomia científica. O terceiro capítulo investiga a diversidade morfoanatômica foliar de etnotaxa de *B. caapi* e das espécies relacionadas *Alicia macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, integrando análises macromorfológicas, anatômicas e micromorfológicas. Os caracteres foram organizados em matriz comparativa e analisados por métodos multivariados de similaridade. Os resultados evidenciaram delimitação morfoanatômica consistente entre as espécies relacionadas, sustentando sua distinção interespecífica. Em relação aos etnotaxa de *B. caapi*, observou-se elevada variabilidade morfoanatômica intraespecífica, com ampla sobreposição de caracteres. Embora compartilhem a maior parte dos atributos estruturais avaliados, alguns, especialmente Caupuri e Quebrador, apresentaram caracteres exclusivos e combinações morfoanatômicas raras que promoveram sua segregação consistente nas análises multivariadas. Tais evidências revelam organização morfoanatômica interna em *B. caapi*, demonstrando que os etnotaxa não constituem categorias arbitrárias, ainda que a formalização de subdivisões taxonômicas exija integração com outros conjuntos de dados. A integração entre caracteres qualitativos e quantitativos demonstrou-se abordagem robusta para distinguir variação intraespecífica de diferenciação interespecífica, especialmente diante da recorrente ausência de material fértil em coleções botânicas. Com tudo, este trabalho contribui para o resgate e sistematização do conhecimento tradicional, promove avanços na taxonomia de um grupo de plantas de alto valor etnobotânico e oferece suporte técnico-científico para estratégias de conservação e reconhecimento da diversidade associada ao uso da Ayahuasca e a biodiversidade Amazônica.

Palavras-chave: *Banisteriopsis caapi*; taxonomia vegetal; morfoanatomia; tipificação nomenclatural; inteligência artificial; etnotaxonomia.

ABSTRACT

Ayahuasca is an Amazonian ritual beverage traditionally prepared by combining stems of *Banisteriopsis caapi* (Malpighiaceae) and leaves of *Psychotria viridis* (Rubiaceae). *B. caapi* is considered a “sacred plant” by many traditional peoples, and its use has expanded globally across religious, therapeutic, and cultural contexts. The botanical complexity associated with the components of the brew, particularly the diversity of ethnotaxa and species related to *B. caapi*, continues to pose challenges for taxonomy due to the scarcity of fertile material in scientific collections and the frequent overlap between traditionally recognized ethnotaxa and formally described species. This dissertation adopts an integrative approach aimed at expanding the taxonomic and morpho-anatomical knowledge of *B. caapi*, its ethnotaxa, and other Malpighiaceae species associated with Ayahuasca use. To this end, nomenclatural revision studies, morpho-anatomical analyses, and computational tools supporting taxonomic investigation were developed. The first chapter addresses nomenclatural inconsistencies involving lesser-known species associated with Ayahuasca. Based on bibliographic review and examination of historical type specimens, incongruities were identified in the circumscription of species within *Banisteriopsis*, *Diplopterys*, and *Tetrapteryx*. To resolve these issues and ensure taxonomic stability, seven lectotypifications were proposed in accordance with the International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (ICN), standardizing name usage and facilitating future ethnobotanical and taxonomic research. The second chapter evaluated the ability of machine learning algorithms to recover ethnotaxonomic classifications (categories traditionally recognized by Ayahuasca communities) of *B. caapi* using digital images of dried leaves. A total of 768 images of adaxial and abaxial leaf surfaces from 47 individuals, mostly representing nine ethnotaxa of *B. caapi*, with *Diplopteryx cabrerana* included as an outgroup, were analyzed. Features related to color, shape, and texture were extracted and submitted to six classification algorithms. Although algorithm performance did not differ statistically, the Support Vector Machine (SVM) achieved the highest overall accuracy (70%), particularly when both leaf surfaces were analyzed jointly. The confusion matrix revealed high precision for certain ethnotaxa and greater morphological overlap for others, reflecting patterns partially consistent with previous ethnobotanical classifications. These findings demonstrate that integrating leaf morphology and artificial intelligence constitutes a promising tool for validating and systematizing ethnotaxonomic categories, strengthening the dialogue between traditional

knowledge and scientific taxonomy. The third chapter investigates the foliar morpho-anatomical diversity of *B. caapi* ethnotaxa and related species *Alicia macrodisca*, *D. cabrerana*, and *D. pubipetala* through integrated macromorphological, anatomical, and micromorphological analyses. Characters were organized into a comparative matrix and analyzed using multivariate similarity methods. Results revealed consistent morpho-anatomical delimitation among the related species, supporting their interspecific distinction. In contrast, *B. caapi* ethnotaxa exhibited high intra-specific morpho-anatomical variability and broad character overlap. Although most structural attributes were shared, some groups, particularly Caupuri and Quebrador, displayed exclusive characters and rare morpho-anatomical combinations that resulted in consistent segregation in multivariate analyses. These findings reveal internal morpho-anatomical structuring within *B. caapi*, indicating that ethnotaxa do not represent arbitrary categories, although the formal recognition of infra-specific subdivisions would require integration with additional data sources. The integration of qualitative and quantitative characters proved to be a robust approach for distinguishing intra-specific variation from interspecific differentiation, particularly in light of the recurrent absence of fertile material in botanical collections. Overall, this work contributes to the recovery and systematization of traditional knowledge, advances the taxonomy of a plant group of high ethnobotanical value, and provides technical-scientific support for conservation strategies and for recognizing the diversity associated with Ayahuasca use and Amazonian biodiversity.

Key-words: *Banisteriopsis caapi*; plant taxonomy; morpho-anatomy; nomenclatural typification; artificial intelligence; ethnobotany.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A ocupação dos ambientes terrestres pelo homem se relaciona com o uso e domesticação das plantas (Diamond, 2002; Diamond & Bellwood, 2003). Esse processo culminou para a formação das primeiras sociedades, evoluindo para o advento da agricultura e o surgimento de síndromes de domesticação, com a distinção das plantas cultivadas por caracteres que derivam de seus ancestrais (Ladizinsky, 1998; Brown et al., 2009; Diamond, 2002; Fuller, 2007; Veasey et al., 2011).

Essas evidências são hipotetizadas para todos os povos e regiões, inclusive, para o desenvolvimento das primeiras e complexas sociedades da Amazônia (Piperno & Pearsall, 1998; Clement et al., 2015). Destacando-se, ainda, o uso de plantas em rituais, como o consumo da Ayahuasca, por alguns defendida como de uso milenar (Naranjo, 1986, 1995), ou mais recente, supostamente introduzido pelos seringueiros (Ogalde et al., 2009, 2010; Miller et al., 2019).

Ayahuasca é o termo que denomina a bebida resultante da combinação, prioritariamente, de duas plantas: *Banisteriopsis caapi* (Spruce ex Griseb.) Morton (Malpighiaceae) e *Psychotria viridis* Ruiz & Pav. (Rubiaceae). A bebida, inicialmente consumida por povos indígenas, pode ser também conhecida como *yajé*, *caapi*, *vine of gold*, *hoasca*, *kahi*, vegetal, daime, entre outros. Essa variação de nomes se dá pelo uso inicial por povos amazônicos originários e à expansão relativamente recente de consumo, difundida por seringueiros que formaram religiões não indígenas (Labate & Araújo, 2002; Gomes, 2016; Assis & Rodrigues, 2017; Oliveira et al., 2018; Tukano, 2021). No Brasil, destaca-se as religiões do Santo Daime, Barquinha e União do Vegetal, e o país é o único que possui regulamentação legal para o uso religioso do chá (Tupper, 2009; Labate & Araújo, 2002; Costa et al., 2005; ICEFLU Santo Daime, 2015; Tukano, 2021).

A partir da difusão das religiões ayahuasqueiras o uso da Ayahuasca ganhou proporções mundiais, sendo consumida também para fins além do religioso na América do Norte, Europa, Ásia e Oceania. Essa expansão do uso da Ayahuasca deve-se à busca pelo autoconhecimento, melhoria das relações sociais, moral, espiritual, sobrenatural (Labate & Araújo, 2002; Costa et al., 2005; ICEFLU Santo Daime, 2015; Tukano, 2021), e, também, medicinal (Palhano-Fontes et al., 2019). Com tantos atributos e pelo uso expandido a quase todos os continentes, torna-se fundamental a correta identificação e reconhecimento das espécies vegetais que são matéria prima do chá.

Banisteriopsis é caracterizado pela presença de folhas simples, opostas, inteiras e frequentemente com presença de glândulas no pecíolo, na base ou margem. As flores são hermafroditas, com cinco pétalas unguiculadas, variando entre branco, rosa e tons de amarelo, com a pétala posterior diferenciada das demais. O fruto é do tipo samarídeo, composto por três mericarpos, cada um com uma asa dorsal bem desenvolvida e pericarpo lenhoso (Gates, 1982).

Gates (1982) aceitou 92 espécies em *Banisteriopsis* e os subgêneros *Banisteriopsis*, *Hemiramma* (Griseb) B.Gates e *Pleiopterys* (Nied.) B.Gates, distribuindo as espécies em grupos sem categoria taxonômica e baseando-se em caracteres morfológicos. Os grupos informais de Gates (1982) agrupam espécies complexas, com evidências de possíveis hibridações, permanecendo lacunas na circunscrição de taxa e gerando o acúmulo de espécimes não identificados em herbários.

Na tentativa de solucionar algumas dessas inconsistências, Anderson & Davis (2006) e Davis & Anderson (2010), realizaram estudos morfológico e moleculares e propuseram uma hipótese filogenética para a Malpighiaceae. *Banisteriopsis* sentido amplo, ou seja, conforme a circunscrição dada por Gates (1982) não é monofilético. Para tornar *Banisteriopsis* monofilético, as espécies de *B.* subgen. *Pleiopterys* foram re combinadas em *Diplopterys* A.Juss. e *B.* subgen. *Hemiramma* foram transferidas para o novo gênero *Bronwenia* W.R. Anderson & C. Davis (Davis & Anderson, 2010).

Banisteriopsis sentido restrito é composto por 61 espécies distribuídas desde o México até a Argentina, com maior número de táxons nas regiões tropicais da América do Sul, com predomínio de lianas ou arbustos lenhosos que habitam florestas tropicais e savanas (Powo, 2023). Estão registradas no Brasil 50 espécies, 30 das quais no bioma Cerrado (Francener & Almeida 2020).

O preparo da Ayahuasca, conforme citado anteriormente, é resultado da combinação de *Banisteriopsis caapi*, um cipó do qual se usa o caule lenhoso e, as folhas de *Psychotria viridis*. No entanto, existem relatos do uso de outras plantas na composição da bebida (Schultes, 1954, Gates, 1982, Schultes, 2001, Oliveira et al., 2023). A composição do chá é ainda mais complexa, quando se considera, dentro da circunscrição de *B. caapi*, os dezenas de etnotaxas reconhecidos – ou seja, unidades taxonômicas distinguidas pelas comunidades tradicionais, (Spruce, 1908; Langdon, 1974; Schultes, 1986; Davis, 1996; Oliveira et al., 2018; Monteles, 2020, Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023).

Além da tamanha complexidade de *Banisteriopsis caapi* e taxa relacionados, adiciona-se as múltiplas dificuldades na coleta dos vegetais que compõe a Ayahuasca, 1) por serem considerados Plantas Sagradas; 2) possuírem florescimento irregular e curto e; 3) a dificuldade de localização das populações nativas de cipós, no dossel da floresta amazônica (Amorim et al., 2017; Oliveira et al., 2018). Esses fatores geraram escassez de espécimes em herbários, principalmente de materiais férteis, pois flores e/ou frutos são necessários para a identificação das espécies de *Banisteriopsis*, o que gera limitações para estudos taxonômicos (Cuatrecasas, 1958; Gates, 1982; Schultes, 1986; Oliveira et al., 2018). Soma-se o fato de que, alguns nomes de Malpighiaceae relacionadas à Ayahuasca são inválidos, isto é, não apresentam tipo designado. Esse foi o caso de *Banisteriopsis caapi* e seu sinônimo *B. quitensis* (Nied.) C.V.Morton, cujos tipos foram recentemente designados por Oliveira et al. (2021).

A problemática taxonômica é exemplificada na relação entre *Banisteriopsis caapi*, *B. inebrians* C.V.Morton e *B. quitensis*. *Banisteriopsis inebrians* foi descrita como espécie distinta e usada por indígenas da Colômbia, Equador e Peru e denominada pelas comunidades tradicionais como “yagé del monte” (Morton, 1931). Embora *B. inebrians* tenha sido aceita dentro da circunscrição de *B. caapi* por Gates (1982) que fez um trabalho amplo com o gênero e, então, é seguida pelas bases de dados taxonômicas mais importantes (Pow, 2023; Tropicos, 2022; Flora e Funga do Brasil, 2022), é aceita como distinta por autores importantes no estudo do grupo (Cuatrecasas, 1958; Schultes, 1982 e Schultes et al. 2001). Nessa questão é necessário considerar que Cuatrecasas e, principalmente, Schultes, sem dúvida alguma, coletaram e/ou observaram diversos indivíduos de cipós enquanto Gates (1982), conforme expresso pela própria autora, não teve oportunidade de coletá-los. A principal diferenciação observada pelos povos tradicionais, está no caule, que geralmente, não consta das amostras de herbário (Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023).

De maneira geral, também são relatadas outras inconsistências que se relacionam a circunscrição de *Banisteriopsis caapi*, Cuatrecasas (1958), por exemplo, destaca a confusão de Niedenzu (1928) que atribuiu para *B. caapi* flores amarelas. Flores amarelas também foi incluída na descrição de *B. caapi* feita por (Gates, 1982), que seria uma espécie com flores amarelas ou róseas e brancas na maturidade.

Há registros de uso de *Banisteriopsis muricata* (Cav.) Cuatrec. no preparo da Ayahuasca por povos do Peru (Gates, 1982). Gates (1982) descreveu *B. schunkei* W.R. Anderson & C. Davis com base num etnotaxa de Ayahuasca, também para o Peru. Outra

espécie citada para a produção da Ayahuasca é *Diplopterys longialata* (Ruiz ex Nied.) W.R.Anderson & C.C.Davis, relacionada ao grupo informal *D. pubipetala* (Adr. Juss.) W.R. Anderson & C. Davis, que engloba *D. platyptera* (Griseb). Cuatrec., *D. erianthera* (Adr. Juss.) W.R. Anderson & C. Davis e *D. schunkei*. *Diplopterys cabrerana* (Cuatrec.) B.Gates também é relacionado ao chá, embora não seja fornecedor de betacarbolinas (Malcolm & Lee, 2018; Oliveira et al., 2023) e *D. cf. pubipetala* foi citado como de uso na produção de chás de uma religião brasileira (Oliveira et al. 2023). Além de *Diplopterys*, Schultes (1954) descreveu *Tetrapteryx methystica* R.E. Schultes e *T. mucronata* Cav. como componentes da Ayahuasca.

Com base no exposto, fica claro que vários dos etnotaxa foram reconhecidos como taxa por taxonomistas de Malpighiaceae. Há o reconhecimento de, pelo menos, 18 etnotaxa entre os grupos religiosos brasileiros e nem todos, estão documentados satisfatoriamente em herbário, havendo vários vouchers limitados à ramos estéreis (Oliveira et al., 2023). Uma das tarefas que esse projeto se propõe, é verificar se entre os etnotaxa de *B. caapi* há imerso espécies já descritas ou com caracteres taxonômicos que justifiquem a investigação de prováveis taxa a serem descritos.

Para se compreender a evolução e adaptações de *B. caapi*, é necessário aprofundar os estudos com as espécies filogeneticamente relacionadas e aquelas que não foram incluídas na filogenia, mas que são relacionadas às espécies do clado (*Banisteriopsis schwanniioides* (Griseb.) B.Gates, *B. confusa* B.Gates, *B. latifolia* (A.Juss.) B.Gates, *B. adenopoda* (A.Juss.) B.Gates, *B. pulchra* B.Gates, *B. membranifolia* (A.Juss.) B.Gates, *B. oxyclada* (A.Juss.) B.Gates, *B. variabilis* B.Gates, *B. muricata*, *B. malifolia* (Nees & Mart.) B.Gates, *B. harleyi* B.Gates, *B. argyrophylla* (A. Juss.) B. Gates, *B. hirsuta* B. Gates, *B. hatschbachii* B.Gates, *Glicophyllum stylopterum*, *Diplopterys pubipetala*, *D. longialata*, *D. cabrerana*, *D. schunkei* e *Tetrapteryx methystica* e *Tetrapteryx mucronata*.

Um dos fatores que respalda a presente proposta, foi a coleta de *Diplopterys pubipetala* erroneamente identificado como *B. caapi* por um informante. A planta usada na preparação da Ayahuasca teve seu espécime identificado por meio da anatomia do caule (Oliveira et al., 2023). Fato que evidencia a importância da anatomia na distinção de Malpighiaceae.

A morfologia e a anatomia constituem ferramentas fundamentais na identificação e delimitação de espécies vegetais (Judd et al., 2007). Em grupos botânicos que apresentam alta similaridade morfológica e plasticidade fenotípica, como as Malpighiaceae, a morfoanatomia de pecíolo, folhas associado ao estudo os padrões de

nervação apresenta destacado valor taxonômico em *Banisteriopsis* (Araújo et al., 2020), além de estudos anatômicos do caule (Nagamine-Pinheiro et al., 2021; Oliveira et al., 2023).

Além dos caracteres vegetativos, tradicionalmente, a morfologia das flores e dos frutos tem desempenhado um papel central na delimitação taxonômica de Malpighiaceae, uma vez que caracteres reprodutivos, como a forma e disposição das pétalas, estrutura das glândulas e morfologia do fruto, tendem a ser mais conservadores e diagnósticos para o reconhecimento de espécies e gêneros (Gates, 1982; Anderson, 1979; Anderson & Davis, 2006; C. C. Davis & Anderson, 2010). No entanto, no caso dos cipós do Ayahuasca, o uso exclusivo desses caracteres pode ser limitado devido à sazonalidade da floração e frutificação, bem como à dificuldade de acesso a materiais férteis em ambientes naturais ou em cultivo (Oliveira et al., 2023).

Esse contexto reforça a importância do estudo de caracteres vegetativos, particularmente aqueles relacionados à morfologia e anatomia foliar, que estão permanentemente disponíveis ao longo do ciclo de vida da planta. Mas também evidencia a necessidade de estudos que forneçam elementos diagnósticos de caracteres reprodutivos importantes para a distinção de taxa. Além de que, incorporar ferramentas de descrição qualitativa e quantitativas, como algoritmos, análises de aprendizado de máquina e inteligência artificial na determinação de parâmetros morfológicos e anatômicos podem se apresentar como ferramentas alternativas para a taxonomia (Lang et al., 2015; Wäldchen & Mäder, 2018; Diniz et al., 2019; Bambil et al., 2020), testando delimitações já preestabelecidas e ampliando novas propostas para a circunscrição de *B. caapi*.

Arelado ao contexto de implicações taxonômicas, a difusão do uso da Ayahuasca e o desmatamento acelerado da floresta amazônica, vem gerando preocupação quanto a preservação de *B. caapi*. No Acre, a Resolução Conjunta CEMACT/CFE Nº 004 de 20 de dezembro de 2010, mostra que há uma preocupação quanto ao controle de corte das espécies que compõe a Ayahuasca e, em especial, de *B. caapi*, já que desse cipó, o caule (às vezes com as raízes), é o órgão utilizado o que pode gerar a perda do genótipo no primeiro ou segundo corte.

Dessa forma, embora muito se tenha avançado com os estudos morfológicos e filogenéticos, ainda existem lacunas sobre a circunscrição e caracterização das espécies relacionadas à Ayahuasca e ao clado de *B. caapi*. O reconhecimento do material estéril é importante, já que se proliferaram pelos herbários e documentam etnotaxa, incluindo coletas históricas além de importantes para a fiscalização e usuários. A correta

identificação dos componentes do chá é parâmetro crucial para adicionar bem-estar ao usuário da Ayahuasca e para a fiscalização e preservação das espécies de Malpighiaceae componentes do chá.

O uso de técnicas de análises morfológicas de folhas como radiografia digital, microscopia eletrônica de varredura e de imagens associada à inteligência artificial e estatística, implica no resgate e análise da ampla coleção estéril disponível em herbários de todo mundo e, pode auxiliar à fiscalização ambiental. O reconhecimento da circunscrição dessa espécie amplamente utilizada na produção da Ayahuasca é a base para a compreensão da variação química encontrada entre os chás, implicando em segurança aos consumidores, e para programas de conservação da(s) espécie(s) e de linhagens com efeitos químicos e medicinais distintos.

2. HIPÓTESES

1. As características morfo-anatômicas das folhas de *Banisteriopsis caapi*, seus etnotaxa e espécies relacionadas apresentam variações estruturais significativas, permitindo sua diferenciação com base em padrões de nervação, presença de glândulas, organização dos tecidos da lâmina foliar e estrutura do pecíolo. Essas diferenças refletem variações genéticas e ecológicas dentro da espécie, sendo úteis como caracteres taxonômicos.

2. A aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina à análise de imagens foliares permitirá a extração automatizada de caracteres morfológicos e anatômicos, contribuindo para a identificação objetiva e eficiente dos etnotaxa de *Banisteriopsis caapi* e *Diplopterys*.

3. A sistematização dos dados morfoanatômicos e computacionais contribuirá para a validação científica da nomenclatura tradicional dos etnotaxa de *B. caapi*, promovendo maior controle sobre a composição da ayahuasca e fornecendo subsídios para ações de conservação e valorização do conhecimento etnobotânico.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Ampliar o conhecimento morfoanatômico e taxonômico de *Banisteriopsis caapi*, seus etnotaxa e espécies de Malpighiaceae relacionadas a Ayahuasca.

3.2. Específicos

- Realizar a revisão nomenclatural e a tipificação de nomes de espécies de Malpighiaceae associadas ao uso tradicional da Ayahuasca, com base no Código Internacional de Nomenclatura Botânica, visando à estabilidade taxonômica e ao suporte a estudos de conservação, etnobotânica e morfoanatômicos.
- Testar o uso de visão computacional na classificação de imagens de lâminas foliares, com foco na extração de caracteres morfológicos para a identificação e diferenciação de etnotaxa de *B. caapi*.
- Descrever e avaliar o valor taxonômico de características morfoanatômicas foliares de etnotaxa e espécies relacionadas a *B. caapi*, incluindo análises do padrão de nervação por radiografia e da superfície foliar por MEV.

4. REFERÊNCIAS

- Amorim, A. M., Marinho, L. C., Pessoa, C., & Pace, M. R. (2017). A new Heteropterys (Malpighiaceae) from semideciduous forest, with notes on wood anatomy. *Plant Systematics and Evolution*, 303(2), 177–185. <https://doi.org/10.1007/s00606-016-1360-0>
- Anderson, W. R. (1979). Floral Conservatism in Neotropical Malpighiaceae. *Biotropica*, 11(3), 219–223. <https://doi.org/10.2307/2388042>
- Anderson, W. R., & Davis, C. C. (2006). Expansion of Diplopterys at the expense of Banisteriopsis (Malpighiaceae). *Harvard Papers in Botany*, 11(1), 1–16. [https://doi.org/10.3100/1043-4534\(2006\)95\[1:EODATE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)95[1:EODATE]2.0.CO;2)
- Araújo, J. S., Almeida, R. F. de, & Meira, R. M. S. A. (2020a). Taxonomic relevance of leaf anatomy in Banisteriopsis C.B. Rob. (Malpighiaceae). *Acta Botanica Brasilica*, 34(1), 214–228. <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0276>
- Araújo, J. S., Almeida, R. F. de, & Meira, R. M. S. A. (2020b). Taxonomic relevance of leaf anatomy in Banisteriopsis C.B. Rob. (Malpighiaceae). *Acta Botanica Brasilica*, 34(1), 214–228. <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0276>

- Araújo, J. S., & Meira, R. M. S. A. (2016). Comparative anatomy of calyx and foliar glands of *Banisteriopsis* C. B. Rob. (Malpighiaceae). *Acta Botanica Brasilica*, 30(1), 112–123. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0248>
- Assis, G. L. D., & Rodrigues, J. A. (2017). De quem é a ayahuasca? Notas sobre a patrimonialização de uma “bebida sagrada” amazônica. *Religião & Sociedade*, 37(3), 46–70. <https://doi.org/10.1590/0100-85872017v37n3cap02>
- Bambil, D., Pistori, H., Bao, F., Weber, V., Alves, F. M., Gonçalves, E. G., de Alencar Figueiredo, L. F., Abreu, U. G. P., Arruda, R., & Bortolotto, I. M. (2020). Plant species identification using color learning resources, shape, texture, through machine learning and artificial neural networks. *Environment Systems and Decisions*, 40(4), 480–484. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09769-w>
- Brown, T. A., Jones, M. K., Powell, W., & Allaby, R. G. (2009). The complex origins of domesticated crops in the Fertile Crescent. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(2), 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.09.008>
- Clement, C. R., Denevan, W. M., Heckenberger, M. J., Junqueira, A. B., Neves, E. G., Teixeira, W. G., & Woods, W. I. (2015). The domestication of Amazonia before European conquest. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1812), 20150813. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0813>
- Costa, M. C. M., Figueiredo, M. C., & Cazenave, S. de O. S. (2005). Ayahuasca: Uma abordagem toxicológica do uso ritualístico. *Archives of Clinical Psychiatry (São Paulo)*, 32(6), 310–318. <https://doi.org/10.1590/S0101-60832005000600001>
- Cuatrecasas, J. (1958). Prima Flora Colombiana. *Webbia*, 13(2), 343–664. <https://doi.org/10.1080/00837792.1958.10669680>

- Davis, C. C., & Anderson, W. R. (2010). A complete generic phylogeny of Malpighiaceae inferred from nucleotide sequence data and morphology. *American Journal of Botany*, 97(12), 2031–2048. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000146>
- Davis, W. (1996). *One River: Explorations and Discoveries in the Amazon Rain Forest*. Simon & Schuster.
- Diamond, J. (2002). Evolution, consequences and future of plant and animal domestication. *Nature*, 418(6898), Article 6898. <https://doi.org/10.1038/nature01019>
- Diamond, J., & Bellwood, P. (2003). Farmers and Their Languages: The First Expansions. *Science*, 300(5619), 597–603. <https://doi.org/10.1126/science.1078208>
- Dickison, W. C. (2000). *Integrative Plant Anatomy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-215170-5.X5000-6>
- Diniz, C., Grattapaglia, D., & de Alencar Figueiredo, L. (2019). Comparative performance of bench and portable near infrared spectrometers for measuring wood samples of two Eucalyptus species (E. pellita and E. benthamii). *Proceedings of the 18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy*, 31–38. <https://doi.org/10.1255/nir2017.031>
- Ellis, B., Daly, D. C., Hickey, L. J., Johnson, K. R., Mitchell, J. D., Wilf, P., & Wing, S. L. (Eds.). (2009). *Manual of leaf architecture*. Cornell University Press.
- Francener, A., & Almeida, R. F. (2020). *Banisteriopsis in Flora e Funga do Brasil*. <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB8803>
- Fuller, D. Q. (2007). Contrasting Patterns in Crop Domestication and Domestication Rates: Recent Archaeobotanical Insights from the Old World. *Annals of Botany*, 100(5), 903–924. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm048>

- Gates, B. (1982). *Banisteriopsis, Diplopterys (Malpighiaceae)*. The New York Botanical Garden.
- Gomes, B. R. (2016). *O uso ritual da ayahuasca na atenção à população em situação de rua*. EDUFBA.
- Hammerman, A. F. (1930). *Revue de Botanique Appliquée et d' Agriculture Tropicale. Le Yage En Amazonie*, 10, 600–604.
- ICEFLU Santo Daime. (2015). *Histórico sobre a ayahuasca*.
<https://www.santodaime.org/site/religiao-da-floresta/o-santo-daime/historico-sobre-a-ayahuasca>
- Johansen, D. A. (1941). Plant Microtechnique. *Nature*, 147(3721), 222–222.
<https://doi.org/10.1038/147222b0>
- Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (2007). *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach* (3rd ed.). Sinauer Associates.
<https://www.sinauer.com/plant-systematics-a-phylogenetic-approach-3rd-edition.html>
- Kraus, J. E., & Arduin, M. (1997). *Manual básico de métodos em morfologia vegetal*. EDUR. <https://repositorio.usp.br/item/000930286>
- Labate, B. C., & Araújo, W. S. (2002). *O uso Ritual da Ayahuasca*. Mercado das letras - FAPESP.
- Labate, B. C., & Assis, G. L. D. (2018). A critical review of the literature on the diaspora of Brazilian ayahuasca religions. In *The Expanding World Ayahuasca Diaspora* (1st ed., p. 244). Routledge.
<https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9781315227955/expanding-world-ayahuasca-diaspora-beatriz-caiuby-labate-clancy-cavnar>

- Ladizinsky, G. (1998). *Plant Evolution under Domestication*. Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-011-4429-2>
- Lamarca, E. V., Oliveira Júnior, C. J. F. de, & Barbedo, C. J. (2020). Etnobotânica na conservação de espécies com sementes sensíveis à dessecação: O exemplo da *Eugenia brasiliensis* Lam. *Hoehnea*, 47, e372019. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-37/2019>
- Lang, C., Costa, F. R. C., Camargo, J. L. C., Durgante, F. M., & Vicentini, A. (2015). Near Infrared Spectroscopy Facilitates Rapid Identification of Both Young and Mature Amazonian Tree Species. *PLOS ONE*, 10(8), e0134521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134521>
- Langdon, E. J. M. (1974). *The Sioma Medical System: Beliefs and Behavior* [Tese]. Tulane University.
- Luz, T. Z., Cunha-Machado, A. S., & da Silva Batista, J. (2023). First DNA barcode efficiency assessment for an important ingredient in the Amazonian ayahuasca tea: Mariri/jagube, *Banisteriopsis* (Malpighiaceae). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(6), 1605–1616. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01522-3>
- Macbride, J. F. (1950). *Flora of Peru* (Vol. 13, pp. 1–236). Field Museum of Natural History. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/19784>
- Martin, G. J. (1995). Ethnobotany, conservation and community development. In G. J. Martin (Ed.), *Ethnobotany: A methods manual* (pp. 223–251). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2496-0_8
- McKenna, D. J., Towers, G. H., & Abbott, F. (1984). Monoamine oxidase inhibitors in South American hallucinogenic plants: Tryptamine and beta-carboline constituents of ayahuasca. *Journal of Ethnopharmacology*, 10(2), 195–223. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(84\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0378-8741(84)90003-5)

- McKenna, D., & Riba, J. (2015). New World Tryptamine Hallucinogens and the Neuroscience of Ayahuasca. In *Current Topics in Behavioral Neurosciences* (1st ed., pp. 1–27). Springer. https://doi.org/10.1007/7854_2015_368
- Miller, M. J., Albarracin-Jordan, J., Moore, C., & Capriles, J. M. (2019). Chemical evidence for the use of multiple psychotropic plants in a 1,000-year-old ritual bundle from South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(23), 11207–11212. <https://doi.org/10.1073/pnas.1902174116>
- Monteles, R. (2020). “*Eu venho da floresta*”: A sustentabilidade das plantas sagradas Amazônicas do Santo Daime. [Tese]. Universidade Federal do Amazonas.
- Morton, C. V. (1931). Journal of the Washington Academy of Sciences. *Notes on Yagé, a Drug Plant of Southeastern Colombia*, 20, 486–488.
- Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C. W., Gomes, S. M., Oliveira, R. C., & Sonsin-Oliveira, J. (2021). Vegetative anatomy, morphology and histochemistry of three species of Malpighiaceae used in analogues of the Amazonian psychoactive beverage Ayahuasca. *Flora*, 275, 151760. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151760>
- Naranjo, P. (1986). El ayahuasca en la arqueología ecuatoriana. *América Indígena*.
- Naranjo, P. (1995). Archaeology and psychoactive plants. In R. E. Schultes & S. Von Reis (Eds.), *Ethnobotany: Evolution of a discipline* (pp. 393–399). Dioscorides Press.
- Nieden zu, F. (1928). Malpighiaceae. In A. Engler (Ed.), *Das Pflanzenreich: Regni vegetabilis conspectus* (pp. 1–870). ST: W. Engelmann.
- Ogalde, J. P., Arriaza, B. T., & Soto, E. C. (2009). Identification of psychoactive alkaloids in ancient Andean human hair by gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.09.036>

- Ogalde, J. P., Arriaza, B. T., & Soto, E. C. (2010). Uso de plantas psicoactivas en el norte de Chile: Evidencia química del consumo de ayahuasca durante el Periodo Medio (500–1000 d.C.). *Latin American Antiquity*, 21(4), 441–450. <https://doi.org/10.7183/1045-6635.21.4.441>
- Oliveira, R. C. de, Fagg, C. W., Labate, B. C., & Sonsin-Oliveira, J. (2018, September 27). The Urgent Need to Review the Botanical Classification of the Ayahuasca Vine. *Chacruna*. <https://chacruna.net/urgent-botanical-classification-ayahuasca/>
- Oliveira, R. C., Behrens, C. S. B., Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C. W., Silva, M. S., Martins-Silva, T., & Sonsin-Oliveira, J. (2023). Ethnobotany and Wood Anatomy of *Banisteriopsis caapi* Ethnotaxa and *Diplopterys* cf. *Pubipetala*, Components of Ayahuasca in Brazilian Rituals. *Economic Botany*, 77(1), 18–47. <https://doi.org/10.1007/s12231-023-09567-w>
- Oliveira, R. C., Sonsin-Oliveira, J., Santos, T. A. C., Simas e Silva, M., Fagg, C. W., & Sebastiani, R. (2021). Lectotypification of *Banisteriopsis caapi* and *B. quitensis* (Malpighiaceae), names associated with an important ingredient of Ayahuasca. *TAXON*, 70(1), 185–188. <https://doi.org/10.1002/tax.12407>
- Paiva, J. G. A. de, Fank-de-Carvalho, S. M., Magalhães, M. P., & Graciano-Ribeiro, D. (2006). Verniz vitral incolor 500®: Uma alternativa de meio de montagem economicamente viável. *Acta Botanica Brasilica*, 20, 257–264. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062006000200002>
- Palhano-Fontes, F., Alchieri, J. C., Oliveira, J. P. M., Soares, B. L., Hallak, J. E. C., Galvao-Coelho, N., & de Araujo, D. B. (2014). The Therapeutic Potentials of Ayahuasca in the Treatment of Depression. In B. C. Labate & C. Cavnar (Eds.), *The Therapeutic Use of Ayahuasca* (pp. 23–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40426-9_2

- Palhano-Fontes, F., Barreto, D., Onias, H., Andrade, K. C., Novaes, M. M., Pessoa, J. A., Mota-Rolim, S. A., Osório, F. L., Sanches, R., dos Santos, R. G., Tófoli, L. F., de Oliveira Silveira, G., Yonamine, M., Riba, J., Santos, F. R., Silva-Junior, A. A., Alchieri, J. C., Galvão-Coelho, N. L., Lobão-Soares, B., ... Araújo, D. B. (2019). Rapid antidepressant effects of the psychedelic ayahuasca in treatment-resistant depression: A randomized placebo-controlled trial. *Psychological Medicine*, 49(4), 655–663. <https://doi.org/10.1017/S0033291718001356>
- Piperno, D. R., & Pearsall, D. M. (1998). *The origins of agriculture in the lowland Neotropics*. Academic Press.
- Powo. (2023). *Powo—Plants of the World Online*. Plants of the World Online. <https://powo.science.kew.org/>
- Schultes, R. E. (1954). A NEW NARCOTIC SNUFF FROM THE NORTHWEST AMAZON. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University*, 16(9), 241–260.
- Schultes, R. E. (1982). The beta-carboline Hallucinogens of South America. *Journal of Psychoactive Drugs*, 14(3), 205–220. <https://doi.org/10.1080/02791072.1982.10471930>
- Schultes, R. E. (1986). Recognition of variability in wild plants by indians of the Northwest Amazon. *Journal of Ethnobiology*, 6, 229–238.
- Spruce, R. (1908). Notes of a botanist on the Amazon and Andes. In A. R. Wallace (Ed.), *Notes of a botanist on the Amazon & Andes*.
- Tukano, D. (2021, May 27). *Ayahuasca e os desafios dos conhecimentos indígenas diante da globalização*. daiaratukano. <https://www.daiaaratukano.com/post/ayahuasca-e-os-desafios-dos-conhecimentos-indigenas-diante-da-globalizacao>

- Tupper, K. W. (2009). Ayahuasca healing beyond the Amazon: The globalization of a traditional indigenous entheogenic practice. *Global Networks*, 9(1), 117–136. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2009.00245.x>
- Veasey, E. A., Piotto, F. A., Nascimento, W. F. do, Rodrigues, J. F., Mezette, T. F., Borges, A., Biguzzi, F. A., Santos, F. R. C. dos, Sobierajski, G. da R., Recchia, G. H., & Mistro, J. C. (2011). Processos evolutivos e a origem das plantas cultivadas. *Ciência Rural*, 41, 1218–1228. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000700018>
- Wäldchen, J., & Mäder, P. (2018). Plant Species Identification Using Computer Vision Techniques: A Systematic Literature Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(2), 507–543. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9206-z>

5. CAPÍTULO I

Artigo submetido a Revista Brittonia, ISSN versão online: 1938-436X

Typification of names of Malpighiaceae related to little-known species of Ayahuasca

SCHEILA CRISTINA BIAZATTI^{1,2}; ARILDO G. PEREIRA³; YURANI CAROLINA SAAVEDRA SAENZ¹ & REGINA CÉLIA OLIVEIRA¹

1 Programa de Pós-Graduação em Botânica, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Caixa Postal 04457, 70910-970, Brasília, DF, Brasil.

2 Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Rondônia, 76940-000, Rondônia, Brasil.

3 Mestre em Agroecologia e Desenvolvimento Rural, Universidade Federal de São Carlos

Abstract

Ayahuasca is a generic name given to entheogenic teas traditionally used by Amazonian peoples and, with recent worldwide expansion. The best-known combination of Ayahuasca is the decoctions of the stems of the vine *Banisteriopsis caapi* (Malpighiaceae) and the leaves of *Psychotria viridis* (Rubiaceae). However, there are other vines, from different genera of the Malpighiaceae family, documented in the composition of the tea produced by ethnic groups from different regions of the Amazon and the recognition of "types" or morphological and chemical variants of *B. caapi* by traditional communities. Although the increasing use of Ayahuasca around the world, few studies have focused on the nomenclature of the vines used to produce the tea, leaving gaps that make it difficult to apply the epithets correctly. Thus, this study aimed to lectotypify names of Malpighiaceae related to Ayahuasca, as a way of correctly identifying the taxa that compose the tea. Were analyzed the protologues of the names of *Banisteria*, *Banisteriopsis*, *Diplopterys* e *Tetrapteryx* related to Ayahuasca, bibliographic reviews to check for inadvertent typifications and searches in virtual databases. The work followed the rules of the Shenzhen International Code of Nomenclature for Algae, Fungi and Plants. Seven lectotypifications of Malpighiaceae names related to Ayahuasca are proposed.

Keywords: *Banisteria*, *Banisteriopsis*, *Diplopterys*, *Tetrapteryx*, *Yagé*, *chagro-panga*, *Daime*, *Vegetal*.

Introduction

Malpighiaceae is an important family of predominantly tropical flowering plants comprising around 1,300 species in 77 genera. Most of the taxa are found in the New World, with only 17 genera and around 150 species exclusive to the Old World (Anderson 1979; Davis & Anderson 2010).

Malpighiaceae is monophyletic, but many of the larger genera, such as *Banisteriopsis* C.R. Rob., could not be rescued in their traditional circumscription. The subgeneras of *Banisteriopsis* sensu Gates (1982) were dispersed into three clades. The species of *Diplopteryx* were included in *B.* subg. *Pleiopteryx* (Nied.) B. Gates and the solution was to expand the genera to include taxa of the subgenera. Members of *B.* subg. *Hemiramma* (Griseb.) B. Gates constituted the new genera *Bronwenia* Anderson & Davis

and then, *Banisteriopsis* includes species in a restricted sense (Cameron *et al.* 2001; Davis *et al.* 2001; Davis & Anderson 2010; Almeida *et al.* 2023). Similarly, *Tetrapteryx* Cav. which, in order to become monophyletic, had 27 species transferred to *Glicophyllum* R.F. Almeida (Almeida & Van Den Berg 2021).

Ayahuasca is an entheogenic beverage, that is, it causes cognitive and perceptual changes when consumed orally. It is traditionally used by Amazonian peoples and has recently worldwide expansion. The best-known combination in the preparation of the beverage is the stems of the vine *Banisteriopsis caapi* (Spruce ex Griseb.) Morton (Malpighiaceae) and the leaves of *Psychotria viridis* Ruiz & Pav. (Rubiaceae) (Labate & Araújo 2002; Tupper 2009; Labate & Assis 2018).

The entheogenic effect of Ayahuasca is the result of a combination of β -carboline alkaloids, mainly harmine, harmaline and tetrahydroharmine (THH) from *B. caapi* that are monoamine-oxidase (MAO) inhibitors and then, make available N,N-dimethyltryptamine (DMT) from *P. viridis* (McKenna *et al.* 1984; Riba *et al.* 2012; Santos *et al.* 2020).

Ayahuasca is also a term that refers to the vine, which can be known as *Caapi*, *Yajé*, *Chagro-panga*, *Oco-yagé*, among others, depending on the region in which it is found and the communities that use it (McKenna & Riba 2015; Oliveira *et al.* 2023; Schultes 1957). However, although importance and rapid expansion of Ayahuasca use around the world, few studies have focused on its components taxonomically.

Those who manipulate Ayahuasca recognize "types" of vines, differentiated by the morphology of the stem, the effects of the drink and the characteristics of the color, taste and consistency of the resulting tea (Schultes 1957; Langdon 1974; Monteles 2020; Oliveira *et al.* 2023). These "types" referred to by traditional Ayahuasca vine knowers relate to different species (Schultes 1957; Gates 1982; Monteles 2020; Oliveira *et al.* 2023) or represent lineages with accepted morphological and chemical characteristics within the circumscription of *B. caapi*, which have been called ethnotaxa (Oliveira *et al.* 2023). But both the species and the ethnotaxa have few or no fertile vouchers in herbarium (Gates 1982; Oliveira *et al.* 2023).

Some of the Malpighiaceae species described on the basis of vines used in the preparation of Ayahuasca are, for example, *Diplopteryx longialata* (Nied.) W.R.Anderson & C.Davis (as *B. rusbyana* (Nied.) C.V.Morton por Schultes (Schultes 1957) documenting popular names *chagro-panga*, *oco-yagé* and *yajé*, in different regions of the Colombian Amazon. For the same species, Gates (1982) cited for Ecuador the use of common names such as *yaji* and *yajé*, and to Peru the name *yaco-ayahuasca*.

Tetrapteryx methystica R.E. Schult. and *T. mucronata* Cav (Schultes 1957; Gates 1982; Monteles 2020; Oliveira *et al.* 2023) were described by Schultes (Schultes 1957) for the Brazilian Amazon region based on samples of vines *caapi* and *caapi-piníma*, also used in the production of Ayahuasca.

Since the taxonomy of Malpighiaceae is based on reproductive characters, that is, in the morphology of inflorescences, flowers and fruits (Gates 1982; Davis *et al.* 2001; Anderson & Davis 2006; Davis & Anderson 2010), there is no certainty as to whether all the ethnotaxa supposedly related to *B. caapi*, belong to the circumscription of this species. Oliveira *et al.* (2023) listed 18 ethnotaxa and 30 names among religions that use Ayahuasca in urban areas of Brazil, but did not obtain fertile material from all these entities. The authors found a specimen of *D. cf. pubipetala* among vouchers of ethnotaxis of supposedly *B. caapi* according to a research participant. The identification of this sample as *D. cf. pubipetala* was based on the anatomy of the stem.

There are also gaps in the application of epithets to the components of Ayahuasca, due to the existence of several names whose nomenclatural type has not been indicated

or has been lost. It should be noted that *B. caapi*, the species most often cited as a component of Ayahuasca, has recently had its lectotype designated (Oliveira *et al.* 2021).

The typification of Malpighiaceae names becomes even more important considering that many names were described before the rules of the Code of Botanical Nomenclature which require the designation of only one duplicate as a type (McNeill *et al.* 2012). In addition, a considerable number of specimens were lost when part of the Berlin herbarium was destroyed during the Second World War (Oliveira *et al.* 2021).

The Shenzhen International Code of Nomenclature (Turland *et al.* 2018) indicates that the designation of the lectotype can be in the first step, indicating a specimen for names lacking a designated holotype and, in the second step, where although there is an indication of a collect, it is necessary to indicate one of the isotypes, when several are available (Anderson 2007; Prado *et al.* 2015). Reinforcing this indication, Prado & Moran (2022) also suggest that the terms "first and second step" be disseminated in the literature and that the next code include the terms in the glossary.

Gates (1982) lectotypified in the first step several names related to *Banisteriopsis* sense large. However, among the names of *Banisteriopsis*, *Diplopterys* and *Tetrapteryx* related to Ayahuasca, there are several epithets devoid of types. In this sense, this study aimed to lectotypify names of Malpighiaceae related to Ayahuasca, as a means of correctly identifying the components of the beverage.

Materials & Methods

Protologues and references citing the names were analyzed. Searches were also carried out in databases such as Tropicos (2023), Plants of the World Online (Powo 2023), JSTOR Global Plants (JSTOR 2023) and SpeciesLink (2023). As well as checking the virtual collections of the herbaria cited as deposits of types. The typification followed the Shenzhen Code (Turland *et al.* 2018).

Typifications

***Diplopterys pubipetala* (A.Juss.) W.R.Anderson & C.C.Davis.** Harvard Pap. Bot. 11: 13 (2006). ≡ *Banisteriopsis pubipetala* (A.Juss.) Cuatrec., Ciencia (Mexico) 23: 142. 1964. Fig. 42. ≡ *Banisteria pubipetala* A.Juss in A. St.- Hil., Fl. Bras. Mer. (four ed.). 3: 41. 1832 [1833].

First-step lectotype designated by Gates (1982): [Brazil], Goiás, Villa Boa, fl, *A. Saint Hilaire* C1-762 (P; Isolectotypes: P).

Second-step lectotype (designated here): *A. Saint Hilaire* C1-762 (P barcode P02428989 [digital image!]; Isolectotypes: P barcode P02428990 [digital image!] and P02428991 [digital image!]).

Notes: described in 1832 por Jussieu *Banisteria pubipetala* was based on three collects, with no indication of collector and collector number. The first was done in Villa Boa, Goiás, and the other two in Formiga and Chapada, Minas Gerais. In 1964, Cuatrecasas proposed the recombination of the species that came to be denominated *Banisteriopsis pubipetala*. Although the nomenclature has changed, no indication of the lectotype has been added.

150 years after the description of Jussieu, Gates (1982) indicated to *B. pubipetala* the types *Saint Hilaire* C1-762, Brazil, Goiás, Vila Boa, fl (lectotype, P; islectotypes, P), *Saint Hilaire* s.n., Brazil, Minas Gerais, Formigas, fl (syntypes, P), and *Saint Hilaire* B1-1617, Brazil, Minas Gerais, Chapada, fr (syntypes, F, fragment, P).

Anderson & Davis (2006) has recombined *B. pubipetala* to *D. pubipetala*, maintaining the typification of Gates (1982), without any indication of which of the P

syntypes they are referring to. In the P Herbarium database, there is a lectotype annotation on the specimen P02428990 and isolectotypes for two other specimens P02428989 and P02428991. Based on the illustration of the original publication and the description, the specimen indicated as lectotype is P02428989 (Fig. 1) and not the specimen P02428990 with annotation.

The indication is based on the obovate shape of the leaves with axillary inflorescences that most similarly represent the illustration (Fig. 1) and description, even though this specimen has no fruit. The other two specimens do not correspond to the illustration. Although P02328990 has obovate leaves, the inflorescences are without leaves and there is no fragment of the fruit. The specimen P02428991 has a samarid, but the wing is different from the protologue's illustration and there are two branches, one with elliptical leaves and the other oboval and indicating the same could cause confusion.



FIGURE 1. Lectotype of *Diplopterys pubipetala* (A.Juss.) W.R.Anderson & C.C.Davis (A. Staint Hilaire C1-762, P02428989) (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (France) Collection: Vascular plants (P). Image available: <http://coldb.mnhn.fr/catalognumber/mnhn/p/p02428990>).

= *Banisteria spruceana* Griseb., Fl. Bras.12(1): 45. 1858. ≡ *Banisteria pubipetala* f. *spruceana* (Griseb.) Nied., *Banisteria* 2: 20. 1901.

First-step Lectotype (designated here): [Brazil], Piauí, Urucuai, fl. Ago, 1839, *Gardner* 2499 (K barcode K001097617 [digital image]; Isolectotype: BM barcode BM000796228 [digital image]).

Notes: In 1858, Grisebach described *Banisteria spruceana*, without illustration and relating it to *B. pubipetala* (*Spruce* 240). Gates (1982) by listing the name as a synonym for *D. pubipetala*, indicated the types *Spruce s/n* (=Pl. *Spruce* 240) Brazil, Pará, Caripi, fl (lectotype, GOET; isolectotypes, C, G, GH, M, MG, NY e P). *Gardner* 2499, Brazil, Piauí, Urucuai, fl (syntypes, BM e GH) and *Martius s/n*, Brazil, Amazonas, Ega, fl (syntype, M).

Considering the protologue's description, it can be seen that before indicating the type Grisebach related *B. spruceana* to *B. pubipetala*, indicated by the term “affinis”. No agree with Gates (1982) that the type is the same as that of *B. pubipetala*, since at the end of the description the author indicates the type of *B. spruceana* with the place, collector and number, following the same pattern as the other species described in the publication. This way, indicated in first step the lectotype *Gardner* 2499 (K), Brazil, Piauí, Urucuai (Fig. 2).

The typification of Gates (1982) indicated *Gardner* 2499, Brazil, Piauí, Urucuai, fl as syntypes in BM and GH. The BM specimen shows a branch with mature leaves and fruit, just like the description given by the protologue. However, when consulting the curator of the GH herbarium, he reported that there was no specimen with these specifications, only samples from the *Spruce s/n* related to *B. pubipetala*.

The lectotype designated here is deposited in the K (K001097617 © RBG Kew, Fig. 2) has similar morphological characteristics to BM000796228 and the same pattern of annotation and spelling as the collect tags. In addition, this specimen has branches with leaves, flowers and fruit, which is in accordance with Grisebach's description in the protologue.



FIGURE 3. Lectotype of *Banisteria pearcei* Rusby (Bang 281, NY00055132) (The New York Botanical Garden. Image available: <https://sweetgum.nybg.org/science/vh/specimen-details/?irn=584687>).

***Diplopterys longialata* (Nied.) W.R.Anderson & C.Davis.** Harvard Pap. Bot. 11(1): 10. 2006. $\equiv$ *Banisteriopsis longialata* (Nied.) B.Gates. Fl. Neotrop. Monogr. 30: 195. 1982. $\equiv$ *Banisteria longialata* Nied.. *Banisteria* 2: 18. 1901.

First-step type by Gates (1982): [Peru], Huanuco, Pozuzo, fr, Ruiz & Pavon a. 1784 (holotype, B destroyed; isotype, F).

Second-step lectotype (designated here): Ruiz & Pavon a. 1784 (F barcode F0040380F [digital image!]).

Notes: When doing the new combination of *Banisteria longialata* for *Banisteriopsis longialata* Gates (1982) indicated the type Ruiz & Pavon a. 1784 (F) collected at Huanuco, Peru. Anderson & Davis (2006) by designating a new combination of the species for *Diplopterys longialata* only cited the type indicated by Gates (1982). In addition to indicating the type, Gates (1982) also cited herbarium B (destroyed) and herbarium F as possible places of deposit for the holotype and isotype, respectively.

The specimens from B are not available due to the destruction of part of the herbarium in the Second World War (Oliveira *et al.* 2021). A photograph of the specimen is available in F Ruiz & Pavon a. 1784 made by J.F. MacBride in B indicated as holotype by Gates (1982) and a specimen Ruiz & Pavon #33/82 which has similar morphology and the identification determined by Niedenzu, the author who described the species (Fig. 4).

Considering that a photograph cannot be a type (Turland *et al.* 2018), and that the specimen Ruiz & Pavon #33/82 shows characteristics that make it possible to typify it, the specimen F0040380F is indicated as lectotype (Fig. 4).



FIGURE 4. Lectotype of *Diplopterys longialata* (Nied.) W.R. Anderson & C. Davis (Ruiz & Pavon a. 1784, F0040380F) (© The Field Museum, Botanical Collections. Image available: <https://fm-digital-assets.fieldmuseum.org/39/363/V0040380F.jpg>).

= *Banisteriopsis rusbyana* (Nied.) C.V. Morton. J. Washington Acad. Sci. 21: 486. 1931. ≡ *Banisteria rusbyana* Nied. Banisteria 2: 19. 1901.

First-step type by Gates (1982): [Bolivia], Beni River, Jul-1886, fl, *H. H. Rusby* 2171 (Holotype, B destroyed, NY fragment; isotypes, F, GH, MICH, MO, NY, US).

Second-step lectotype (designated here): *H. H. Rusby* 2171 (NY barcode NY00055142 [digital image]; Isolectotype: NY barcode NY00055140 [digital image], NY barcode NY00055141 [digital image]; NY barcode NY00055143 [digital image]).

Notes: Morton (1931) when making the new combination of *Banisteria rusbyana* for *Banisteriopsis rusbyana* indicated as type *H. H. Rusby* 2171 collected in July 1886 on the Beni River, Bolivia. Gates (1982) indicated the holotype in B (destroyed) with fragments in NY. As indicated by Gates (1982), the specimen in B no longer exists and four fragments were found in NY. A lectotype is indicated NY00055142 (Fig. 5), as it

has the best preserved vegetative and reproductive material, and as isoelectotypes NY00055140, NY00055141 e NY00055143.

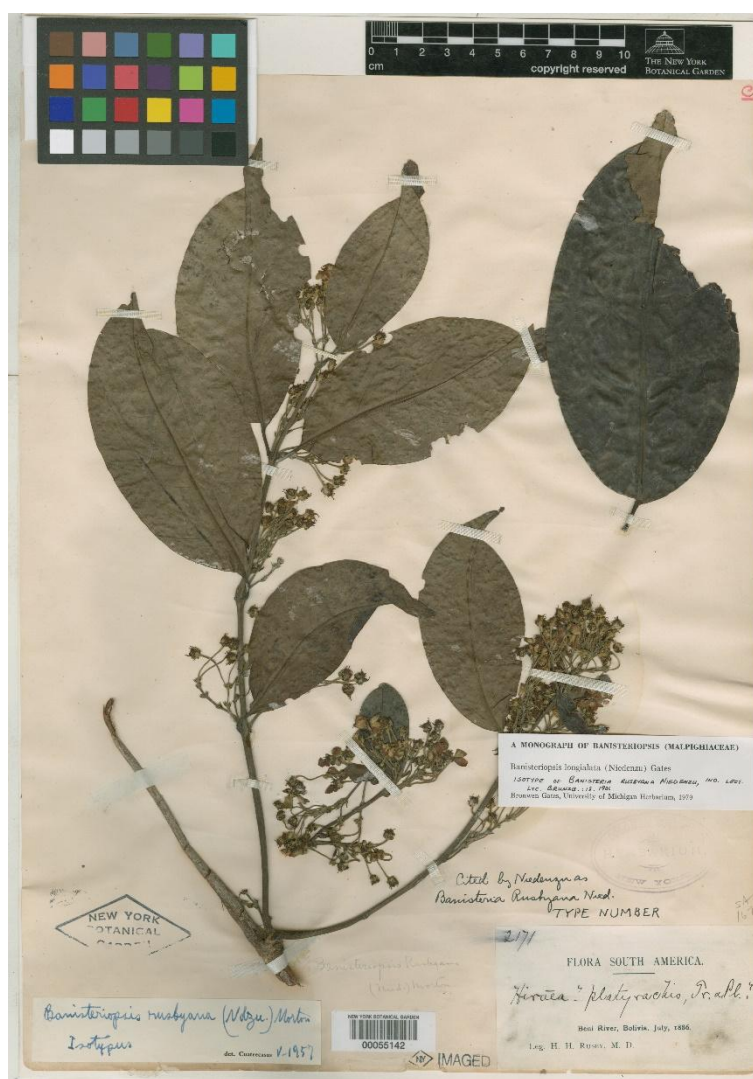


FIGURE 5. Lectotype of *Banisteriopsis rusbyana* (Nied.) C.V.Morton (H. H. Rusby 2171, NY00055142) ((The New York Botanical Garden. Image available: <https://sweetgum.nybg.org/science/vh/specimen-details/?irn=551961>).

Tetrapteryx methystica R.E.Schult.. Bot. Mus. Leaf. 16: 202 (1954).

First-step lectotype by Schultes (1954): [Brazil], Amazonas, Upper Rio Negro Basin, Ira-Igarapé, affluent of rio Tikié, Porto Makús. **Jun, 1948. Richard Evans Schultes & Francisco López 10184 (GH).**

Second-step lectotype (designated here): Richard Evans Schultes & Francisco López 10184. (GH barcode GH00045173 [digital image]; Isolectotype: GH barcode GH00045172 [digital image].

Notes: Schultes (1954) indicated as holotype **Richard Evans Schultes & Francisco López 10184 (GH). Two corresponding specimens were found for this description, GH00045172 and GH00045173.** Both specimens show only vegetative material and GH00045173 also includes collages of illustrations that are part of the work of Schultes (1979). Thus, considering the additional information contained in the

specimen GH00045173 (Fig. 6) this is indicated as the lectotype. Emphasizing that the illustrations describe reproductive characteristics and help to identify the specimen.

It is also important to note that, although the specimen was collected in the state of Amazonas, the species has not been included in the Flora e Funga do Brasil repository (Almeida 2020; Francener *et al.* 2015). In the database Jstor (2023) this name appears as a synonym of *Tetrapteryx styloptera* Adr. Jussieu determined by Anderson in 1979, moreover, this synonymization being spelled out in the type specimens. As well as, in the database Powo (2023) shows as accepted name *Glicophyllum stylopteron* (A. Juss.) R.F. Almeida. However, Anderson's publication for the period indicated do not features the synonymization and the recombination was not formally done by Almeida & Van Den Berg (2021), perhaps due to the lack of data on the taxa.



FIGURE 6. Lectotype of *Tetrapteryx methystica* R.E.Schult. (Richard Evans Schultes & Francisco López 10184, GH00045173) (Harvard University Herbaria & Libraries, Botanical Specimens. Image available: https://kiki.huh.harvard.edu/databases/specimen_search.php?mode=details&id=36389).

Tetrapteryx mucronata Cav. Monadelphiae Classis Dissertationes Decem 9: 434, tab. 262: 2. 1790.

Type by Cavanilles (1790): [French Guiana], *D. Stoupy s/n.*

First-step lectotype (designated here): [French Guiana], Cayenne, 1788. *D. Stoupy s/n.* (P barcode P00680334 [digital image]).

Notes: The species' protologue only indicates the collector. The databases Tropicos (2023) and JSTOR (2023) provide additional information relating to the place of collecting, year and herbarium, and there is no publication that confirms this information. It was confirmed that there is only one specimen in P for this collector, which we indicated as the lectotype in the first step P00680334 (Fig. 7).

It should also be noted that the database Tropicos (2023) and herbarium P indicate that the accepted name for the species is *Triopteryx mucronata* (Cav.) Raeusch. However, Almeida (2020) and Almeida & Van den Berg (2021) show that *Triopteryx mucronata* is an illegitimate name and a synonym of *Tetrapteryx mucronata*.



FIGURE 7. Lectotype of *Tetrapteryx mucronata* Cav. (*D. Stoupy s/n.*, P00680334) (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (France) Collection: Vascular plants (P). Image available: <http://coldb.mnhn.fr/catalognumber/mnhn/p/p00680334>).

References

Almeida, R.F. (2020) *Tetrapteryx* in Flora e Funga do Brasil. Available from:

<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB8967> (November 4, 2023)

- Almeida, R.F., Morais, I.L., Pellegrini, M.O.O. & Van Den Berg, C. (2023) Molecular phylogeny and character-mapping support the synonymy of *Cordobia* and *Gallardoa* in *Mionandra* (Malpighiaceae). *Plant Ecology and Evolution* 156: 352–364. <https://doi.org/10.5091/plecevo.101657>
- Almeida, R.F. & Van Den Berg, C. (2021) Molecular phylogeny and character mapping support generic adjustments in the Tetrapteroid clade (Malpighiaceae). *Nordic Journal of Botany* 39: njb.02876. <https://doi.org/10.1111/njb.02876>
- Anderson, W.R. (1979) Floral Conservatism in Neotropical Malpighiaceae. *Biotropica* 11: 219. <https://doi.org/10.2307/2388042>
- Anderson, W.R. (2007) Lectotypification of names of Malpighiaceae—I.
- Anderson, W.R. & Davis, C.C. (2006) Expansion of *Diplopterys* at the expense of *Banisteriopsis* (Malpighiaceae). *Harvard Papers in Botany* 11: 1–16. [https://doi.org/10.3100/1043-4534\(2006\)95\[1:EODATE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)95[1:EODATE]2.0.CO;2)
- Cameron, K.M., Chase, M.W., Anderson, W.R. & Hills, H.G. (2001) Molecular systematics of Malpighiaceae: evidence from plastid *rbcL* and *matK* sequences. *American Journal of Botany* 88: 1847–1862.
- Cavanilles, A.J. (1790). *Monadelphiae classis Dissertationes decem. Diss. no. 9*. Madrid.
- Cuatrecasas, J. (1964). Miscelánea sobre Flora Neotrópica, I. *Ciencia* (Mexico) 23: 137–151.
- Davis, C.C. & Anderson, W.R. (2010) A complete generic phylogeny of Malpighiaceae inferred from nucleotide sequence data and morphology. *American Journal of Botany* 97: 2031–2048. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000146>
- Davis, C.C., Anderson, W.R. & Donoghue, M.J. (2001) Phylogeny of Malpighiaceae: evidence from chloroplast *ndhF* and *trnL-F* nucleotide sequences. *American Journal of Botany* 88: 1830–1846. <https://doi.org/10.2307/3558360>

- Francener, A., Damasceno-Júnior, G.A. & Gomes-Klein, V.L. (2015) *Tetrapteryx* Cav. (Malpighiaceae) from Brazilian Midwest. *Acta Botanica Brasilica* 29: 143–156.
<https://doi.org/10.1590/0102-33062014abb3665>
- Gates, B. (1982) *Banisteriopsis, Diplopteryx* (Malpighiaceae). The New York Botanical Garden, Bronx, N.Y. 237 pp.
- Grisebach, A.H.R. (1858) Malpighiaceae. In: Martius, C.F.P. von, Eichler, A.G. & Urban, I. (Eds.) *Flora Brasiliensis, enumeratio plantarum in Brasilia hactenus detectarum : quas suis aliorumque botanicorum studiis descriptas et methodo naturali digestas partim icone illustratas*. Fleischer, Leipzig, pp. 43–54.
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.454>
- JSTOR (2023) JSTOR. Available from: <https://www.jstor.org/> (November 4, 2023)
- Jussieu, A.H.L. (1832) [“1833”] Malpighiaceae. In: Saint-Hilaire, A., Jussieu, A.H.L. & Cambessedes, A. (Eds.) *Flora brasiliae meridionalis*. Apud A. Belin, Paris, pp. 5–86.
- Labate, B.C. & Araújo, W.S. (2002) *O uso Ritual da Ayahuasca*. Mercado das letras - FAPESP, Campinas - SP. 686 pp.
- Labate, B.C. & Assis, G.L.D. (2018) A critical review of the literature on the diaspora of Brazilian ayahuasca religions. *The Expanding World Ayahuasca Diaspora*. Routledge, London, p. 244.
- Langdon, E.J.M. (1974) *The Sioma Medical System: Beliefs and Behavior*. Tese. Tulane University
- McKenna, D. & Riba, J. (2015) New World Tryptamine Hallucinogens and the Neuroscience of Ayahuasca. *Current Topics in Behavioral Neurosciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–27.

- McKenna, D.J., Towers, G.H. & Abbott, F. (1984) Monoamine oxidase inhibitors in South American hallucinogenic plants: tryptamine and beta-carboline constituents of ayahuasca. *Journal of Ethnopharmacology* 10: 195–223. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(84\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0378-8741(84)90003-5)
- McNeill, J., Barrie, F.R., Buck, W.R., Demoulin, V., Greuter, W., Hawksworth, D.L., Herendeen, P.S., Knapp, S., Marhold, K., Prado, J., Prud'homme van Reine, W.F., Smith, G.F., Wiersema, J.H. & Turland, N.J. (2012) *International code of nomenclature for algae, fungi and plants (Melbourne code): adopted by the Eighteenth International Botanical Congress, Melbourne, Australia, July 2011*. Koeltz Scientific Books, Königstein. 208 pp.
- Monteles, R. (2020) “Eu venho da floresta”: a sustentabilidade das plantas sagradas Amazônicas do Santo Daime. Tese. Universidade Federal do Amazonas
- Morton, C.V. (1931). Notes on yagé, a drug plant of southeastern Colombia. *J. Wash. Acad. Sci.* 21: 485–488. www.jstor.org/stable/24525782
- Oliveira, R.C., Behrens, C.S.B., Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C.W., Silva, M.S., Martins-Silva, T. & Sonsin-Oliveira, J. (2023) Ethnobotany and Wood Anatomy of *Banisteriopsis caapi* Ethnotaxa and *Diplopterys* cf. *pubipetala*, Components of Ayahuasca in Brazilian Rituals. *Economic Botany* 77: 18–47. <https://doi.org/10.1007/s12231-023-09567-w>
- Oliveira, R.C., Sonsin-Oliveira, J., Santos, T.A.C., Simas e Silva, M., Fagg, C.W. & Sebastiani, R. (2021) Lectotypification of *Banisteriopsis caapi* and *B. quitensis* (Malpighiaceae), names associated with an important ingredient of Ayahuasca. *TAXON* 70: 185–188. <https://doi.org/10.1002/tax.12407>
- Powo (2023) Powo - Plants of the World Online. *Plants of the World Online*. Available from: <https://powo.science.kew.org/> (October 6, 2023)

- Prado, J., Hirai, R.Y. & Moran, R.C. (2015) Proposals concerning inadvertent lectotypifications (and neotypifications). *TAXON* 64: 651–651. <https://doi.org/10.12705/643.29>
- Prado, J. & Moran, R.C. (2022) Proposal to add “first-step typification” and “second-step typification” to the Glossary. *TAXON* 71: 713–713. <https://doi.org/10.1002/tax.12739>
- Riba, J., McIlhenny, E.H., Valle, M., Bouso, J.C. & Barker, S.A. (2012) Metabolism and disposition of N,N-dimethyltryptamine and harmala alkaloids after oral administration of ayahuasca. *Drug Testing and Analysis* 4: 610–616. <https://doi.org/10.1002/dta.1344>
- Rusby, H.H. (1907). An enumeration of the plants collected in Bolivia by Miguel Bang. Part 4. With descriptions of new genera and species. *Bull. New York Bot. Gard.* 4: 309–470.
- Santos, B.W.L., Oliveira, R.C. de, Sonsin-Oliveira, J., Fagg, C.W., Barbosa, J.B.F. & Caldas, E.D. (2020) Biodiversity of β -Carboline Profile of *Banisteriopsis caapi* and Ayahuasca, a Plant and a Brew with Neuropharmacological Potential. *Plants* 9: 870. <https://doi.org/10.3390/plants9070870>
- Schultes, R.E. (1954) A NEW NARCOTIC SNUFF FROM THE NORTHWEST AMAZON. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University* 16: 241–260.
- Schultes, R.E. (1957) The Identity of the Malpighiaceae Narcotics of South America. *Botanical Museum leaflets, Harvard University* 18: 1–56. <https://doi.org/10.5962/p.168508>
- Schultes, R.E. (1979) Indícios da riqueza etnofarmacológica do noroeste da Amazônia. *Acta Amazonica* 9: 209–215. <https://doi.org/10.1590/1809-43921979091209>

Species Link (2023) Species Link. Available from: <https://specieslink.net/search/>
(November 4, 2023)

Tropicos (2023) Tropicos. Available from:
<https://www.tropicos.org/name/Search?name=diplopterys> (October 6, 2023)

Tupper, K.W. (2009) Ayahuasca healing beyond the Amazon: the globalization of a traditional indigenous entheogenic practice. *Global Networks* 9: 117–136.
<https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2009.00245.x>

Turland, N., Wiersema, J., Barrie, F., Greuter, W., Hawksworth, D., Herendeen, P., Knapp, S., Kusber, W.-H., Li, D.-Z., Marhold, K., May, T., McNeill, J., Monro, A., Prado, J., Price, M. & Smith, G. eds. (2018) *International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017*. Koeltz Botanical Books

6. CAPÍTULO II

Artigo aceito na revista Revista IScience, ISSN versão online: 2589-0042

Machine learning applied to herbarium leaf samples recovers folk classification of *Banisteriopsis caapi*, the main ayahuasca component

Scheila Cristina Biazatti^{1,2*}, Deborah Bambil^{1,3}, Rômulo Môra⁴, Lúcio Flávio de Alencar Figueiredo¹, Regina Célia de Oliveira¹

¹Department of Botany, Biology Institute, University of Brasília (UnB), 70910-900, Brasília, DF, Brazil.

²Department of Forest Engineering, Federal University of Rondônia (UNIR), 76940-000, Rolim de Moura, RO, Brazil

³Embrapa Genetic Resources and Biotechnology/National Institute of Science and Technology in Synthetic Biology, 70770-917, Brasília, DF, Brazil.

⁴Faculty of Forest Engineering, Federal University of Mato Grosso (UFMT), 78068-600, Cuiabá, MT, Brazil

*Corresponding author, scheila.biazatti@unir.br

Abstract

Ayahuasca refers to an entheogenic brew and its main vine, *Banisteriopsis caapi*, whose high morphological diversity underlies traditional folk classifications. This study evaluated whether machine learning algorithms can recover folk classifications using images of dried leaves. We analyzed 47 vine plants, mainly *B. caapi* folk types and *Diplopterys cabrerana* as an outgroup, using adaxial and abaxial leaf image features related to color, shape, and texture. All evaluated algorithms showed statistically similar performance; however, Support Vector Machine (SVM) achieved the highest accuracy, reaching 70% overall and over 90% for the folk types *Hybrid* and *Arara*, and the related outgroup species *D. cabrerana*. Lower accuracy in *Cabi* and *Quebrador* reflects morphological overlap. Confusion matrix and similarity network analyses showed only partial agreement with previous ethnobotanical classifications. Focusing on subtle variation within a single species, this study demonstrates that integrating traditional knowledge with machine learning enables automated validation of folk taxonomies.

Keywords: Automated plant identification, Folk taxonomy, Ethnobotany, Herbarium specimens, Traditional knowledge.

Introduction

Ayahuasca is a term that refers both to a ritualistic brew and to the vine *Banisteriopsis caapi* Spruce (ex Griseb.) C.V. Morton (Malpighiaceae) and some others Malpighiaceae species, component of this traditional Amazonian beverage (Naranjo, 1995; Labate and Araújo, 2002; Labate and Assis, 2018; Oliveira et al., 2023). The most widespread composition of the ayahuasca brew results from the decoction of stems (and/or roots) of *B. caapi*, which contains the β -carbolines harmine, harmaline, and tetrahydroharmine, joined with the leaves of *Psychotria viridis* Ruiz & Pav. (Rubiaceae), which contains N,N-dimethyltryptamine (DMT), the compound responsible for the brew's perceptual and visionary effects (Callaway et al., 2005, 1999). In order for DMT to produce effects when taken orally, monoamine oxidase (MAO) must be inhibited, an action provided by the β -carbolines present in the vine (Callaway et al., 1999).

The historical record of ayahuasca use extends throughout the northwestern Amazon, encompassing 33 ethnic groups across Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru, as well as the Orinoco region in Venezuela and the Pacific coast of Colombia and Panama (Schultes, 1986; Ott, 1996; Miller et al., 2019). Today, ayahuasca use has spread significantly, reaching diverse cultural and geographic contexts in several countries across Europe, Asia, Oceania, and the Americas (Tupper, 2009, 2008). In Brazil, its use initially expanded through syncretic Christian religions, mainly Santo Daime, Barquinha and União do Vegetal, which later influenced other urban practices of religious, therapeutic, and recreational nature, also reaching non-Amazonian Indigenous groups (Rose and Langdon, 2010). The growing use of ayahuasca has led Peruvian shamans to denounce the intense “spiritual extractivism” of the plants used in the brew (Minuano, 2022).

The recognition of different types of *B. caapi* by traditional peoples has been documented by several authors (Langdon, 1986; Schultes, 1986; Oliveira et al., 2023). Brazil's syncretic religious groups recognize many folk *B. caapi* types (Oliveira et al., 2023). This folk classification is based primarily on stem morphology, such as the presence or absence of swollen nodes, the formation or absence of braids, the ease or difficulty and resulting shape of stem fiber pounding, and the color of the inner bark.

However, the characteristics of the brews, such as taste, density, coloration, and cognitive effects, are predominant criteria (Oliveira et al., 2023).

Initially, only two folk types (*Caupuri* and *Tucunaca*) of *B. caapi* by the Brazilian religious groups ayahuasca were registered (Callaway et al., 1999). However, a larger number of other folk types (*Caupuri*, *Tucunaca*, *Arara*, *Pajezinho*, *Ourinho*, among others) were later included based on broader sampling (Santos et al., 2020; Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023).

This taxonomic difficulty is further compounded by the fact that ayahuasca is not prepared from a single botanical species, but rather from a complex of closely related taxa within Malpighiaceae (Schultes, 1954; Gates, 1982; Schultes, 1986; Oliveira et al., 2023). In addition to *B. caapi*, some species of *Banisteriopsis*, *Diplopterys*, and *Tetrapteryx* have been reported as components of the brew, whose delimitation has long been controversial and historically unstable. The recognition of these taxa often relies on stem and floral characters, which are rarely preserved in vine and woody herbarium material, blurring the boundaries between folk categories, botanical species, and chemically distinct lineages (Santos et al., 2020; Oliveira et al., 2023).

Record of these folk types in herbaria are limited, and many available vouchers are sterile specimens, i.e., composed only of branches and leaves, hinders proper botanical identification, since the taxonomy of *Banisteriopsis* has traditionally been based on the morphology of flowers and fruits (Anderson, 1979; Gates, 1982; Francener and Almeida, 2020). Herbarium specimens of woody plants conventionally lack the main stem, making it impossible to consider folk classification (Oliveira et al., 2023). Eight lineages (or lines) of *B. caapi* were identified using DNA barcoding (Luz et al., 2023), but no morphological traits were found to distinguish them as taxonomic entities, and the collectors did not prepare herbarium vouchers for morphological studies.

In botany, species have traditionally been based on morphological characteristics, which align with the classical Linnaean approach. Even among animals, such as bees, species are described as the basic unit used to understand evolutionary biology and biodiversity, playing a key role in conservation and the formulation of public policies (Qiu et al., 2023). However, widely used concepts of species, such as morphological, biological, and phylogenetic, face limitations when applied broadly due to hybridization zones, gene flow, and continuous morphological variation (Christenhusz, 2020). Thus, in botany, species are often understood as groups of individuals with relative morphological and genetic stability, capable of maintaining their identity even in contexts of ecological

contact and potential gene flow with related taxa (Stace, 1989; Stevens, 2001; Christenhusz, 2020).

In this context, species identification, generally performed by taxonomic specialists, can be a time-consuming and error-prone process, especially in groups with high diversity and overlapping morphological characters. To make this process more agile and accurate, automated identification techniques have been successfully tested, particularly through leaf image analysis. However, studies conducted so far have focused mainly on genetically distant taxa, belonging to different genera and families, achieving classification accuracy rates above 90% (Bambil et al., 2020; Bao and Bambil, 2021; Siddharth et al., 2022; Hajam et al., 2023; Kiflie et al., 2024).

In recent years, machine learning and artificial intelligence have been increasingly applied to plant systematics and automated species identification, particularly leaf images and morphometric descriptors. Leaves are the most readily available organs throughout a plant's life. Studies on diverse plant groups have demonstrated the potential of these approaches to detect subtle morphological patterns and improve classification accuracy (Wäldchen and Mäder, 2018a; Bambil et al., 2020; Siddharth et al., 2022).

A little before machine learning stabilized for plant classification, infrared spectroscopy (IR) had already achieved excellent results in plant classification (Durgante et al. 2013; Lang et al. 2015, 2017), serving as a complementary tool for plant taxonomists. But for that, an IR instrument is necessary in an air-conditioned room. Portable IR is more flexible, less expensive and yields results close to those of bench IR equipment for classification analysis (Diniz et al. 2019); however, bench IR delivers yet better quantitative prediction performances (Kirchler et al. 2017, Diniz et al 2019) and is more cumbersome for spectra acquisition on exsiccates than portable IR. Using machine learning, data such as photographic images from ordinary cell phones were used to achieve excellent classification (Bambil et al. 2020). For this purpose, it yields the same results with a lower budget and faster turnaround. With IR, it is possible to predict the organic composition using high-quality calibrations (Alencar et al. 2006, Hodge et al. 2018), whereas this is not possible with machine learning using pictures. Still, images associated with data attributes are increasingly used in machine learning (Medeiros et al. 2020).

Lately, optoelectronic measurements coupled with machine learning, including optical imaging and spectroscopy, have emerged as powerful tools for high-precision discrimination of complex biological and chemical samples (Han et al., 2025; Meng et

al., 2025). These advances highlight the relevance of computational methods as complementary tools to traditional taxonomy, especially in complex and morphologically overlapping groups.

The high classification capability using algorithms, such as Deep Learning, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM), to capture complex patterns associated with plant morphological features achieve near perfection (Bao and Bambil, 2021). In addition, they emphasize the usefulness of computer vision in contexts where manual identification is limited by the lack of specialists or by the subjectivity of traditional processes.

Moreover, this pioneering study focuses on genetically closely related organisms, a context that represents a greater methodological challenge compared to previous studies involving distantly related species. The task involves subtle morphological variation within a single species, which tests the limits of current machine learning approaches and provides new perspectives for the identification and conservation of *B. caapi*.

During the data collection that led to the study by Oliveira et al. (2023), a collection of approximately 200 herbarium vouchers containing specimens of *B. caapi* identified by their respective folk names was assembled. These vouchers are part of the present study and represent an important foundation for analyzing the folk classification of the species through leaf morphology. In addition, there is an ongoing effort to expand this collection through new samplings and identifications, aiming to capture the greatest possible diversity of these taxa, which hold significant cultural and botanical relevance.

In addition to its ethnobotanical relevance, this study also engages a central technical challenge in machine learning for plant identification: how do different classification algorithms perform when applied to a complex taxonomic context involving genetically close folk types? Machine learning models use distinct mathematical strategies to identify patterns in data, and their performance may vary substantially according to the nature of the task. Therefore, it is essential to understand whether certain algorithms perform better than others in the classification of *B. caapi* folk types based on leaf morphology, and whether combining adaxial and abaxial leaf surfaces improves classification accuracy.

In this context, the central research question of this study is whether leaf morphology alone contains sufficient information to recover and discriminate the folk classification of *B. caapi* using machine learning approaches. Based on this framework, we tested the following hypotheses: (i) herborized leaves morphometric traits contain detectable features of folk classification in *B. caapi*; (ii) machine learning classifiers are

able to recover part of the traditional categorization based solely on leaf images; and (iii) the recovered patterns reflect continuous intra-specific variation, rather than discrete taxonomic entities.

Thus, this study aimed to evaluate whether machine learning could recover the folk classification based on the morphological characteristics of *B. caapi* folk-type leaves. Leaf image-based recognition may significantly impact the taxonomy of the species, offering a complementary tool to traditional taxonomic approaches, contributing to a better understanding of its morphological and genetic diversity, and supporting conservation strategies. Furthermore, this research highlights how the integration of ethnobotanical knowledge and modern computational tools can advance the automated identification of culturally significant plants.

Material and Methods

Dried and herborized leaves ($n_L=384$) from 47 vine plants (Malpighiaceae) in the herbarium UB at the University of Brasília were photographed (iPhone 12 mini) on integral or partially abaxial and adaxial surfaces (Supplementary Material 1). Over 95% of these vine plants ($n_P=45$, $n_L=384$) were folk types of *B. caapi*: *Arara* ($n_P=1$, $n_L=17$), *Cabi* ($n_P=4$, $n_L=30$), *Caupuri* ($n_P=11$, $n_L=88$), *Caupuri-de-nós-longos* (Spruce - $n_P=1$, $n_L=31$), *Ourinho* ($n_P=9$, $n_L=63$), *Pajezinho* ($n_P=2$, $n_L=25$), *Quebrador* ($n_P=3$, $n_L=16$), *Tucunaca* ($n_P=11$, $n_L=80$), and a supposed *Hybrid* ($n_P=3$, $n_L=18$). The last two vines, from *Diplopterys cabrerana* (Cuatrec.) B.Gates, were used as an external group ($n_P=2$, $n_L=16$), because it is phylogenetically close to *B. caapi* (Gates, 1982; Anderson and Davis, 2006; Davis and Anderson, 2010) and is also used in the preparation of ayahuasca as a substitute for *P. viridis* (Malcolm and Lee, 2018; Oliveira et al., 2023).

The folk types analyzed in this study were selected because they correspond to the set of ethnotaxa consistently represented in the UB herbarium collection assembled by Oliveira et al. (2023), for which sufficient, well-preserved leaf material was available for morphometric analyses. Thus, the selection reflects the diversity of folk categories effectively documented and herborized, rather than a priori choice of taxa.

All these leaf donor plants were collected in seven states in Brazil (AC, DF, GO, MG, PA, RJ, and TO). The older exsiccates date from 2017, and the others range from 2019 to 2022. Most of these vine plants ($n=43$) were cultivated, and four were native (Supplementary Material 1).

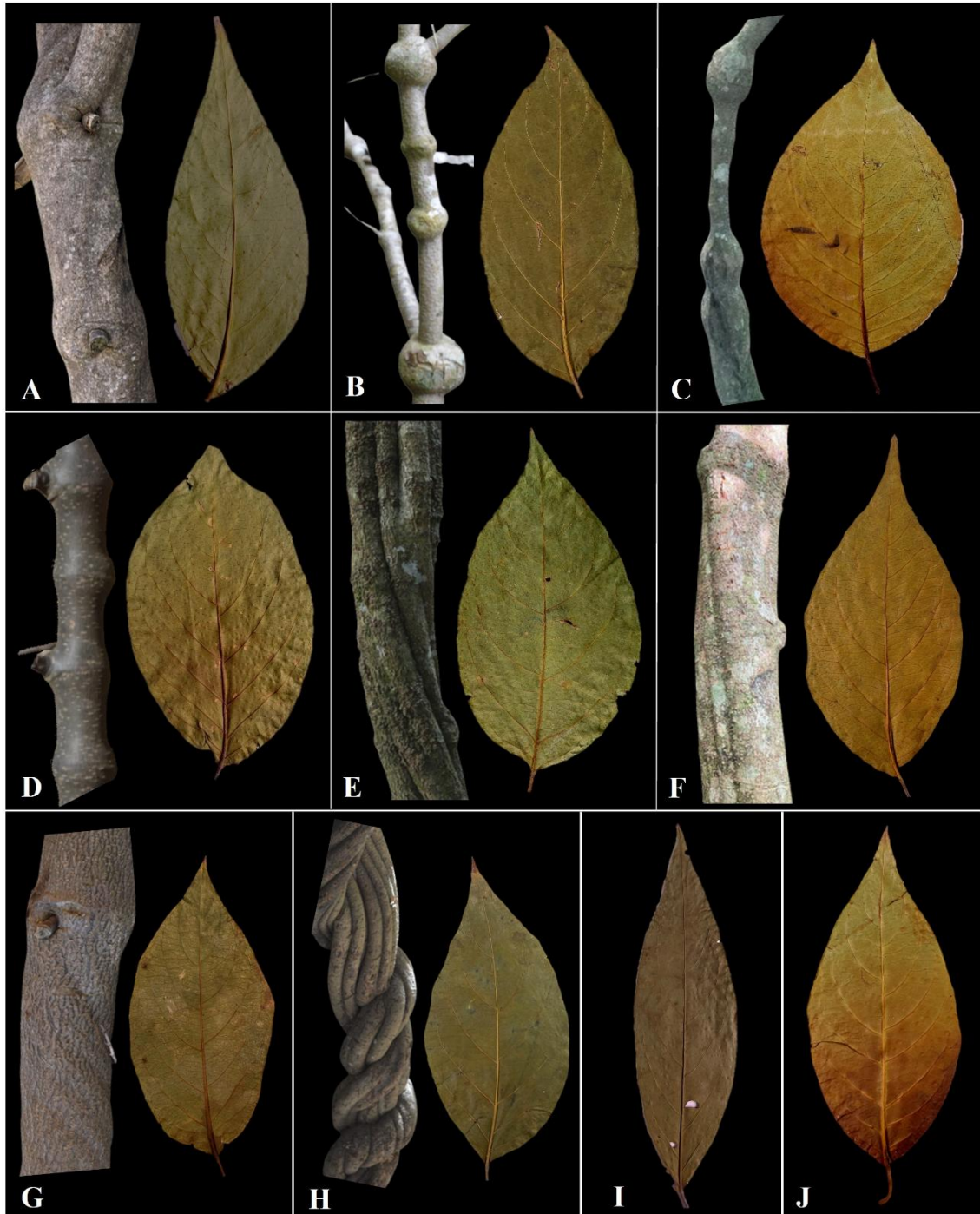


Fig. 1. Morphological diversity in stems and leaves among folk types of *B. caapi*, with leaf comparison to *D. cabrerana*. A - G) Stem and leaf diversity. A. Arara. B) Caupuri. C) Caupuri-de-nós-longos (Spruce). D) Hybrid. E) Ourinho. F) Pajezinho. G) Quebrador. H) Tucunaca. I - J) Leaves. I) *D. cabrerana*. J) Cabi.

The folk types were classified into two clusters based on whether the stem had inflated nodes. *Caupuri* (*Caupuri-de-nós-longos*, Cabi) with stems with inflated nodes and teas with greater physical effect, and the second cluster represented by *Tucunaca* with

stems without inflated nodes with weaker teas (Oliveira et al., 2023). The same clusters happened on stem anatomy of those folks (Oliveira et al., 2023).

Initially, the dataset comprised more than 3000 images of adaxial and abaxial leaf surfaces representing nine folk types of *B. caapi* and one related taxon used as an outgroup. Preliminary analyses of the full dataset yielded low classification accuracy (~50%), prompting quality-based filtering of the images. In the first filtering step, images exhibiting severe mechanical damage, extensive loss of leaf tissue, folds, or poor image quality were removed, leaving 1646 images representing the ten taxa. Although this initial filtering improved model performance, accuracy remained suboptimal (~60%). Therefore, a second and more stringent filtering step was applied, in which only intact leaves were retained, allowing at most minor apical loss of the leaf blade. This second filtering reduced the dataset to 768 images, with most taxa losing approximately 50% of their images (up to 74% in *Cabi* and 73% in *Quebrador*, and as little as 15% in *Arara* and *D. cabrerana*). Despite this substantial reduction in sample size, all taxa and all classification algorithms showed consistent improvements in model fit and classification accuracy in the final dataset.

The leaves were photographed on both surfaces (adaxial and abaxial), and the leaf sample numbers ranged from 16 to 88 leaves for each taxon. Subsequently, color, shape, and texture features were extracted using the Inovtaxon tool (Bambil et al., 2020). The extracted features include primary colors (RGB): red, green, and blue and HSV (hue, saturation, value), representing perceptible color, saturation intensity, and brightness.

The CIELab color model, developed by the International Commission on Illumination (CIE), uniformly represents colors for human perception (Soleimanizadeh et al., 2015). L* (Lightness) indicates luminosity (0-100), a* represents the green-red axis, and b* represents the blue-yellow axis. Hu moments comprise seven invariant moments for shape analysis and pattern recognition, invariant to transformations like translation, scaling, and rotation (Lukic et al., 2017).

The co-occurrence matrix analyzes image texture by evaluating pixel pair frequencies at specific distances and angles, seeking correlations in surface properties like roughness, smoothness, granularity, luminosity, homogeneity, contrast, and dissimilarity (Kan et al., 2017). Histogram of Oriented Gradients (HOG) extracts image features based on gradient intensity distribution, identifying objects by tracing tonal changes via vectors distributed across image points (Olsen et al., 2015). Local Binary Pattern (LBP) describes

textures by comparing pixel intensity values with neighboring pixels (Patil and Kumar, 2017).

Furthermore, novel feature extractors were explored: Gabor Filter, based on harmonic functions modulated by a Gaussian distribution, enabling detection of local frequency and orientation variations (Hammouche et al., 2022). Canny Edge Detection identifies edges using Gaussian filtering for noise reduction, gradient intensity calculation, non-maximum suppression, and dual thresholding for strong and weak edge identification (Cao et al., 2020).

The Fourier Transform is a fundamental mathematical tool for signal analysis and image processing, decomposing time/space-domain signals into frequency components. This technique converts the original function into a spectral representation, facilitating periodic pattern identification and dominant frequency analysis. Fourier transforms enable frequency-domain filtering, compression, and restoration in image processing. The process involves calculating frequency component amplitudes and phases via integral/discrete transforms, followed by inverse Fourier Transform reconstruction. Its efficiency in capturing global and local frequency information makes it essential in scientific applications, such as texture analysis, noise removal, and spectral studies (Mattera et al., 2024).

The Scharr Filter is an enhanced edge detection technique providing accurate digital image gradient estimation. Derived from the Sobel operator, Scharr utilizes optimized for horizontal and vertical gradient calculation masks, offering sensitivity to subtle intensity changes, particularly in smooth or fine-textured regions. Its mathematical construction reduces quantization-introduced error amplification, ensuring calculated gradient fidelity. This filter excels in applications requiring precise edge detection or detailed structural analysis, such as pattern recognition, object segmentation, and texture analysis (Rangkuti et al., 2024).

The Laplacian Filter, widely used in image processing, employs second-order derivatives for edge enhancement and detection. It calculates intensity variation rates in image regions, highlighting abrupt transitions between adjacent pixels. The application involves discrete masks for estimating the intensity of Laplacian function, often preceded by noise-reducing smoothing. This method excels in identifying isotropic edges and operating direction independently, with applications in analyses requiring precise structural feature detection (Dang et al., 2024).

The Sobel Filter is a classic edge detection technique based on first-order derivatives. It uses convolutional masks to calculate horizontal and vertical intensity gradients, identifying significant local variations. This approach highlights intensity transitions along edges and contours, emphasizing smooth region variations. Due to its robustness in edge detection, combining sensitivity to intensity transitions with intrinsic noise smoothing, Sobel is widely used in image preprocessing for structural feature analysis, object segmentation, and visual pattern recognition (Iglesias et al., 2024).

The Prewitt Filter is a widely employed edge detection technique utilizing first-order derivatives to estimate intensity gradients. This method applies to discrete convolutional masks oriented along horizontal and vertical axes, identifying significant luminosity transitions. Although like Sobel, Prewitt is characterized by computational simplicity, making it efficient for low-computational-cost applications. It's beneficial for contour identification in low-noise images, contributing to object segmentation and visual feature extraction in computer vision systems (Pritha and Fathima, 2024).

Classification Algorithms

The Weka data mining tool classified image features using local KNN, rseslib KNN, optimized forest, random forest, DL4j, and SVM algorithms to ensure robust classification and mitigate the risk of overfitting. All models were evaluated using ten-fold cross-validation. In this procedure, the dataset was partitioned into 10 equal subsets; in each iteration, 9 subsets were used for training while the remaining subset served as the validation set. This process was repeated 10 times, ensuring that each leaf sample was used for both training and testing (Kotak and Modi, 2020). Finally, it combines the random forest predictions with those of a cost-sensitive model to generate the final output (Siers and Islam, 2015).

Local KNN (k-Nearest Neighbors) is a variation of the classic k-Nearest Neighbors (KNN) algorithm that emphasizes adapting the model to different regions of the feature space. Instead of using a fixed k value for the entire dataset, local KNN dynamically adjusts k based on the data density (Lee et al., 2022). Rseslib KNN refers to implementing the k-Nearest Neighbors (KNN) algorithm within rseslib, a Java-based library for rough set theory and machine learning. This library provides various tools for data analysis, classification, and feature selection, including an optimized KNN algorithm.

The selection of machine learning algorithms (SVM, KNN variations, Random Forest, and DL4J) was designed to compare different computational approaches for identifying subtle intraspecific variations. SVM was chosen for its efficiency in high-dimensional margin separation, crucial for distinguishing overlapping folk types. Random Forest and its optimized versions were employed due to their robustness against missing data and noise, a common issue in damaged herbarium specimens. KNN algorithms provided a similarity-based approach akin to traditional botanical comparisons, while DL4J enabled the extraction of complex, non-linear structural features. This multi-algorithmic framework ensures that the recovery of folk taxonomy is not dependent on a single mathematical model, but instead on a consistent biological signal detected across different logical architectures.

Optimized forest is a machine learning algorithm that enhances predictive accuracy by integrating feature selection and ensemble learning. It first identifies a subset of the most relevant features, reducing dimensionality and mitigating overfitting. A random forest is trained using only these selected features, improving the model's efficiency. Finally, the predictions from the random forest were combined with those from an optimized model that may incorporate cost-sensitive learning, weighted classification, or other ensemble techniques. This approach improves performance, reduces computational complexity, and enhances interpretability, making it particularly useful for classification and regression tasks with high-dimensional data (Yuan et al., 2024).

DL4j is a multi-layer artificial neural network algorithm for modeling complex problems for image classification and recognition (Şekeroğlu and İnan, 2016; Lang et al., 2019). The SVM algorithm resolves classification problems by region; a hyperplane separates classes. The hyperplane distance is defined by support vectors establishing a margin within the dataset (Kremic and Subasi, 2016).

Performance Evaluation

To assess classification accuracy, ANOVA and Tukey tests will be performed using R software (R Core Team, 2024). Based on the F-measure metric, this approach will compare classification results pairwise, considering harmonic means of true positives, false positives, and false negatives. This analysis was used as a preliminary step to select the algorithm with the best statistical performance and, consequently, the one

that best represents the data. For details on the individual performance of the algorithms (Supplementary Material 2).

In addition to p -values, we quantified the magnitude of algorithm-related effects using eta-squared (η^2) and omega-squared (ω^2) as effect size measures derived from the one-way ANOVA. To provide precise estimates of model performance, we also computed t-based 95% confidence intervals for the mean F-measure for each algorithm across dataset (adaxial, abaxial, and combined leaf surfaces).

The confusion matrix was used to evaluate the correct classification of *B. caapi* folk types and *D. cabrerana* (Cuatrec.) B.Gates, using abaxial and adaxial leaf surfaces. The matrix was normalized to percentage values and visualized as a heatmap in the R environment using the `ggplot2` (Wickham, 2016) and `viridis` (Garnier et al., 2024) packages. In the latter package, the color intensity reflects the frequency of the classifications. This approach allowed us to identify the folk types with greater precision and those with more significant overlap in classification.

A network graph based on a confusion matrix was built to visualize the similarity relations and confusions among the folk types generated by the best SVM algorithm using the combined (adaxial and abaxial) leaf surfaces. The nodes represent the folk types, and the edges indicate the levels of connection, weighted by the frequency of erroneous classifications. The connections (edges) indicate the levels of similarity, whose thickness varies proportionally to the weight attributed by the correct classifications. The spatial arrangement of the nodes allows approximations and distances between the clusters to be visualized, although not corresponding to an exact metric scale. The analysis was performed in the R environment, using the `igraph` (Csárdi and Nepusz, 2006; Csárdi et al., 2025) and `ggraph` (Pedersen, 2024) packages, with the Fruchterman-Reingold layout to distribute the nodes according to their connections. The edges were colored and adjusted in thickness to reflect the intensity of the connection between the classes. This approach allowed the identification of clustering patterns and morphological similarity, highlighting which folk types are more differentiable and which present higher overlap in the classification.

Results

A total of 768 images of the adaxial and abaxial surfaces of 384 herborized leaves, collected from 47 vine plants of folk types of *B. caapi* (~95%) and *D. cabrerana* (~5%) were photographed ($n=768$) and analyzed using six machine learning algorithms

(KNN, Reselib KNN, Optimized Forest, Random Forest, SVM, and DL4J) to verify whether the classification assigned based on morphological leaf traits could serve as a potential taxonomic classification tool. The automated identification was performed using the VCodeAyahuasca software, which features an intuitive Graphical User Interface (GUI) to facilitate use by botanists and researchers. The tool is open-source and available for the scientific community at: <https://github.com/DeborahBambil/VCodeAyahuasca>.

The analysis of variance based on the F-measure indicated no statistically significant differences among the algorithms in the specific evaluations for adaxial, abaxial, and combined (adaxial and abaxial) leaf surfaces ($p\text{-value} \geq 0.05$; Fig. 2A, 2B, and 2C). Therefore, the algorithm performances in classifying the folk types of *B. caapi* were not attributable to systematic differences among classifiers.

Across the adaxial dataset, mean F-measure values ranged from 0.640 to 0.668, with broad overlap of 95% confidence intervals among algorithms (e.g., Reselib KNN: 0.668, 95% CI 0.556–0.781; SVM: 0.668, 95% CI 0.526–0.809; DL4J: 0.649, 95% CI 0.514–0.784). The magnitude of the effect of algorithm choice was negligible ($\eta^2 = 0.004$; $\omega^2 \approx 0$). For the abaxial dataset, mean F-measure values varied between 0.631 and 0.672 (Local KNN: 0.672, 95% CI 0.552–0.792; Reselib KNN: 0.665, 95% CI 0.546–0.784; SVM: 0.654, 95% CI 0.505–0.803), again showing substantial overlap of confidence intervals and a negligible algorithm effect ($\eta^2 = 0.008$; $\omega^2 \approx 0$). For the combined-surface dataset, overall performance increased (means 0.701–0.730), but algorithm-related differences remained negligible ($\eta^2 = 0.005$; $\omega^2 \approx 0$), with the highest mean values observed for SVM (0.730, 95% CI 0.600–0.859) and Local KNN (0.727, 95% CI 0.612–0.842).

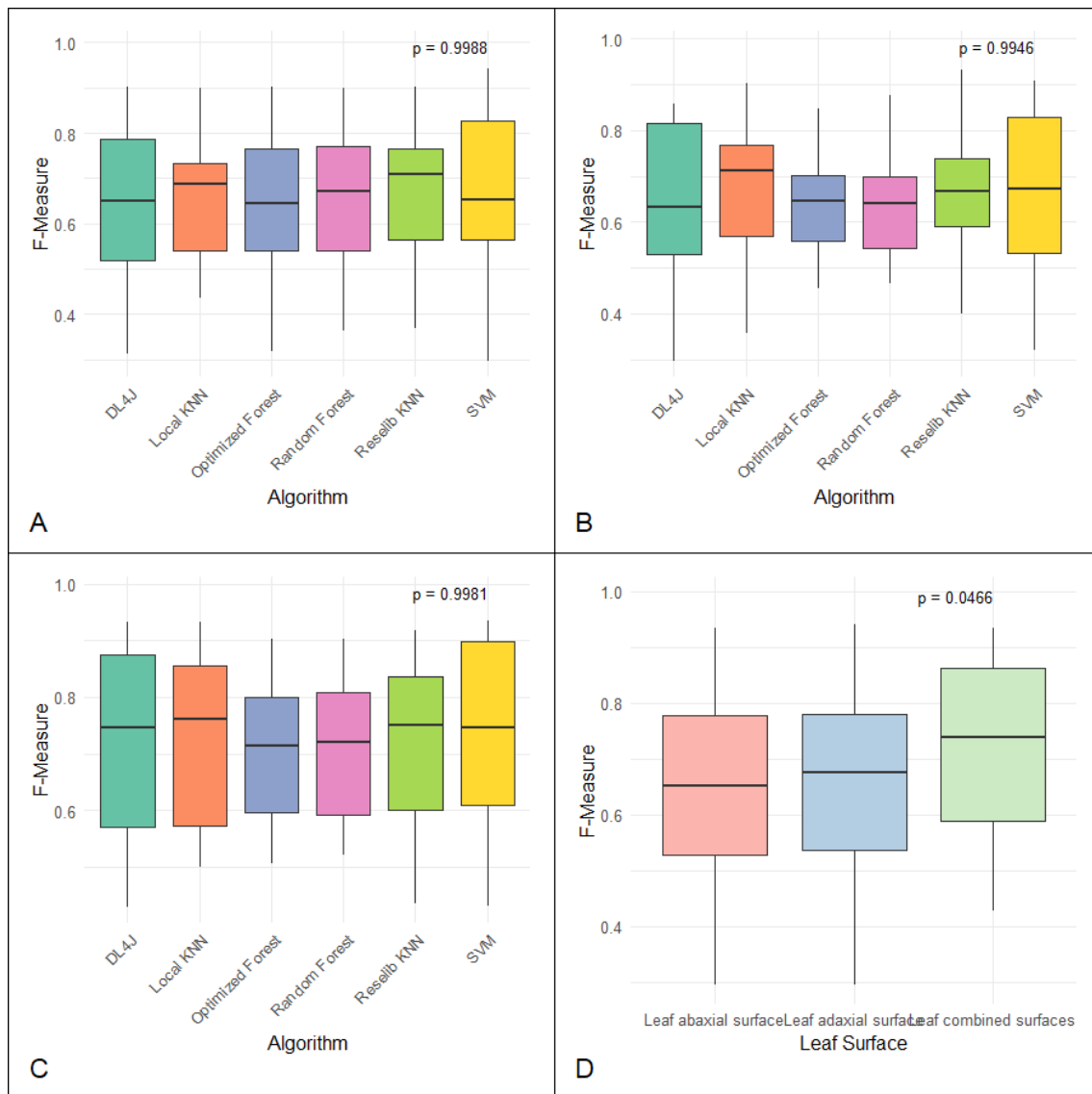


Fig. 2. A – C) Distribution of F-Measure values for different classification algorithms applied to identifying the folk types of Ayahuasca vine, *B. caapi* and *D. caberana*, considering distinct leaf surfaces or combined of them. D) Anova test.

A significant effect of leaf surface (adaxial, abaxial, and combined) on classification performance was detected based on mean F-measure values, as indicated by the ANOVA test ($F=3.119$; $p\text{-value}=0.0466$; Fig. 2D). Although Tukey's post hoc test did not identify statistically significant pairwise differences (e.g., combined vs. adaxial: difference=0.0027; $p\text{-value}=0.9953$), the comparisons between combined and abaxial surfaces (difference=0.0650; $p\text{-value}=0.0726$) and between combined and adaxial surfaces (difference=0.0623; $p\text{-value}=0.0895$) approached the 5% significance threshold. These findings highlight the potential benefit of incorporating both adaxial and abaxial leaf surface information to improve classification accuracy of *B. caapi* folk types.

Even without significant statistical differences (p -value of adaxial=0.999, abaxial=0.995, and combined=0.998) among the six algorithms, the accuracies among them were medium to high (from 60 to 70%) and increased consistently in the combined leaf surfaces analysis (from 64 to 70%) related to adaxial (from 61 to 64%) and abaxial (from 62 to 65%) surface accuracies (Table 1). These accuracy increases showed the potential integration of both leaf surfaces, which is looking to improve the model's performance. The SVM algorithm stood out with the highest accuracy (70%) and the Deep Learning 4j had the lowest values (64%).

Table 1. Accuracies of correct classification were not statistically significant (p -value $\geq$ 0.05) of folk types related to *B. caapi* and *D. cabrerana* based on leaf surface using six algorithms from three classifiers.

Classifier	Algorithm	Adaxial leaf surface (%)	Abaxial leaf surface (%)	Combined leaf surfaces (%)
Lazy	Local KNN	63	65	69
	Rseslib KNN	64	65	68
Trees	Optimized Forest	61	64	68
	Random Forest	62	63	68
Function	SVM	63	63	70
	Deep Learning 4j	60	62	64

KNN: k-nearest neighbor algorithm, SVM: support vector machine.

Even though the analysis of variance did not reveal statistically significant differences between the algorithms (p -value $\geq$ 0.05), the SVM algorithm for combined leaf surfaces was adopted for further interpretation in this study because it showed the highest accuracy (70%) for correct classification, the highest mean F-measure (0.694), and the strong performance in the area under the ROC curve (0.890) (Supplementary Material 2). Additionally, SVM provided balanced classification across different folk types, confirming its consistency in representing the data obtained from integrating both leaf surfaces.

The confusion matrix (Fig. 3) using the SVM algorithm and the combined (adaxial and abaxial) leaf images dataset demonstrated the assignment performance in classification (Fig. 3). Overall, the algorithm achieved remarkable accuracy in correctly

identifying several folk types, with values reaching 97% for specific classes. In contrast, others exhibited greater misclassification (34%).

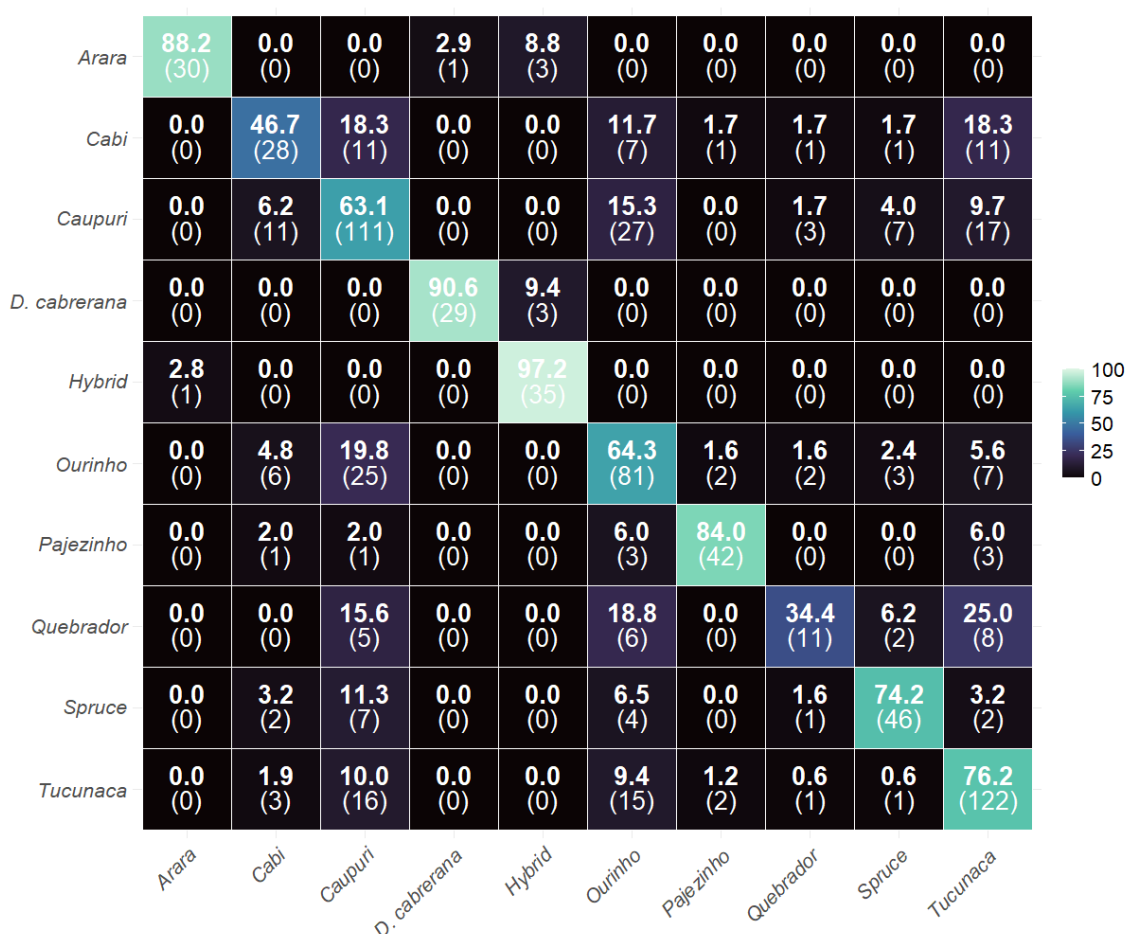


Fig. 3. Confusion matrix with the percentage of accuracy and mismatch among *D. cabrerana* and the folk types of *B. caapi* [Arara, Cabi, Caupuri, Caupuri-de-nós-longos (Spruce), Hybrid, Ourinho, Pajezinho, Quebrador e Tucunaca], obtained from SVM algorithm based on combined leaf surface pictures. The numbers on the diagonal represent the correct percentage of classifications for each folk type, while the other ones in the same line represent the incorrect percentage of classifications. The numbers inside the parentheses represent absolute leaf numbers for each folk type.

The folk type *Hybrid* ($n_P=3$, $n_L=18$) had the highest accuracy (97%) with one confusion with the folk type *Arara* (Fig. 3). *D. cabrerana* ($n_P=3$, $n_L=18$) had the second highest accuracy (91%) with three confusions with the *Hybrid*. Highlighting that morphological leaf surfaces discriminated it from *B. caapi*, justifying the use of *D. cabrerana* as an external group. *Arara* ($n_P=1$, $n_L=17$) and *Pajezinho* ($n_P=2$, $n_L=25$) also

achieved high leaf classification accuracies of 88 and 84% respectively. The vine folk types *Caupuri-de-nós-longos* ($n_P=1$, $n_L=31$) and *Tucunaca* ($n_P=11$, $n_L=80$) were good for high classification accuracy, respectively 74 and 76%. *Caupuri* ($n_P=11$, $n_L=88$) and *Ourinho* ($n_P=9$, $n_L=63$) had medium leaf accuracy classification, respectively, 63 and 64%. Meanwhile, the folk types *Quebrador* ($n_P=3$, $n_L=16$ - 34%) and *Cabi* ($n_P=4$, $n_L=30$ - 47%) had the lowest leaf accuracy classification, respectively 34 and 47%, with the greatest number of confusions among the other six folk types (Fig. 3).

To better visualize the relationships among the folk types based on SVM model performance, a similarity network (SN - Fig. 4) was built which is equivalent to a confusion matrix (Fig. 3). In the SN graphic, the nodes represent the folk types and the weighted edges reflect the degree of similarity inferred by the model where the weighted edges highlight the pairwise sample similarities (Wang et al., 2014). The thicker the line, the greater the number of confusions or misclassification patterns among the folk types. This representation reveals notable patterns of similarity contributing to classification of morphological folk types (Fig. 4). Although not based on strict statistical distances, the spatial arrangement of nodes offers a geometric approximation of the closeness or separation between clusters. The closer the nodes are, the more similar they are, and the thicker the edge thickness.

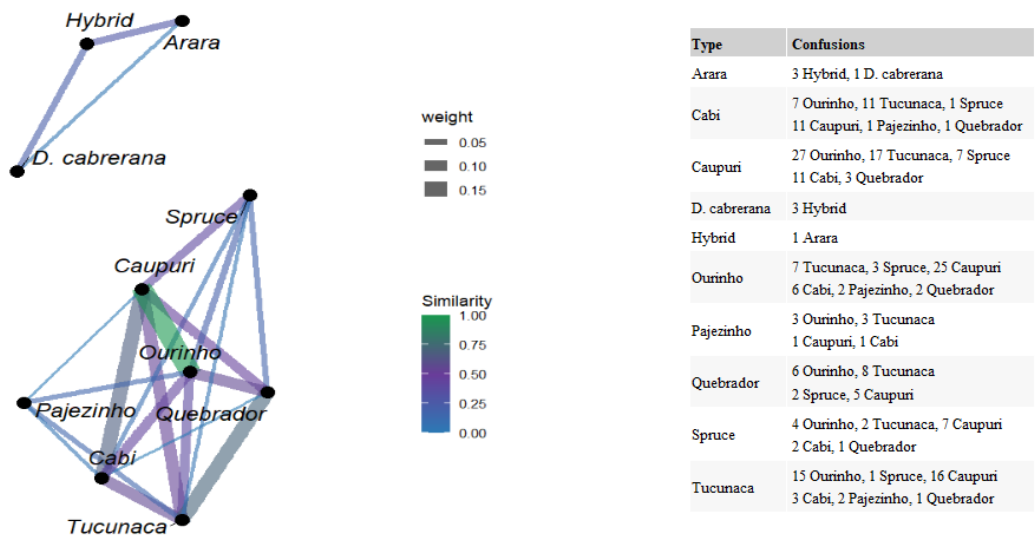


Fig. 4. Similarity network between *D. cabrerana* and the folk types of *B. caapi* based on the SVM algorithm, using the results for combined leaf surfaces.

Two clusters of folk types were distinct (Fig. 4). The first cluster comprised *D. cabrerana*, *Hybrid*, and *Arara* and their respective connections; the second cluster includes the remaining seven folk types (*Cabi*, *Caupuri*, *Caupuri-de-nós-longos*, *Pajezinho*, *Ourinho*, *Quebrador*, and *Tucunaca*) and their connections (Fig. 4). Considering *D. cabrerana*, *Hybrid*, and *Arara* as an interconnected cluster, this result also aligned with their high classification accuracy (91, 97, and 88%, respectively – Fig. 3). Furthermore, the misclassifications observed for *D. cabrerana*, *Hybrid*, and *Arara* (Fig. 3) happened only among themselves, with no confusion involving other folk types.

For the other cluster in the similarity network graphic, the folk types (*Cabi*, *Caupuri*, *Caupuri-de-nós-longos*, *Pajezinho*, *Ourinho*, *Quebrador*, and *Tucunaca*) displayed more confusion revealing a higher level of similarity. The strongest connections, indicated by thicker and shorter lines in greenish tones, were observed between *Ourinho* and *Caupuri* ($n=25$), *Cabi* and *Caupuri* ($n=11$), and *Quebrador* and *Tucunaca* ($n=8$ - Fig. 4).

The folk types *Ourinho* and *Tucunaca* exhibited the highest and maximum number of confusions within the group (six each – Fig. 4), reflecting the highest number of misclassifications (Fig. 3). However, these connections are represented by thinner lines and colors closer to blue, indicating weak connections, that is, misclassifications with low percentages ($\leq 10\%$) (Fig. 3 and 4).

Quebrador and *Cabi* showed the lowest classification accuracies by the SVM algorithm (37 and 34%, respectively – Fig. 3) and displayed multiple connections (from 4 to 6) (Fig. 4). For both, the presence of edges with greenish tones and thickness values above 0.10 stands out, reflecting the confusion patterns also observed for these folk types, especially between *Quebrador* and *Tucunaca* (25%), and between *Cabi* and *Caupuri* and *Tucunaca* (18%).

The limited number of samples available for these categories could partially explain these results. Many leaf images were excluded due to poor integrity, as commonly occurs with herbarium specimens. From an initial dataset of 1646 leaf images, only 768 were retained after quality filtering. This reduction disproportionately affected certain folk types. *Cabi* reduced from 236 to 60 usable images, and *Quebrador* from 122 to 32. In terms of individual plants, the dataset went from 58 to 47 specimens, with *Cabi* being the most affected, dropping from 10 to 4 plants, while other folk types lost were from one to two plants. These imbalances likely limited the model's ability to generalize

morphological patterns for these types, contributing to their lower classification performance.

Discussion

B. caapi is the primary plant used in the ritual preparation of ayahuasca, serving as a foundational subject for studies that bridge scientific inquiry and traditional knowledge. Regarded as sacred by numerous Amazonian peoples, *B. caapi* embodies not only spiritual and symbolic relevance but also considerable ethnobotanical value, having been recognized and managed for generations by traditional communities and religious groups (Labate and Araújo, 2002; Oliveira et al., 2023). The historical record of ayahuasca use extends throughout the northwestern Amazon, encompassing more than 30 ethnic groups across Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru, as well as the Orinoco region in Venezuela and the Pacific coast of Colombia and Panama (Schultes, 1986; Ott, 1996; Miller et al., 2019). However, it is important to note that ayahuasca is not used uniformly across all Indigenous communities, and estimates indicate that only about 10% of global ayahuasca users belong to Indigenous populations (Tupper, 2009).

In the second half of the 20th century, the ritual use of ayahuasca expanded beyond Indigenous contexts and became institutionalized by syncretic Brazilian religions such as União do Vegetal and Santo Daime (Labate et al., 2010; Labate and Assis, 2018). Since then, ayahuasca has diffused across more than 50 countries, where it is now used in religious, therapeutic, and scientific settings (Tupper, 2008; Labate et al., 2010; Labate and Assis, 2018). Recent estimates suggest that over four million people worldwide have consumed ayahuasca, with approximately 820,000 new users and 5.5 million doses recorded in 2019 alone (Domsac, 2023; Suárez, 2023). This global expansion has raised ethical and ecological concerns regarding the commodification of ayahuasca, overharvesting of its botanical constituents, and marginalization of Indigenous epistemologies, reinforcing the need to preserve both the plant species and the traditional knowledge systems in which they are embedded (Tupper, 2009; Oliveira et al., 2018, 2023).

The novelty of this study lies in its pioneering approach to recovering a folk taxonomy using machine learning, rather than focusing on traditional botanical taxa (e.g., different genera or families). This study contributes to this effort by evaluating whether machine learning algorithms can recover folk classifications of *B. caapi* based on leaf morphology. Recent studies have demonstrated anatomical and genetic differentiation

among *B. caapi* ethnotaxa, often preserved in ceremonial contexts through oral transmission and experiential use (Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023). Our findings support the validity of these local classifications and confirm that, despite subtle differences, leaf morphology can distinguish traditional types, including differentiating *B. caapi* from closely related genera such as *Diplopterys*. Thus, this work not only offers a technical contribution to plant taxonomy but also demonstrates how combining morphology, ethnobotanical knowledge, and data science can yield valuable advances in the automated classification of culturally important plants.

Among the six evaluated algorithms, all showed medium to high accuracy (60–70%), with performance improving when using combined adaxial and abaxial leaf surfaces. While ANOVA revealed no statistically significant differences among the algorithms, the SVM classifier stood out with the highest accuracy (70%), the best F-measure, and strong ROC curve performance (Supplementary Material 2). These findings indicate that leaf morphology contains sufficient diagnostic information to recover most folk classifications, validating the relevance of traditional taxonomies and highlighting machine learning as a promising tool for automated plant identification.

When compared with previous studies on automated plant identification (Bambil et al., 2020; Bao and Bambil, 2021; Kiflie et al., 2024), the classification accuracies obtained in this study (60–70%; Table 1) are lower, but remain consistent with the increased difficulty of discriminating closely related taxa and ethnobotanical categories using only leaves. Here, nine folk types belonging to a single species of *B. caapi* were compared using herborized leaves. In contrast, the same machine learning approach applied to 30 tree species from 27 genera and 19 families achieved accuracies above 90% when based on fresh leaves (Bambil et al., 2020), indicating that broader taxonomic diversity and stronger morphological contrasts tend to improve classification performance.

In general, studies applying machine learning algorithms such as SVM and Random Forest frequently report high accuracies (>90%) in interspecific contexts, including seed identification and medicinal plant recognition at the species, genus, or family level (Bao and Bambil, 2021; Kan et al., 2017; Kiflie et al., 2024; Nidhya et al., 2024). These approaches typically rely on fresh material or images acquired under controlled conditions, in which morphological differences are more pronounced. By contrast, the present study addresses intra-specific classification of folktypes based on herbarium leaf material, a context characterized by subtle, continuous, and highly

overlapping morphological variation, and therefore by greater taxonomic, ethnobotanical, and sampling complexity (Körschens et al. 2024).

The lack of statistically significant differences between the performance of the tested algorithms (as shown by the ANOVA test) suggests that the morphological signal present in *B. caapi* leaf exsiccates is robust and consistently captured across different computational architectures. This convergence implies that the classification is grounded in stable biological traits rather than being an artifact of a specific mathematical model. For practical applications, such as the VCode Ayahuasca software. Furthermore, providing a multi-algorithm approach within the software's GUI allows researchers to cross-validate results, enhancing the reliability of folk taxonomy recovery in botanical collections.

Previous studies indicate that machine learning algorithms are potentially effective tools for the identification of plant species (Kumar et al., 2011; Begue et al., 2017; Bambil et al., 2020; Patil and Sasikala, 2023; Nidhya et al., 2024). There is not yet a universally superior model; the choice of the most suitable algorithm is directly related to the characteristics of the dataset and the nature of the problem being investigated (Wäldchen & Mäder, 2018a).

In our study the success of algorithm models can be attributed to its ability to detect subtle patterns in high-dimensional datasets, a feature particularly suited to classifying leaf images where differences are not always visually obvious (Azlah et al., 2019). Combining both leaf surfaces enhanced the representation of morphological diversity; since features like color, shape, and texture vary across leaf surfaces and may provide complementary information (Sachar and Kumar, 2021). The bifacial nature of angiosperm leaves adds further value, as the adaxial surface is often more exposed and uniform, while the abaxial surface presents the venation and a high diversity of trichomes and stomata that are taxonomically informative (Nakata and Okada, 2013; Caseys et al., 2024). Our results confirm that integrating both surfaces increased classification accuracy. In *B. caapi*, the abaxial side is particularly useful due to its clearer venation and gland positions, aiding differentiation.

The confusion matrix (Fig. 3) shows high performance for certain types such as *Hybrid* (97%), *D. cabrerana* (91%), and *Arara* (88%), while *Quebrador* (34%) and *Cabi* (47%) exhibited lower accuracy due to greater morphological overlap (Fig. 3). These outcomes mirror the challenges of classifying taxa with intraspecific variation, especially when only leaf morphology is considered.

The similarity network (Fig. 4) reinforces the confusion matrix findings, with two distinct clusters: one comprising *D. cabrerana*, *Hybrid*, and *Arara*; and another including *Cabi*, *Caupuri*, *Caupuri-de-nós-longos*, *Pajezinho*, *Ourinho*, *Quebrador*, and *Tucunaca*. These patterns reflect both morphological proximity and misclassification tendencies. Stronger connections between types such as *Caupuri* and *Ourinho*, and *Cabi* and *Caupuri*, point to shared morphological traits, possibly in both leaves and stems (Oliveira et al., 2023).

The Angiosperm Phylogeny Group (2016) emphasize that plant morphology remains a central element for taxonomic distinction and identification, being widely recognized as a foundational basis for species classification. This relevance is reflected in the results of the present study, in which *B. caapi* folk types such as *Hybrid* and *Arara* showed high correct classification rates, exceeding 88% (Fig. 3), demonstrating that leaf morphological features provide sufficient information to distinguish these groups. However, species identification is not always straightforward, especially when there is overlap in morphological attributes among taxa (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016).

Previous folk classifications partially align with these clustering. For example, Oliveira et al. (2023), presented a Venn diagram to explain the categorization of vines by folk taxonomists. In this diagram, *Caupuri*, *Caupuri-de-nós-longos*, and *Cabi* are closely related due to their inflated nodes (Figs. 1B, 1C, and 1J), while *Arara* appears within the *Tucunaca* group. *Arara* could form a distinct cluster, separate from *Caupuri* and *Tucunaca*, suggesting that the classification based on abaxial leaf surface images by AI does not necessarily follow previously established patterns (Monteles, 2020). In contrast, the clustering, based on DNA barcoding on *B. caapi* identifies *Arara* as a lineage within *Caupuri*, whereas *Ourinho* is more closely related to *Tucunacas* (Luz et al., 2023).

Some groups, such as *Quebrador* ($n_P=3$, $n_L=16$ - 34%) and *Cabi* ($n_P=4$, $n_L=30$ - 47%), showed low classification performance (Fig. 3), even though they were genetically related based on DNA barcode and stem morphology (Luz et al., 2023). This pattern is most plausibly explained by the high degree of morphological overlap between these two folk types and several other categories, which likely limited the algorithms' ability to extract distinctive leaf-based patterns. Indeed, both *Cabi* and *Quebrador* presented the largest number of confusions with multiple folk types, but no confusion between them indicating intrinsic difficulty in their morphological delimitation based on leaves alone.

Many herbarium leaves were excluded due to poor quality, reducing available samples from 1646 to 768 images. *Cabi* and *Quebrador* were disproportionately affected (from 236 to 60, and from 122 to 32, respectively), potentially limiting the model's ability to learn distinct patterns. Although the final sample sizes were not the smallest in the dataset, the substantial reduction in available images may have further constrained model training and amplified the effects of morphological similarity. Therefore, the lower accuracies observed for these two folk types likely reflect a combination of true morphological ambiguity and limitations imposed by the available sampling, suggesting that both larger datasets and additional diagnostic traits will be required to resolve these cases fully.

Traditional *B. caapi* classifications emphasize stem morphology (the primary basis for folk classification) and brew characteristics, but leaf traits are increasingly recognized (Monteles, 2020; Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023). *Pajezinho* is associated with high vein density, and *Caupuri-de-nós-longos* with specific gland arrangements. *Arara* is noted for its vibrant leaf coloration, a trait that may explain its high classification accuracy (Oliveira et al., 2023). However, the model did not reflect expected relationships, such as between *Tucunaca* and *Ourinho*, suggesting that other traits beyond leaf morphology are required for full resolution.

Challenges in automated taxonomy remain, particularly with respect to image quality and intraspecific variation (Wäldchen and Mäder, 2018b). The presence of fungal infections, particularly in *Quebrador*, may affect classification, but also provide distinctive features detectable by machine learning. These biological complexities highlight the importance of integrating multiple sources of data to improve accuracy and generalizability.

This study aligns with broader findings that combining morphological traits with machine learning improves taxonomic resolution (Bambil et al., 2020; Sachar and Kumar, 2021). Even though all images were leaf-based, the system achieved notable success in differentiating closely related types within *B. caapi*. In particular, the high accuracy in classifying *D. cabrerana* underscores the potential of machine learning to support genus-level distinctions in morphologically complex groups. Machine learning proved to be an ideal tool for this study because it transcends the limitations of human visual perception in identifying intraspecific morphological overlaps. By processing multidimensional data from leaf exsiccates, the algorithms identified patterns in leaf architecture that persist even after drying, altering leaf color and weakens the leaf's integrity. This computational

approach effectively bridges the gap left by the absence of stem and reproductive traits in herbarium samples, and by the restricted availability of well-documented vouchers for some folk types, providing a standardized, objective method for validating folk taxonomies previously considered inaccessible through leaf morphology alone.

The limitation of using only leaf images highlights the importance of incorporating multiple sources of information to improve the accuracy of differentiation. Studies have shown that integrating various morphological characteristics with computer vision techniques can significantly enhance the discrimination of morphologically similar botanical groups (Deglint et al., 2018; Araujo et al., 2021).

Despite some ambiguities, the results support the validity of many folk classifications. Groups like *Arara*, *Hybrid*, and *Caupuri* exhibited high classification rates (Fig. 3), even within a single species context, reinforcing the strength of traditional knowledge. Incorporating additional data, such as stem traits, chemical profiles, and genetic markers could enhance model accuracy, especially for less distinct types, and help better understand the biological basis of traditional classifications in ayahuasca and other ethnobotanically important species. Expanding the dataset to include additional specimens and a more balanced representation of all folk types may further improve model robustness and reduce potential classification bias.

Future research should explore interdisciplinary approaches combining machine learning with spectroscopy, anatomy, and molecular data to enhance resolution. Integrating these methodologies can create more robust classification frameworks, contributing not only to scientific knowledge but also to the conservation of biodiversity and cultural heritage. In this broader context, herbarium collections and digital herbaria serve as strategic resources for developing and validating automated plant identification tools applicable to other culturally or taxonomically challenging species.

Conclusion

This study demonstrates that machine learning algorithms, particularly SVM, are effective in distinguishing *B. caapi* folk types based on leaf morphology, even in the presence of high intraspecific variation. The combination of adaxial and abaxial leaf surfaces substantially improved classification accuracy, achieving 70% overall and over 90% for certain folk types such as *Hybrid*, *Arara*, and *D. cabrerana*. However, folk types like *Cabi* and *Quebrador* exhibited lower accuracy due to considerable morphological overlap, suggesting that leaf morphology alone may not be sufficient for all cases.

These findings validate the relevance of traditional folk taxonomies and demonstrate the potential of machine learning, when informed by ethnobotanical knowledge, as a complementary tool for automated plant identification. This approach contributes not only to biodiversity conservation but also to the preservation of cultural knowledge associated with ayahuasca.

Despite the promising outcomes, future studies should consider incorporating additional morphological traits, expanding the dataset to include more individuals and broader geographic variation. Such efforts will enhance the robustness, accuracy, and applicability of this methodology. Ultimately, this work paves the way for the integration of artificial intelligence in ethnobotany and taxonomy, offering new tools for scientific discovery and cultural heritage protection.

Referências

- Alencar, L.F.F., Davrieux, F., Fliedel, G., Rami, J.F., Chanterreau, J., Deu, M., Courtois, B., and Mestres, C. (2006). Development of NIRS equations for food grain quality traits through exploitation of a core collection of cultivated sorghum. *J. Agric. Food Chem.* 54, 8501–8509. 10.1021/jf061054g
- Anderson, W.R. (1979). Floral conservatism in Neotropical Malpighiaceae. *Biotropica* 11, 219–223. 10.2307/2388042
- Anderson, W.R., and Davis, C.C. (2006). Expansion of *Diplopterys* at the expense of *Banisteriopsis* (Malpighiaceae). *Harv. Pap. Bot.* 11, 1–16. 10.3100/1043-4534(2006)95[1:EODATE]2.0.CO;2
- Araujo, V.M., Brito Jr., A.S., Oliveira, L.E.S., and Koerich, A.L. (2021). Two-view fine-grained classification of plant species. *arXiv preprint*, 10.48550/arXiv.2005.09110
- Azlah, M.A.F., Chua, L.S., Rahmad, F.R., Abdullah, F.I., and Wan Alwi, S.R. (2019). Review on techniques for plant leaf classification and recognition. *Computers* 8, 77. 10.3390/computers8040077
- Bambil, D., Pistori, H., Bao, F., Weber, V., Alves, F.M., Gonçalves, E.G., de Alencar Figueiredo, L.F., Abreu, U.G.P., Arruda, R., and Bortolotto, I.M. (2020). Plant species identification using color learning resources, shape, texture, through machine learning and artificial neural networks. *Environ. Syst. Decis.* 40, 480–484. 10.1007/s10669-020-09769-w

- Bao, F., and Bambil, D. (2021). Applicability of computer vision in seed identification: deep learning, random forest, and support vector machine classification algorithms. *Acta Bot. Bras.* 35, 17–21. 10.1590/0102-33062020abb0361
- Begue, A., Kowlessur, V., Mahomoodally, F., and Pudaruth, S. (2017). Automatic recognition of medicinal plants using machine learning techniques. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 8. 10.14569/IJACSA.2017.080424
- Callaway, J.C., Brito, G.S., and Neves, E.S. (2005). Phytochemical analyses of *Banisteriopsis caapi* and *Psychotria viridis*. *J. Psychoactive Drugs* 37, 145–150. 10.1080/02791072.2005.10399795
- Callaway, J.C., McKenna, D.J., Grob, C.S., Brito, G.S., Raymon, L.P., Poland, R.E., Andrade, E.N., Andrade, E.O., and Mash, D.C. (1999). Pharmacokinetics of hoasca alkaloids in healthy humans. *J. Ethnopharmacol.* 65, 243–256. 10.1016/S0378-8741(98)00168-8
- Cao, Y., Wu, D., and Duan, Y. (2020). A new image edge detection algorithm based on improved Canny. *J. Comput. Methods Sci. Eng.* 20, 629–642. 10.3233/JCM-193963
- Caseys, C., Muhich, A.J., Vega, J., Ahmed, M., Hopper, A., Kelly, D., Kim, S., Madrone, M., Plaziak, T., Wang, M., and Kliebenstein, D.J. (2024). Leaf abaxial and adaxial surfaces differentially affect plant–fungal pathogen interactions. *bioRxiv preprint*, 10.1101/2024.02.13.579726
- Christenhusz, M.J.M. (2020). On species concepts, phylogenetics and the science of natural history—three current issues facing taxonomy. *Megataxa* 1, 67–72. 10.11646/megataxa.1.1.14
- Csárdi, G., and Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems* 1695.
- Csárdi, G., Nepusz, T., Müller, K., Horvát, S., Traag, V., Zanini, F., and Noom, D. (2025). igraph for R: R interface of the igraph library for graph theory and network analysis. *Zenodo*. 10.5281/zenodo.14736815
- Dang, M., Wang, H., Li, Y., Nguyen, T.-H., Tightiz, L., Xuan-Mung, N., Nguyen, T.N., 2024. Computer vision for plant disease recognition: A comprehensive review. *Bot. Rev.* 90, 251–311. 10.1007/s12229-024-09299-z
- Davis, C.C., and Anderson, W.R. (2010). A complete generic phylogeny of Malpighiaceae inferred from nucleotide sequence data and morphology. *Am. J. Bot.* 97, 2031–2048. 10.3732/ajb.1000146

- Deglint, J.L., Jin, C., and Wong, A. (2018). Investigating the automatic classification of algae using fusion of spectral and morphological characteristics via deep residual learning. arXiv preprint, 10.48550/arXiv.1810.10889
- Diniz, C.P., Grattapaglia, D., and Alencar Figueiredo, L.F. (2019). Comparative performance of bench and portable near infrared spectrometers for measuring wood samples of two *Eucalyptus* species (*E. pellita* and *E. benthamii*). In Proceedings of the 18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy (IM Publications Open LLP), pp. 31–38. 10.1255/nir2017.031
- Domsac, I. (2023). Ayahuasca, global consumption and reported deaths in the media. ICEERS. <https://www.iceers.org/ayahuasca-global-consumption-deaths/>
- Durgante, F. M., Higuchi, N., Almeida, A., & Vicentini, A. (2013). Species Spectral Signature: Discriminating closely related plant species in the Amazon with Near-Infrared Leaf-Spectroscopy. *Forest Ecology and Management*, 291, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.045>
- Francener, A., and Almeida, R.F. (2020). Banisteriopsis in Flora and Funga from Brasil [Banisteriopsis na Flora e Funga do Brasil]. <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB8803>
- Garnier, S., Ross, N., Rudis, R., Camargo, A.P., Sciaini, M., and Scherer, C. (2024). Viridis (Lite): Colorblind-friendly color maps for R (version 0.6.5). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4679423>
- Gates, B. (1982). Banisteriopsis, Diplopterys (Malpighiaceae). *Flora Neotropica* (The New York Botanical Garden).
- Hajam, M.A., Arif, T., Khanday, A.M.U.D., and Neshat, M. (2023). An effective ensemble convolutional learning model with fine-tuning for medicinal plant leaf identification. *Information* 14, 618. 10.3390/info14110618
- Hammouche, R., Attia, A., Akhrouf, S., and Akhtar, Z. (2022). Gabor filter bank with deep autoencoder-based face recognition system. *Expert Syst. Appl.* 197, 116743. 10.1016/j.eswa.2022.116743
- Han, B., Wenhan, G., Jun, F., Iroshan, A., Yang, J., Chen, G., Zhang, Y., Aizezi, N., and Liu, Y. (2025). Laser-induced breakdown spectroscopy for imaging and distribution analysis of heavy metal elements in soil. *J. Hazard. Mater.* 496, 139284. 10.1016/j.jhazmat.2025.139284

- Hodge, G.R., Acosta, J.J., Unda, F., Woodbridge, W.C., and Mansfield, S.D. (2018). Global near infrared spectroscopy models to predict wood chemical properties of *Eucalyptus*. *J. Near Infrared Spectrosc.* 26, 117–132. 10.1177/0967033518770211
- Iglesias, F., Aguilera, A., Padilla, A., Vizan, A., Diez, E., 2024. Application of computer vision techniques to estimate surface roughness on wood-based sanded workpieces. *Measurement* 224, 113917. 10.1016/j.measurement.2023.113917
- Kan, H.X., Jin, L., and Zhou, F.L. (2017). Classification of medicinal plant leaf image based on multi-feature extraction. *Pattern Recognit. Image Anal.* 27, 581–587. 10.1134/S105466181703018X
- Kiflie, M.A., Sharma, D.P., Haile, M.A., and Srinivasagan, R. (2024). EfficientNet ensemble learning: identifying Ethiopian medicinal plant species and traditional uses by integrating modern technology with ethnobotanical wisdom. *Computers* 13, 38. 10.3390/computers13020038
- Kirchler, C.G., Pezzei, C.K., Beć, K.B., Mayr, S., Ishigaki, M., Ozaki, Y., and Huck, C.W. (2017). Critical evaluation of spectral information of benchtop vs. portable near-infrared spectrometers: quantum chemistry and two-dimensional correlation spectroscopy for a better understanding of PLS regression models of rosmarinic acid content in *Rosmarinus*. *Analyst* 142, 455–464. 10.1039/C6AN02439D
- Körschens, M., Bucher, S.F., Bodesheim, P., Ulrich, J., Denzler, J., and Römermann, C. (2024). Determining the community composition of herbaceous species from images using convolutional neural networks. *Ecol. Inform.* 80, 102516. 10.1016/j.ecoinf.2024.102516
- Kotak, P., and Modi, H. (2020). Enhancing the data mining tool WEKA. In 2020 5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS), pp. 1–6. 10.1109/ICCCS49678.2020.9276870
- Kremic, E., and Subasi, A. (2016). Performance of random forest and SVM in face recognition. *Int. Arab J. Inf. Technol.* 13, 287–291. <https://iajit.org/PDF/Vol.13,%20No.2/8468.pdf>
- Kumar, M., Kamble, M., Pawar, S., Patil, P., and Bonde, N. (2011). Survey on techniques for plant leaf classification. *Int. J. Mod. Eng. Res.* 1, 538–544.
- Labate, B.C., and Araújo, W.S. (2002). *The ritual use of ayahuasca* [O uso ritual da ayahuasca]. (Mercado de Letras–FAPESP).

- Labate, B.C., and Assis, G.L.D. (2018). A critical review of the literature on the diaspora of Brazilian ayahuasca religions. In *The Expanding World Ayahuasca Diaspora* (Routledge), p. 244.
- Labate, B.C., MacRae, E., Goulart, S.L., Frenopoulo, C., and Meyer, M. (2010). Brazilian ayahuasca religions in perspective. In *Ayahuasca, Ritual and Religion in Brazil* (Routledge).
- Lang, S., Bravo-Marquez, F., Beckham, C., Hall, M., and Frank, E. (2019). WekaDeepLearning4j: A deep learning package for Weka based on DeepLearning4j. *Knowl.-Based Syst.* 178, 48–50. 10.1016/j.knosys.2019.04.013
- Lang, C., Almeida, D. R. A., & Costa, F. R. C. (2017). Discrimination of taxonomic identity at species, genus and family levels using Fourier Transformed Near-Infrared Spectroscopy (FT-NIR). *Forest Ecology and Management*, 406, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.003>
- Lang, C., Costa, F. R., Camargo, J. L., Durgante, F. M., & Vicentini, A. (2015). Near infrared spectroscopy facilitates rapid identification of both young and mature amazonian tree species. *PLoS ONE*, 10(8), e0134521+. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134521>
- Langdon, E.J. (1986). Yagé classifications within the Siona group: ethnobotany, ethnochemistry, and history [Las clasificaciones del yagé dentro del grupo Siona: etnobotánica, etnoquímica e historia]. *América Indígena* XLVI, 1101–1116.
- Lee, H., Choi, H., Sohn, K., and Min, D. (2022). KNN local attention for image restoration. In *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2129–2139. 10.1109/CVPR52688.2022.00218
- Lukic, M., Tuba, E., and Tuba, M. (2017). Leaf recognition algorithm using support vector machine with Hu moments and local binary patterns. In *2017 IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, pp. 485–490. 10.1109/SAMI.2017.7880358
- Luz, T.Z., Cunha-Machado, A.S., and da Silva Batista, J. (2023). First DNA barcode efficiency assessment for an important ingredient in the Amazonian ayahuasca tea: mariri/jagube, *Banisteriopsis* (Malpighiaceae). *Genet. Resour. Crop Evol.* 70, 1605–1616. 10.1007/s10722-022-01522-3
- Malcolm, B.J., Lee, K.C., 2018. Ayahuasca: An ancient sacrament for treatment of contemporary psychiatric illness? *Ment. Health Clin.* 7, 39–45. 10.9740/mhc.2017.01.039

- Mattera, G., Polden, J., and Nele, L. (2024). A time-frequency domain feature extraction approach enhanced by computer vision for wire arc additive manufacturing monitoring using Fourier and wavelet transform. *J. Adv. Manuf. Syst.* 23, 741–762. 10.1142/S021968672450032X
- Medeiros, A.D., Capobianco, N.P., Silva, J.M., Silva, L.J., Silva, C.B., and Santos Dias, D.C.F. (2020). Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. *Sci. Rep.* 10, 11267. 10.1038/s41598-020-68273-y
- Meng, H., Wenhan, G., Yanpeng, Y., and Yuzhu, L. (2025). Multimodal LIBS-FLIPA fusion with frame segmentation for robust plastic classification via advanced LIPA processing. *Opt. Lett.* 50, 3038–3041. 10.1364/OL.562180
- Miller, M.J., Albarracin-Jordan, J., Moore, C., and Capriles, J.M. (2019). Chemical evidence for the use of multiple psychotropic plants in a 1,000-year-old ritual bundle from South America. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 11207–11212. 10.1073/pnas.1902174116
- Minuano, C. (2022). The globalization of ayahuasca in the Peruvian Amazon [A globalização da ayahuasca na Amazônia peruana]. *Outras Palavras*. <https://outraspalavras.net/outrasmidias/a-globalizacao-da-ayahuasca-na-amazonia-peruana/>
- Monteles, R. (2020). “I come from the forest”: the sustainability of Amazonian sacred plants in Santo Daime [“Eu venho da floresta”: a sustentabilidade das plantas sagradas Amazônicas do Santo Daime]. Doctoral thesis, Universidade Federal do Amazonas.
- Nakata, M., and Okada, K. (2013). The leaf adaxial-abaxial boundary and lamina growth. *Plants* 2, 174–202. 10.3390/plants2020174
- Naranjo, P. (1995). Archaeology and psychoactive plants. In *Ethnobotany: Evolution of a Discipline* (Dioscorides Press), pp. 393–399.
- Nidhya, R., Imambee, K., Geethanjali, M., Anusha, M.L., and Vyshnavi, I. (2024). Real-time medicinal plant identification and classification using random forest algorithm. In *2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, pp. 1499–1504. 10.1109/ICCSP60870.2024.10543388
- Oliveira, R.C., Fagg, C.W., Labate, B.C., Sonsin-Oliveira, J., 2018. The urgent need to review the botanical classification of the ayahuasca vine. *Chacrana*. URL <https://chacrana.net/urgent-botanical-classification-ayahuasca/> (accessed 1.29.23).

- Oliveira, R.C., Behrens, C.S.B., Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C.W., Silva, M.S., Martins-Silva, T., and Sonsin-Oliveira, J. (2023). Ethnobotany and wood anatomy of *Banisteriopsis caapi* ethnotaxa and *Diplopterys* cf. *pubipetala*, components of ayahuasca in Brazilian rituals. *Econ. Bot.* 77, 18–47. 10.1007/s12231-023-09567-w
- Olsen, A., Han, S., Calvert, B., Ridd, P., and Kenny, O. (2015). In situ leaf classification using histograms of oriented gradients. In 2015 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), pp. 1–8. 10.1109/DICTA.2015.7371274
- Ott, J. (1996). *Pharmacoticon: Entheogenic Drugs, Their Plant Sources and History* (Natural Products Co.)
- Patil, J.K., and Kumar, R. (2017). Analysis of content-based image retrieval for plant leaf diseases using color, shape, and texture features. *Eng. Agric. Environ. Food* 10, 69–78. 10.1016/j.eaef.2016.11.004
- Patil, S., and Sasikala, M. (2023). A weighted KNN model for identification of medicinal plant species. *Multimed. Tools Appl.* 83, 13775–13789. 10.1007/s11042-023-15931-8
- Pedersen, T.L. (2024). *ggraph: An implementation of grammar of graphics for graphs and networks.*
- Pritha, A., and Fathima, G. (2024). A detailed description on various techniques of edge detection algorithms. In *Integrating Metaheuristics in Computer Vision for Real-World Optimization Problems* (John Wiley & Sons, Ltd), pp. 193–205. 10.1002/9781394230952.ch11
- Qiu, L., Dong, J., Li, X., Parey, S.H., Tan, K., Orr, M., Majeed, A., Zhang, X., Luo, S., Zhou, Xuguo, Zhu, C., Ji, T., Niu, Q., Liu, S., and Zhou, Xin. (2023). Defining honeybee subspecies in an evolutionary context warrants strategized conservation. *Zool. Res.* 44, 483–493. 10.24272/j.issn.2095-8137.2022.414
- R Core Team, 2024. *R: A language and environment for statistical computing.*
- Rangkuti, A.H., Kerta, J.M., Mogot, R.Y., and Athala, V.H. (2024). Identification of Indonesian traditional foods using machine learning supported by segmentation methods. *JOIV Int. J. Inform. Vis.* 8, 2324–2335. 10.62527/joiv.8.4.2545
- Rose, I.S. de, and Langdon, E.J. (2010). (Neo)shamanic dialogues: encounters between the Guarani and ayahuasca [Diálogos (neo)xamânicos: encontros entre os Guarani e a ayahuasca]. *Tellus*, 83–113.

- Sachar, S., and Kumar, A. (2021). Survey of feature extraction and classification techniques to identify plants through leaves. *Expert Syst. Appl.* 167, 114181. 10.1016/j.eswa.2020.114181
- Santos, B.W.L., Oliveira, R.C. de, Sonsin-Oliveira, J., Fagg, C.W., Barbosa, J.B.F., and Caldas, E.D. (2020). Biodiversity of β -carboline profiles of *Banisteriopsis caapi* and ayahuasca, a plant and a brew with neuropharmacological potential. *Plants* 9, 870. 10.3390/plants9070870
- Schultes, R.E. (1954). A new narcotic snuff from the Northwest Amazon. *Bot. Mus. Leaf. Harv. Univ.* 16, 241–260.
- Schultes, R.E. (1986). Recognition of variability in wild plants by Indians of the Northwest Amazon. *J. Ethnobiol.* 6, 229–238.
- Şekeroğlu, B., and İnan, Y. (2016). Leaves recognition system using a neural network. *Procedia Comput. Sci.* 102, 578–582. 10.1016/j.procs.2016.09.445
- Siddharth, T., Kirar, B.S., and Agrawal, D.K. (2022). Plant species classification using transfer learning by pretrained classifier VGG-19. Preprint at arXiv, 10.48550/arXiv.2209.03076
- Siers, M.J., and Islam, M.Z. (2015). Software defect prediction using a cost-sensitive decision forest and voting. *Inf. Syst.* 51, 62–71. 10.1016/j.is.2015.02.006
- Soleimanizadeh, S., Mohamad, D., Saba, T., and Rehman, A. (2015). Recognition of partially occluded objects based on three color spaces (RGB, YCbCr, HSV). *3D Res.* 6, 22. 10.1007/s13319-015-0052-9
- Stace, C.A. (1989). *Plant Taxonomy and Biosystematics* (Cambridge University Press).
- Stevens, P.F. (2001). Angiosperm Phylogeny Website. <https://www.mobot.org/mobot/research/APweb/>
- Suárez, C. (2023). Four million people have taken ayahuasca worldwide. ICEERS. <https://www.iceers.org/four-million-people-have-taken-ayahuasca-worldwide/>
- The Angiosperm Phylogeny Group: Chase, M.W., Christenhusz, M.J.M., Fay, M.F., Byng, J.W., Judd, W.S., Soltis, D.E., Mabberley, D.J., Sennikov, A.N., Soltis, P.S., and Stevens, P.F. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Bot. J. Linn. Soc.* 181, 1–20. 10.1111/boj.12385
- Tupper, K.W. (2009). Ayahuasca healing beyond the Amazon: the globalization of a traditional indigenous entheogenic practice. *Glob. Netw.* 9, 117–136. 10.1111/j.1471-0374.2009.00245.x

- Tupper, K.W. (2008). The globalization of ayahuasca: harm reduction or benefit maximization? *Int. J. Drug Policy* 19, 297–303. 10.1016/j.drugpo.2006.11.001
- Wäldchen, J., and Mäder, P. (2018a). Plant species identification using computer vision techniques: a systematic literature review. *Arch. Comput. Methods Eng.* 25, 507–543. 10.1007/s11831-016-9206-z
- Wäldchen, J., and Mäder, P. (2018b). Machine learning for image-based species identification. *Methods Ecol. Evol.* 9, 2216–2225. 10.1111/2041-210X.13075
- Wang, B., Mezlini, A.M., Demir, F., Fiume, M., Tu, Z., Brudno, M., Haibe-Kains, B., and Goldenberg, A. (2014). Similarity network fusion for aggregating data types on a genomic scale. *Nat. Methods* 11, 333–337. 10.1038/nmeth.2810
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (Springer International Publishing). 10.1007/978-3-319-24277-4
- Yuan, M., Xin, Z., Liao, G., Huang, P., and Li, Y. (2024). Change detection in SAR images based on weighted difference image generation and optimized random forest. *IET Image Process.* 18, 2754–2773. 10.1049/ipr2.13133

Supplementary Material 1

Table 1. Description, provenance, and folk classification of cultivated and native *B. caapi* and related liana specimens used for ayahuasca brew preparation.

Folk type / Taxa	Voucher	State	City	Origin	Number of Photos	Informations
<i>Arara</i>	Santos 86	RJ	Petrópolis	Cultivado	34	Liana, plant with thick and elongated leaves, prominently yellow main vein; yellow and very bitter brew. Atlantic Forest.
<i>Cabi</i>	Santos 85	RJ	Petrópolis	Cultivado	60	Liana, plant with very closely spaced cylindrical nodes, becoming more distant toward the apex; thick, somewhat rounded leaves with numerous veins; thick bark and orange inner bark.
<i>Cabi</i>	Oliveira 3682	PA	Santa Izabel	Nativo		Liana without visible nodes. Gigantic individual, weighing over 500 kg, with extensive rooting at the nodes that touch the ground. Grows in flat, sandy soil. Occurs in secondary upland Amazonian forest, forming a population with many individuals, locally referred to in Santo Daime religious terminology as a “Reinado”.

<i>Cabi</i>	Oliveira 3697A	PA	Colares	Cultivado	Liana with visible nodes. Woody, twining liana with swollen nodes. Cultivated in home gardens as protection against the “evil eye” in a region of former quilombo communities.
<i>Cabi</i>	Oliveira 3697B	PA	Colares	Cultivado	Liana with nodes. Woody, twining liana with swollen nodes. Cultivated in home gardens for protection against the “evil eye” in a region of former quilombo communities.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3699	PA	Concórdia do Pará	Cultivado	Woody liana with swollen nodes. Cultivated for protection against the “evil eye” and for medicinal use.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3702	PA	Concórdia do Pará	Nativo	Woody liana with swollen nodes. Cultivated for protection against the “evil eye” and for medicinal use.
<i>Caupuri</i>	Santos 63	GO	Alto Paraíso	Cultivado	Liana with nodes, green leaves with yellow veins, pink flowers when young and white when mature, with fruits.
<i>Caupuri</i>	Santos 87	RJ	Petrópolis	Cultivado	Liana, plant similar to Cabi Rosário, with thick, somewhat rounded leaves with numerous veins, thick bark and orange inner bark, but without nodes.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3448	GO	Cavalcante	Cultivado	Twining, woody liana with swollen nodes and long internodes, that is, with fewer swollen nodes.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3449	GO	Cavalcante	Cultivado	Twining, woody liana with swollen nodes and typically short internodes, that is, globose and closely spaced nodes.

<i>Caupuri</i>	Oliveira 3651	DF	Sobradinho	Cultivado		Twining liana cultivated for ayahuasca brew production. Single individual without flowers. Stem with swollen nodes.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3783	GO	Alto Paraíso	Cultivado		The informant has regular contact with the Huni Kuin. According to him, this plant is known by these Indigenous people as "Tucu Huni." He mentions that not all shamans like to use this type of liana because it causes intense cleansing. Among Brazilian religious groups, it is known as Caupuri.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3794	GO	Alto Paraíso	Cultivado		Woody, gigantic, twining liana with swollen nodes. Roots at the nodes when in contact with the soil. Used in the production of ayahuasca brew. The plant has been cultivated for 35 years.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3799	GO	Alto Paraíso	Cultivado		Woody, twining liana with swollen nodes. Used in the production of ayahuasca brew.
<i>Caupuri</i>	Oliveira 3890	DF	Sobradinho	Cultivado		Woody, twining liana cultivated for the production of ayahuasca brew.
<i>Caupuri-de-nós-longos (Spruce)</i>	Santos 78	RJ	Petrópolis	Cultivado	62	Liana with elongated, oval nodes that may become more rounded with age.
<i>D. cabrerana</i>	Santos 82	RJ	Petrópolis	Cultivado		Commonly known as Chaliponga. Atlantic Forest environment. Liana.
<i>D. cabrerana</i>	Oliveira 3791	GO	Alto Paraíso	Cultivado	32	According to the informant, the plant is used in the production of ayahuasca brew in Peru. Woody, twining liana. Cultivated in a rupestrian grassland area.

<i>Hybrid</i>	Oliveira 3432	GO	São Gabriel	Híbrido	36	Caupuri x Tucunaca. Cultivated woody climber, likely a hybrid liana, with slightly evident or often absent swollen nodes. It is believed to have emerged spontaneously among plants with both swollen and non-swollen stem nodes.
<i>Hybrid</i>	Oliveira 3552	DF	Gama	Híbrido		Tucunaca x Caupuri. Cultivated woody liana. Stem without swollen nodes, “smooth”. No provenance data for the seedling. Plants appear to have grown spontaneously from seeds dispersed by cultivated parent plants in the area.
<i>Hybrid</i>	Oliveira 3623	DF	Planaltina	Híbrido		The plant shows characteristics of a spontaneous hybrid between Caupuri and Tucunaca.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3395	AC	Rio Branco	Nativo	126	Ourinho/Peixe. Twining, right-handed (dextral), woody liana with yellow inner bark, cultivated for the production of ayahuasca brew.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3446	GO	Cavalcante	Cultivado		Yellow inner bark. The informant is uncertain about the identification. Liana used in the preparation of Daime.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3501	AC	Capixaba	Cultivado		Twining liana used in the preparation of ayahuasca brew. Light pink and white flowers with glands on the sepals.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3619	DF	Planaltina	Cultivado		Twining liana cultivated for the preparation of ayahuasca brew. Stem with non-swollen nodes.

<i>Ourinho</i>	Oliveira 3620	DF	Planaltina	Cultivado		Ourinho. Twining liana cultivated for the preparation of ayahuasca brew. Stem with non-swollen nodes.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3621	DF	Planaltina	Cultivado		Twining liana cultivated for the preparation of ayahuasca brew. Stem with non-swollen nodes.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3643	DF	Brasília	Cultivado		Woody liana cultivated for the preparation of ayahuasca (Daime) brew. The seedling originates from the Juruá region (Acre). It produces a golden-yellow sap when the stem is cut. According to the informant, the resulting brew has a stronger effect than usual.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3669	TO	Palmas	Cultivado		Cultivated at the informant's residence, located 15 km from the junction to Aparecida do Rio Negro. Twining liana used in the preparation of ayahuasca brew.
<i>Ourinho</i>	Oliveira 3711	PA	Belém	Cultivado		Woody, twining liana cultivated for producing Santo Daime brew. Stem forms a "braid", with yellowish inner bark
<i>Pajezinho</i>	Oliveira 3658	DF	Paranoá	Cultivado	50	Plant frequently visited by carpenter bees, likely pollinators. Long, greenish fruits. Differs from other <i>B. caapi</i> types by its pale flowers, which are white and sometimes yellowish. Plant used in the production of ayahuasca brew.

<i>Pajezinho</i>	Oliveira 3660	DF	Sobradinho	Cultivado		Woody liana, slightly sinuous and almost shrubby, cultivated for the production of ayahuasca brew. Flowers range from light pink to beige, nearly yellow; stem with beige inner bark. Nodes are not swollen.
<i>Quebrador</i>	Behrens 25	DF	Planaltina	Cultivado		Fraternidade Jardim de Maria. Plant cultivated in the understory, on flat terrain with clayey soil. Plant with immature green fruits and pink-colored flowers.
<i>Quebrador</i>	Behrens 27	DF	Planaltina	Cultivado	32	Fraternidade Jardim de Maria. Plant cultivated in the understory, on flat terrain with clayey substrate.
<i>Quebrador</i>	Oliveira 3672	TO	Palmas	Cultivado		The presence of fungi on the leaves is a characteristic observed by the informant when identifying this liana type. The seedling originates from Belém. The plant resembles a “tree” rather than a liana. The brew produced from this plant is very clear and strong.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3674	PA	Santa Izabel	Cultivado	160	The man who cultivates the plant has no specific knowledge about it but observed that the stem is “brittle.” The plant has yellow inner bark that darkens due to oxidation. Nodes are not swollen.

<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3691	PA	Colares	Nativo	Smooth stem. Woody, twining liana with no visible nodes. Only resprouting branches were collected, as the foliage remains in the canopy. Forms a population with at least six individuals, corresponding to the same population recorded by Oliveira & Xavier 3687. The inner bark has a greenish coloration. The plant was formerly cultivated by quilombola communities for medicinal purposes and protection against the “evil eye.”
<i>Tucunaca</i>	Behrens 24	DF	Planaltina	Cultivado	Plant with immature green fruits and white and pink flowers, in which the white ones have a pink nectar guide on one of the petals. Young leaves have glands at the base of the abaxial surface.
<i>Tucunaca</i>	Santos 64	GO	Alto Paraíso	Cultivado	Liana without nodes, with flower buds.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3490	GO	Alto Paraíso	Cultivado	Twining, woody liana with non-swollen stems, used in the preparation of ayahuasca brew. Flowers with white and pink petals.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3518	MG	Aiuruoca	Cultivado	Woody liana cultivated for the production of ayahuasca (Daime) brew. Stem without swollen nodes, “smooth”. No provenance data for the seedling.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3520	MG	Aiuruoca	Cultivado	Woody liana cultivated for the production of ayahuasca (Daime) brew. Stem without swollen nodes, “smooth”. No provenance data for the seedling.

<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3550	DF	Gama	Cultivado	Woody liana cultivated for the production of ayahuasca (Daime) brew. Stem without swollen nodes, “smooth”. No provenance data for the seedling.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3664	DF	Paranoá	Cultivado	Twining, woody liana used in the production of ayahuasca brew. Smooth stem. Pink and white flowers with yellow anthers.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3710	PA	Belém	Cultivado	Woody, twining liana cultivated for producing Santo Daime brew. Nodes are not swollen.
<i>Tucunaca</i>	Oliveira 3797	GO	Alto Paraíso	Cultivado	Woody, twining liana without swollen nodes. Used in the production of ayahuasca brew.

Supplementary Material 2

Individual performance of the algorithms and F-measure metric.

LEAF ADAXIAL SURFACE

RESELIB KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	247	64.3229 %
Incorrectly Classified Instances	137	35.6771 %
Kappa statistic	0.5806	
Mean absolute error	0.0943	
Root mean squared error	0.2347	
Relative absolute error	55.1838 %	
Root relative squared error	80.3586 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,840	0,031	0,656	0,840	0,737	0,722	0,968	0,855	pajezinho
	0,663	0,079	0,688	0,663	0,675	0,592	0,851	0,690	tucunaca
	0,476	0,062	0,600	0,476	0,531	0,455	0,794	0,486	ourinho
	0,774	0,020	0,774	0,774	0,774	0,754	0,912	0,620	spruce
	0,567	0,040	0,548	0,567	0,557	0,519	0,838	0,431	cabi
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,936	0,880	cabrerana
	0,636	0,155	0,549	0,636	0,589	0,458	0,795	0,506	caupuri
	0,313	0,016	0,455	0,313	0,370	0,355	0,803	0,375	quebrador
	0,824	0,011	0,778	0,824	0,800	0,791	0,964	0,775	arara
	0,722	0,011	0,765	0,722	0,743	0,731	0,963	0,700	hibrido
Weighted Avg.	0,643	0,071	0,644	0,643	0,640	0,573	0,852	0,598	

=== Confusion Matrix ===

```
a b c d e f g h i j <-- classified as
21 1 1 0 0 0 2 0 0 0 | a = pajezinho
3 53 7 0 2 0 14 1 0 0 | b = tucunaca
4 6 30 3 2 0 17 1 0 0 | c = ourinho
0 0 1 24 4 0 2 0 0 0 | d = spruce
1 4 1 1 17 0 6 0 0 0 | e = cabi
0 0 0 0 0 14 0 0 1 1 | f = cabrerana
2 11 8 2 5 0 56 4 0 0 | g = caupuri
1 2 2 1 1 0 4 5 0 0 | h = quebrador
0 0 0 0 0 0 0 0 14 3 | i = arara
0 0 0 0 0 1 1 0 3 13 | j = hibrido
```

LOCAL KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	241	62.7604 %
Incorrectly Classified Instances	143	37.2396 %
Kappa statistic	0.5597	
Mean absolute error	0.0978	
Root mean squared error	0.2301	
Relative absolute error	57.2612 %	
Root relative squared error	78.7909 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,840	0,031	0,656	0,840	0,737	0,722	0,951	0,859	pajezinho
	0,713	0,095	0,663	0,713	0,687	0,601	0,876	0,739	tucunaca

0,444	0,044	0,667	0,444	0,533	0,476	0,794	0,565	ourinho
0,710	0,023	0,733	0,710	0,721	0,697	0,922	0,653	spruce
0,433	0,045	0,448	0,433	0,441	0,394	0,851	0,392	cabi
0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,967	0,918	cabrerana
0,636	0,182	0,509	0,636	0,566	0,422	0,803	0,556	caupuri
0,313	0,005	0,714	0,313	0,435	0,459	0,803	0,460	quebrador
0,765	0,008	0,813	0,765	0,788	0,779	0,965	0,877	arara
0,667	0,014	0,706	0,667	0,686	0,671	0,988	0,732	hibrido
Weighted Avg.	0,628	0,078	0,639	0,628	0,624	0,557	0,862	0,644

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
21 1 1 0 1 0 1 0 0 0 | a = pajezinho
2 57 1 0 1 0 18 1 0 0 | b = tucunaca
4 9 28 3 3 0 16 0 0 0 | c = ourinho
0 2 0 22 4 0 3 0 0 0 | d = spruce
2 2 2 1 13 0 10 0 0 0 | e = cabi
0 0 0 0 0 14 0 0 1 1 | f = cabrerana
2 11 8 3 7 0 56 1 0 0 | g = caupuri
1 3 2 1 0 0 4 5 0 0 | h = quebrador
0 0 0 0 0 0 0 0 13 4 | i = arara
0 1 0 0 0 1 2 0 2 12 | j = hibrido

```

OPTIMEZED FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	236	61.4583 %
Incorrectly Classified Instances	148	38.5417 %
Kappa statistic	0.541	
Mean absolute error	0.1216	
Root mean squared error	0.2339	
Relative absolute error	71.208 %	
Root relative squared error	80.0769 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,800	0,019	0,741	0,800	0,769	0,753	0,980	0,873	pajezinho
	0,725	0,115	0,624	0,725	0,671	0,578	0,878	0,770	tucunaca
	0,492	0,065	0,596	0,492	0,539	0,462	0,837	0,586	ourinho
	0,581	0,025	0,667	0,581	0,621	0,592	0,919	0,709	spruce
	0,233	0,020	0,500	0,233	0,318	0,306	0,896	0,471	cabi
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,985	0,915	cabrerana
	0,625	0,199	0,482	0,625	0,545	0,392	0,827	0,546	caupuri
	0,313	0,003	0,833	0,313	0,455	0,499	0,865	0,487	quebrador
	0,824	0,008	0,824	0,824	0,824	0,815	0,990	0,895	arara
	0,778	0,014	0,737	0,778	0,757	0,745	0,987	0,652	hibrido
Weighted Avg.	0,615	0,086	0,624	0,615	0,606	0,536	0,885	0,661	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
20 1 2 0 0 0 2 0 0 0 | a = pajezinho
0 58 4 1 0 0 16 0 0 1 | b = tucunaca
3 8 31 4 2 0 15 0 0 0 | c = ourinho
0 2 0 18 2 0 8 1 0 0 | d = spruce
2 5 0 1 7 0 15 0 0 0 | e = cabi
0 0 0 0 0 14 0 0 1 1 | f = cabrerana
1 13 14 3 2 0 55 0 0 0 | g = caupuri
1 5 1 0 1 0 3 5 0 0 | h = quebrador
0 0 0 0 0 0 0 0 14 3 | i = arara

```

0 1 0 0 0 1 0 0 2 14 | j = hibrido

RANDOM FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	240	62.5 %
Incorrectly Classified Instances	144	37.5 %
Kappa statistic	0.5527	
Mean absolute error	0.1216	
Root mean squared error	0.2336	
Relative absolute error	71.1902 %	
Root relative squared error	79.9942 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,800	0,017	0,769	0,800	0,784	0,769	0,977	0,862	pajezinho
	0,725	0,109	0,637	0,725	0,678	0,589	0,881	0,778	tucunaca
	0,492	0,069	0,585	0,492	0,534	0,455	0,838	0,586	ourinho
	0,613	0,020	0,731	0,613	0,667	0,643	0,921	0,711	spruce
	0,267	0,017	0,571	0,267	0,364	0,358	0,897	0,442	cabi
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,983	0,909	cabrerana
	0,659	0,203	0,492	0,659	0,563	0,416	0,827	0,546	caupuri
	0,313	0,003	0,833	0,313	0,455	0,499	0,861	0,469	quebrador
	0,882	0,014	0,750	0,882	0,811	0,804	0,991	0,892	arara
	0,667	0,008	0,800	0,667	0,727	0,718	0,986	0,640	hibrido
Weighted Avg.	0,625	0,086	0,639	0,625	0,618	0,550	0,885	0,658	

=== Confusion Matrix ===

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	<-- classified as
20	2	2	0	0	0	1	0	0	0	a = pajezinho
0	58	4	1	0	0	17	0	0	0	b = tucunaca
3	7	31	2	1	0	18	1	0	0	c = ourinho
0	2	0	19	2	0	8	0	0	0	d = spruce
2	6	0	1	8	0	13	0	0	0	e = cabi
0	0	0	0	0	14	0	0	1	1	f = cabrerana
1	10	14	3	2	0	58	0	0	0	g = caupuri
0	5	2	0	1	0	3	5	0	0	h = quebrador
0	0	0	0	0	0	0	0	15	2	i = arara
0	1	0	0	0	1	0	0	4	12	j = hibrido

SVM

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	241	62.7604 %
Incorrectly Classified Instances	143	37.2396 %
Kappa statistic	0.5632	
Mean absolute error	0.1636	
Root mean squared error	0.2785	
Relative absolute error	95.7645 %	
Root relative squared error	95.3593 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,840	0,022	0,724	0,840	0,778	0,763	0,980	0,755	pajezinho
	0,600	0,112	0,585	0,600	0,593	0,484	0,840	0,519	tucunaca
	0,571	0,084	0,571	0,571	0,571	0,487	0,853	0,476	ourinho
	0,710	0,025	0,710	0,710	0,710	0,684	0,875	0,610	spruce

0,500	0,040	0,517	0,500	0,508	0,468	0,795	0,368	cabi
0,875	0,005	0,875	0,875	0,875	0,870	0,989	0,853	cabrerana
0,557	0,125	0,570	0,557	0,563	0,435	0,795	0,469	caupuri
0,250	0,019	0,364	0,250	0,296	0,277	0,787	0,208	quebrador
0,941	0,003	0,941	0,941	0,941	0,938	0,993	0,904	arara
0,889	0,011	0,800	0,889	0,842	0,835	0,992	0,796	hibrido
Weighted Avg.	0,628	0,074	0,622	0,628	0,624	0,550	0,858	0,542

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
21 2 1 0 1 0 0 0 0 0 | a = pajezinho
4 48 6 1 3 0 15 3 0 0 | b = tucunaca
3 5 36 2 3 0 13 0 0 1 | c = ourinho
0 2 0 22 2 0 4 1 0 0 | d = spruce
1 5 3 1 15 0 3 2 0 0 | e = cabi
0 0 0 0 0 14 0 0 0 2 | f = cabrerana
0 16 13 5 4 0 49 1 0 0 | g = caupuri
0 4 4 0 1 1 2 4 0 0 | h = quebrador
0 0 0 0 0 0 0 0 16 1 | i = arara
0 0 0 0 0 1 0 0 1 16 | j = hibrido

```

DL4j

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	231	60.1563 %
Incorrectly Classified Instances	153	39.8438 %
Kappa statistic	0.5335	
Mean absolute error	0.1001	
Root mean squared error	0.2348	
Relative absolute error	58.6105 %	
Root relative squared error	80.4023 %	
Total Number of Instances	384	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
0,760	0,033	0,613	0,760	0,679	0,658	0,961	0,806		pajezinho
0,613	0,095	0,628	0,613	0,620	0,522	0,870	0,676		tucunaca
0,508	0,072	0,582	0,508	0,542	0,461	0,827	0,554		ourinho
0,677	0,025	0,700	0,677	0,689	0,662	0,907	0,703		spruce
0,467	0,048	0,452	0,467	0,459	0,412	0,860	0,402		cabi
0,813	0,003	0,929	0,813	0,867	0,863	0,993	0,927		cabrerana
0,500	0,159	0,484	0,500	0,492	0,337	0,793	0,496		caupuri
0,500	0,014	0,615	0,500	0,552	0,537	0,918	0,506		quebrador
0,824	0,005	0,875	0,824	0,848	0,842	0,991	0,894		arara
0,944	0,022	0,680	0,944	0,791	0,790	0,990	0,794		hibrido
Weighted Avg.	0,602	0,078	0,604	0,602	0,600	0,523	0,872	0,622	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
19 3 1 0 0 0 1 1 0 0 | a = pajezinho
6 49 5 1 2 0 14 1 0 2 | b = tucunaca
3 4 32 3 3 0 17 1 0 0 | c = ourinho
0 0 0 21 3 0 5 2 0 0 | d = spruce
1 4 2 1 14 0 8 0 0 0 | e = cabi
0 0 0 0 0 13 0 0 0 3 | f = cabrerana
1 18 12 4 8 0 44 0 1 0 | g = caupuri
1 0 3 0 1 1 2 8 0 0 | h = quebrador
0 0 0 0 0 0 0 0 14 3 | i = arara
1. 0 0 0 0 0 0 0 0 1 17 | j = hibrido

```

LEAF ABAXIAL SURFACE

LOCAL KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	250	65.2742 %
Incorrectly Classified Instances	133	34.7258 %
Kappa statistic	0.5897	
Mean absolute error	0.0835	
Root mean squared error	0.2254	
Relative absolute error	48.8935 %	
Root relative squared error	77.1914 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,722	0,014	0,722	0,722	0,722	0,709	0,963	0,731	hibrido
	0,720	0,008	0,857	0,720	0,783	0,772	0,912	0,761	pajezinho
	0,675	0,063	0,740	0,675	0,706	0,634	0,873	0,726	tucunaca
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,936	0,876	cabrerana
	0,433	0,025	0,591	0,433	0,500	0,471	0,858	0,524	cabi
	0,571	0,100	0,529	0,571	0,550	0,457	0,824	0,559	ourinho
	0,733	0,025	0,710	0,733	0,721	0,697	0,913	0,763	spruce
	0,313	0,019	0,417	0,313	0,357	0,337	0,713	0,311	quebrador
	0,882	0,008	0,833	0,882	0,857	0,851	0,967	0,843	arara
	0,682	0,153	0,571	0,682	0,622	0,499	0,853	0,603	caupuri
Weighted Avg.	0,653	0,071	0,658	0,653	0,652	0,587	0,869	0,654	

=== Confusion Matrix ===

```
a b c d e f g h i j <-- classified as
13 0 1 1 0 0 0 0 3 0 | a = hibrido
0 18 2 0 1 3 0 0 0 1 | b = pajezinho
1 0 54 0 0 10 1 2 0 12 | c = tucunaca
2 0 0 14 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 1 3 0 13 6 1 0 0 6 | e = cabi
0 2 4 0 3 36 1 1 0 16 | f = ourinho
0 0 1 0 1 1 22 0 0 5 | g = spruce
0 0 3 0 0 3 0 5 0 5 | h = quebrador
2 0 0 0 0 0 0 0 15 0 | i = arara
0 0 5 0 4 9 6 4 0 60 | j = caupuri
```

RESELIB KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	250	65.2742 %
Incorrectly Classified Instances	133	34.7258 %
Kappa statistic	0.5875	
Mean absolute error	0.0808	
Root mean squared error	0.2321	
Relative absolute error	47.3126 %	
Root relative squared error	79.497 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,722	0,011	0,765	0,722	0,743	0,731	0,938	0,699	hibrido
	0,520	0,011	0,765	0,520	0,619	0,610	0,845	0,616	pajezinho
	0,738	0,092	0,678	0,738	0,707	0,626	0,881	0,720	tucunaca
	0,875	0,000	1,000	0,875	0,933	0,933	0,937	0,880	cabrerana

0,400	0,031	0,522	0,400	0,453	0,417	0,808	0,458	cabi
0,571	0,078	0,590	0,571	0,581	0,500	0,828	0,517	ourinho
0,700	0,020	0,750	0,700	0,724	0,702	0,898	0,625	spruce
0,313	0,011	0,556	0,313	0,400	0,398	0,666	0,362	quebrador
0,941	0,011	0,800	0,941	0,865	0,861	0,966	0,802	arara
0,693	0,156	0,570	0,693	0,626	0,504	0,817	0,561	caupuri
Weighted Avg.	0,653	0,074	0,656	0,653	0,648	0,584	0,851	0,610

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
13 0 1 0 0 0 0 0 4 0 | a = hibrido
0 13 2 0 1 5 0 0 0 4 | b = pajezinho
1 0 59 0 0 4 1 2 0 13 | c = tucunaca
2 0 0 14 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 2 4 0 12 4 2 0 0 6 | e = cabi
0 0 6 0 2 36 1 2 0 16 | f = ourinho
0 0 3 0 3 0 21 0 0 3 | g = spruce
0 0 3 0 0 4 0 5 0 4 | h = quebrador
1 0 0 0 0 0 0 0 16 0 | i = arara
0 2 9 0 5 8 3 0 0 61 | j = caupuri

```

OPTIMEZED FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	245	63.9687 %
Incorrectly Classified Instances	138	36.0313 %
Kappa statistic	0.5688	
Mean absolute error	0.1192	
Root mean squared error	0.23	
Relative absolute error	69.8089 %	
Root relative squared error	78.7837 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,667	0,011	0,750	0,667	0,706	0,694	0,989	0,723	hibrido
	0,560	0,011	0,778	0,560	0,651	0,641	0,980	0,827	pajezinho
	0,738	0,106	0,648	0,738	0,690	0,604	0,905	0,785	tucunaca
	0,875	0,008	0,824	0,875	0,848	0,842	0,982	0,915	cabrerana
	0,333	0,011	0,714	0,333	0,455	0,461	0,890	0,506	cabi
	0,508	0,078	0,561	0,508	0,533	0,448	0,847	0,607	ourinho
	0,600	0,023	0,692	0,600	0,643	0,617	0,940	0,740	spruce
	0,313	0,000	1,000	0,313	0,476	0,551	0,802	0,472	quebrador
	0,824	0,011	0,778	0,824	0,800	0,791	0,957	0,886	arara
	0,761	0,183	0,554	0,761	0,641	0,523	0,864	0,627	caupuri
Weighted Avg.	0,640	0,082	0,662	0,640	0,632	0,572	0,898	0,691	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
12 0 0 2 0 0 0 0 4 0 | a = hibrido
0 14 4 0 1 4 0 0 0 2 | b = pajezinho
0 1 59 0 1 6 1 0 0 12 | c = tucunaca
2 0 0 14 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 1 5 0 10 2 1 0 0 11 | e = cabi
0 1 9 0 1 32 3 0 0 17 | f = ourinho
0 0 3 0 0 3 18 0 0 6 | g = spruce
0 0 3 0 0 2 0 5 0 6 | h = quebrador
2 0 0 1 0 0 0 0 14 0 | i = arara
0 1 8 0 1 8 3 0 0 67 | j = caupuri

```

RANDOM FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	242	63.1854 %
Incorrectly Classified Instances	141	36.8146 %
Kappa statistic	0.5595	
Mean absolute error	0.1192	
Root mean squared error	0.2298	
Relative absolute error	69.8299 %	
Root relative squared error	78.6997 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,667	0,011	0,750	0,667	0,706	0,694	0,988	0,714	hibrido
	0,560	0,011	0,778	0,560	0,651	0,641	0,980	0,825	pajezinho
	0,725	0,106	0,644	0,725	0,682	0,594	0,905	0,783	tucunaca
	0,875	0,005	0,875	0,875	0,875	0,870	0,983	0,912	cabrerana
	0,333	0,008	0,769	0,333	0,465	0,482	0,899	0,539	cabi
	0,492	0,084	0,534	0,492	0,512	0,422	0,851	0,608	ourinho
	0,600	0,025	0,667	0,600	0,632	0,603	0,939	0,741	spruce
	0,313	0,000	1,000	0,313	0,476	0,551	0,787	0,463	quebrador
	0,824	0,014	0,737	0,824	0,778	0,768	0,956	0,896	arara
	0,750	0,186	0,545	0,750	0,632	0,510	0,866	0,644	caupuri
Weighted Avg.	0,632	0,084	0,657	0,632	0,624	0,563	0,899	0,696	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
12 0 0 1 0 0 0 0 5 0 | a = hibrido
0 14 4 0 0 4 0 0 0 3 | b = pajezinho
0 1 58 0 1 8 1 0 0 11 | c = tucunaca
2 0 0 14 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 1 5 0 10 2 1 0 0 11 | e = cabi
0 1 8 0 1 31 4 0 0 18 | f = ourinho
0 0 3 0 0 3 18 0 0 6 | g = spruce
0 0 3 0 0 2 0 5 0 6 | h = quebrador
2 0 0 1 0 0 0 0 14 0 | i = arara
0 1 9 0 1 8 3 0 0 66 | j = caupuri

```

SVM

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	241	62.9243 %
Incorrectly Classified Instances	142	37.0757 %
Kappa statistic	0.5616	
Mean absolute error	0.1635	
Root mean squared error	0.2784	
Relative absolute error	95.7746 %	
Root relative squared error	95.3525 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,944	0,011	0,810	0,944	0,872	0,868	0,993	0,790	hibrido
	0,640	0,020	0,696	0,640	0,667	0,645	0,972	0,665	pajezinho
	0,725	0,089	0,682	0,725	0,703	0,622	0,860	0,606	tucunaca
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,983	0,903	cabrerana
	0,367	0,048	0,393	0,367	0,379	0,329	0,850	0,283	cabi
	0,524	0,103	0,500	0,524	0,512	0,413	0,799	0,404	ourinho
	0,600	0,014	0,783	0,600	0,679	0,663	0,909	0,597	spruce

0,250	0,014	0,444	0,250	0,320	0,312	0,730	0,178	quebrador
0,882	0,003	0,938	0,882	0,909	0,905	0,949	0,855	arara
0,625	0,142	0,567	0,625	0,595	0,467	0,837	0,508	caupuri
Weighted Avg.	0,629	0,076	0,630	0,629	0,626	0,556	0,865	0,542

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
17 0 0 0 0 0 0 0 1 0 | a = hibrido
0 16 2 0 0 5 0 1 0 1 | b = pajezinho
0 1 58 0 2 6 0 1 0 12 | c = tucunaca
2 0 0 14 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 2 6 0 11 2 1 1 0 7 | e = cabi
0 2 7 0 5 33 1 1 0 14 | f = ourinho
0 0 2 0 3 2 18 0 0 5 | g = spruce
0 0 4 1 1 3 0 4 0 3 | h = quebrador
2 0 0 0 0 0 0 0 15 0 | i = arara
0 2 6 0 6 15 3 1 0 55 | j = caupuri

```

DL4j

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	236	61.6188 %
Incorrectly Classified Instances	147	38.3812 %
Kappa statistic	0.5486	
Mean absolute error	0.0967	
Root mean squared error	0.2302	
Relative absolute error	56.638 %	
Root relative squared error	78.8426 %	
Total Number of Instances	383	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
0,944	0,016	0,739	0,944	0,829	0,827	0,986	0,803	hibrido	
0,840	0,022	0,724	0,840	0,778	0,763	0,977	0,804	pajezinho	
0,600	0,086	0,649	0,600	0,623	0,529	0,880	0,716	tucunaca	
0,938	0,011	0,789	0,938	0,857	0,854	0,937	0,926	cabrerana	
0,300	0,048	0,346	0,300	0,321	0,269	0,863	0,354	cabi	
0,476	0,084	0,526	0,476	0,500	0,408	0,843	0,523	ourinho	
0,600	0,028	0,643	0,600	0,621	0,590	0,942	0,747	spruce	
0,250	0,019	0,364	0,250	0,296	0,277	0,789	0,294	quebrador	
0,765	0,003	0,929	0,765	0,839	0,836	0,988	0,887	arara	
0,693	0,139	0,598	0,693	0,642	0,527	0,872	0,661	caupuri	
Weighted Avg.	0,616	0,073	0,608	0,616	0,609	0,539	0,890	0,654	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
17 0 0 0 0 0 0 0 1 0 | a = hibrido
0 21 1 0 0 2 1 0 0 0 | b = pajezinho
0 2 48 2 4 9 2 1 0 12 | c = tucunaca
1 0 0 15 0 0 0 0 0 0 | d = cabrerana
0 2 9 0 9 0 2 2 0 6 | e = cabi
1 3 5 0 3 30 3 3 0 15 | f = ourinho
1 0 0 0 3 1 18 0 0 7 | g = spruce
0 0 6 1 2 2 0 4 0 1 | h = quebrador
3 0 0 1 0 0 0 0 13 0 | i = arara
0 1 5 0 5 13 2 1 0 61 | j = caupuri

```

LEAF COMBINED SURFACES

RESELIB KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	526	68.4896 %
Incorrectly Classified Instances	242	31.5104 %
Kappa statistic	0.6296	
Mean absolute error	0.0756	
Root mean squared error	0.2344	
Relative absolute error	44.2965 %	
Root relative squared error	80.2857 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,619	0,087	0,582	0,619	0,600	0,519	0,806	0,484	ourinho
	0,861	0,007	0,861	0,861	0,861	0,854	0,968	0,808	hibrido
	0,738	0,056	0,776	0,738	0,756	0,695	0,875	0,712	tucunaca
	0,790	0,025	0,731	0,790	0,760	0,738	0,908	0,646	spruce
	0,608	0,133	0,575	0,608	0,591	0,466	0,769	0,481	caupuri
	0,550	0,024	0,660	0,550	0,600	0,572	0,819	0,437	cabi
	0,780	0,022	0,709	0,780	0,743	0,725	0,958	0,721	pajezinho
	0,375	0,015	0,522	0,375	0,436	0,422	0,769	0,300	quebrador
	0,912	0,007	0,861	0,912	0,886	0,881	0,968	0,866	arara
	0,875	0,001	0,966	0,875	0,918	0,916	0,968	0,933	cabreana
Weighted Avg.	0,685	0,063	0,686	0,685	0,684	0,623	0,851	0,599	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
78 0 7 5 25 4 5 2 0 0 | a = ourinho
0 31 0 0 0 0 0 0 4 1 | b = hibrido
9 0 118 1 26 2 3 1 0 0 | c = tucunaca
2 0 1 49 7 2 0 1 0 0 | d = spruce
27 0 15 9 107 9 4 5 0 0 | e = caupuri
5 0 4 2 11 33 3 2 0 0 | f = cabi
5 0 2 0 4 0 39 0 0 0 | g = pajezinho
8 0 4 1 6 0 1 12 0 0 | h = quebrador
0 3 0 0 0 0 0 0 31 0 | i = arara
0 2 1 0 0 0 0 0 1 28 | j = cabreana

```

LOCAL KNN

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	532	69.2708 %
Incorrectly Classified Instances	236	30.7292 %
Kappa statistic	0.6396	
Mean absolute error	0.0682	
Root mean squared error	0.2307	
Relative absolute error	39.9299 %	
Root relative squared error	79.0097 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,611	0,079	0,602	0,611	0,606	0,528	0,817	0,512	ourinho
	0,917	0,010	0,825	0,917	0,868	0,863	0,954	0,776	hibrido
	0,813	0,048	0,818	0,813	0,815	0,767	0,921	0,810	tucunaca
	0,774	0,030	0,696	0,774	0,733	0,709	0,879	0,604	spruce
	0,557	0,128	0,563	0,557	0,560	0,430	0,766	0,484	caupuri
	0,550	0,037	0,559	0,550	0,555	0,517	0,796	0,376	cabi
	0,780	0,014	0,796	0,780	0,788	0,773	0,904	0,730	pajezinho

	0,469	0,018	0,536	0,469	0,500	0,481	0,751	0,299	quebrador
	0,912	0,004	0,912	0,912	0,912	0,908	0,953	0,830	arara
	0,875	0,000	1,000	0,875	0,933	0,933	0,969	0,939	cabreana
Weighted Avg.	0,693	0,060	0,693	0,693	0,692	0,633	0,852	0,614	

=== Confusion Matrix ===

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	<-- classified as
77	0	6	4	27	6	4	2	0	0	a = ourinho
0	33	0	0	0	0	0	0	3	0	b = hibrido
8	0	130	0	17	2	1	2	0	0	c = tucunaca
3	0	2	48	9	0	0	0	0	0	d = spruce
27	0	12	16	98	14	2	7	0	0	e = caupuri
4	0	4	1	14	33	2	2	0	0	f = cabi
2	0	3	0	3	3	39	0	0	0	g = pajezinho
7	0	2	0	6	1	1	15	0	0	h = quebrador
0	3	0	0	0	0	0	0	31	0	i = arara
0	4	0	0	0	0	0	0	0	28	j = cabreana

OPTIMEZED FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	521	67.8385 %
Incorrectly Classified Instances	247	32.1615 %
Kappa statistic	0.6171	
Mean absolute error	0.1093	
Root mean squared error	0.2161	
Relative absolute error	64.036 %	
Root relative squared error	74.0189 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,548	0,065	0,622	0,548	0,582	0,508	0,905	0,673	ourinho
	0,889	0,014	0,762	0,889	0,821	0,814	0,994	0,873	hibrido
	0,756	0,076	0,725	0,756	0,740	0,670	0,938	0,850	tucunaca
	0,661	0,021	0,732	0,661	0,695	0,671	0,934	0,812	spruce
	0,750	0,179	0,555	0,750	0,638	0,519	0,886	0,679	caupuri
	0,417	0,020	0,641	0,417	0,505	0,485	0,940	0,590	cabi
	0,660	0,010	0,825	0,660	0,733	0,722	0,988	0,877	pajezinho
	0,406	0,003	0,867	0,406	0,553	0,583	0,881	0,590	quebrador
	0,794	0,004	0,900	0,794	0,844	0,839	0,996	0,942	arara
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,999	0,973	cabreana
Weighted Avg.	0,678	0,072	0,693	0,678	0,676	0,618	0,929	0,759	

=== Confusion Matrix ===

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	<-- classified as
69	0	11	5	36	4	1	0	0	0	a = ourinho
0	32	0	0	0	0	0	0	3	1	b = hibrido
11	0	121	1	23	2	1	1	0	0	c = tucunaca
3	0	5	41	13	0	0	0	0	0	d = spruce
19	0	11	5	132	6	2	1	0	0	e = caupuri
0	0	8	4	20	25	3	0	0	0	f = cabi
5	0	5	0	5	2	33	0	0	0	g = pajezinho
4	0	6	0	9	0	0	13	0	0	h = quebrador
0	6	0	0	0	0	0	0	27	1	i = arara
0	4	0	0	0	0	0	0	0	28	j = cabreana

RANDOM FOREST

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	519	67.5781 %
Incorrectly Classified Instances	249	32.4219 %
Kappa statistic	0.6143	
Mean absolute error	0.1094	
Root mean squared error	0.216	
Relative absolute error	64.0898 %	
Root relative squared error	73.984 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,548	0,065	0,622	0,548	0,582	0,508	0,904	0,673	ourinho
	0,889	0,012	0,780	0,889	0,831	0,824	0,994	0,862	hibrido
	0,756	0,081	0,712	0,756	0,733	0,661	0,937	0,845	tucunaca
	0,661	0,018	0,759	0,661	0,707	0,685	0,933	0,816	spruce
	0,722	0,179	0,545	0,722	0,621	0,496	0,885	0,679	caupuri
	0,433	0,020	0,650	0,433	0,520	0,499	0,942	0,601	cabi
	0,680	0,011	0,810	0,680	0,739	0,726	0,989	0,878	pajezinho
	0,406	0,004	0,813	0,406	0,542	0,563	0,892	0,585	quebrador
	0,824	0,004	0,903	0,824	0,862	0,856	0,996	0,942	arara
	0,875	0,003	0,933	0,875	0,903	0,900	0,999	0,974	cabreana
Weighted Avg.	0,676	0,073	0,689	0,676	0,674	0,614	0,929	0,759	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
69 0 11 5 36 4 1 0 0 0 | a = ourinho
0 32 0 0 0 0 0 0 3 1 | b = hibrido
11 0 121 1 23 1 2 1 0 0 | c = tucunaca
3 0 5 41 13 0 0 0 0 0 | d = spruce
19 0 14 5 127 7 2 2 0 0 | e = caupuri
1 0 8 2 20 26 3 0 0 0 | f = cabi
4 0 5 0 5 2 34 0 0 0 | g = pajezinho
4 0 6 0 9 0 0 13 0 0 | h = quebrador
0 5 0 0 0 0 0 0 28 1 | i = arara
0 4 0 0 0 0 0 0 0 28 | j = cabreana

```

SVM

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	535	69.6615 %
Incorrectly Classified Instances	233	30.3385 %
Kappa statistic	0.6424	
Mean absolute error	0.1627	
Root mean squared error	0.2769	
Relative absolute error	95.3186 %	
Root relative squared error	94.8188 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,643	0,097	0,566	0,643	0,602	0,520	0,859	0,483	ourinho
	0,972	0,008	0,854	0,972	0,909	0,906	0,997	0,908	hibrido
	0,763	0,079	0,718	0,763	0,739	0,669	0,896	0,652	tucunaca
	0,742	0,020	0,767	0,742	0,754	0,733	0,916	0,673	spruce
	0,631	0,110	0,631	0,631	0,631	0,521	0,837	0,538	caupuri
	0,467	0,032	0,549	0,467	0,505	0,468	0,873	0,386	cabi
	0,840	0,007	0,894	0,840	0,866	0,857	0,992	0,864	pajezinho
	0,344	0,011	0,579	0,344	0,431	0,428	0,769	0,267	quebrador
	0,882	0,001	0,968	0,882	0,923	0,921	0,994	0,903	arara
	0,906	0,001	0,967	0,906	0,935	0,933	0,998	0,929	cabreana

Weighted Avg. 0,697 0,063 0,697 0,697 0,694 0,635 0,890 0,611

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
81 0 7 3 25 6 2 2 0 0 | a = ourinho
0 35 0 0 0 0 0 0 1 0 | b = hibrido
15 0 122 1 16 3 2 1 0 0 | c = tucunaca
4 0 2 46 7 2 0 1 0 0 | d = spruce
27 0 17 7 111 11 0 3 0 0 | e = caupuri
7 0 11 1 11 28 1 1 0 0 | f = cabi
3 0 3 0 1 1 42 0 0 0 | g = pajezinho
6 0 8 2 5 0 0 11 0 0 | h = quebrador
0 3 0 0 0 0 0 0 30 1 | i = arara
0 3 0 0 0 0 0 0 0 29 | j = cabreana

```

DL4j

=== Summary ===

Correctly Classified Instances	495	64.4531 %
Incorrectly Classified Instances	273	35.5469 %
Kappa statistic	0.5827	
Mean absolute error	0.0847	
Root mean squared error	0.216	
Relative absolute error	49.6082 %	
Root relative squared error	73.967 %	
Total Number of Instances	768	

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	Class
	0,492	0,067	0,590	0,492	0,537	0,458	0,883	0,615	ourinho
	0,917	0,011	0,805	0,917	0,857	0,852	0,996	0,868	hibrido
	0,656	0,076	0,695	0,656	0,675	0,593	0,907	0,772	tucunaca
	0,694	0,031	0,662	0,694	0,677	0,648	0,946	0,808	spruce
	0,653	0,142	0,578	0,653	0,613	0,491	0,875	0,658	caupuri
	0,417	0,051	0,410	0,417	0,413	0,363	0,899	0,472	cabi
	0,840	0,022	0,724	0,840	0,778	0,763	0,985	0,916	pajezinho
	0,313	0,016	0,455	0,313	0,370	0,355	0,860	0,446	quebrador
	0,882	0,003	0,938	0,882	0,909	0,905	0,997	0,965	arara
	0,938	0,005	0,882	0,938	0,909	0,905	0,980	0,949	cabreana
Weighted Avg.	0,645	0,069	0,642	0,645	0,641	0,574	0,913	0,716	

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j <-- classified as
62 1 8 5 34 8 6 2 0 0 | a = ourinho
0 33 0 0 0 0 0 0 1 2 | b = hibrido
11 0 105 3 19 11 6 4 0 1 | c = tucunaca
1 0 1 43 10 4 2 1 0 0 | d = spruce
21 1 16 9 115 11 0 2 1 0 | e = caupuri
3 0 11 2 14 25 2 3 0 0 | f = cabi
3 0 2 0 3 0 42 0 0 0 | g = pajezinho
4 0 8 3 4 2 0 10 0 1 | h = quebrador
0 4 0 0 0 0 0 0 30 0 | i = arara
0 2 0 0 0 0 0 0 0 30 | j = cabreana

```

RESULTS ANOVA AND TUKEY

ANOVA - Leaf adaxial surface

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Algoritmo	5	0.0067	0.001334	0.044	0.999
Residuals	54	1.6445	0.030454		

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = F_Measure ~ Algoritmo, data = data_cima)

\$Algoritmo

	diff	lwr	upr	p adj
Local KNN-DL4J	0.0004	-0.2301791	0.2309791	1.0000000
Optimized Forest-DL4J	-0.0088	-0.2393791	0.2217791	0.9999973
Random Forest-DL4J	-0.0007	-0.2312791	0.2298791	1.0000000
Reselib KNN-DL4J	0.0195	-0.2110791	0.2500791	0.9998595
SVM-DL4J	0.0187	-0.2118791	0.2492791	0.9998857
Optimized Forest-Local KNN	-0.0092	-0.2397791	0.2213791	0.9999966
Random Forest-Local KNN	-0.0011	-0.2316791	0.2294791	1.0000000
Reselib KNN-Local KNN	0.0191	-0.2114791	0.2496791	0.9998731
SVM-Local KNN	0.0183	-0.2122791	0.2488791	0.9998973
Random Forest-Optimized Forest	0.0081	-0.2224791	0.2386791	0.9999982
Reselib KNN-Optimized Forest	0.0283	-0.2022791	0.2588791	0.9991322
SVM-Optimized Forest	0.0275	-0.2030791	0.2580791	0.9992448
Reselib KNN-Random Forest	0.0202	-0.2103791	0.2507791	0.9998329
SVM-Random Forest	0.0194	-0.2111791	0.2499791	0.9998630
SVM-Reselib KNN	-0.0008	-0.2313791	0.2297791	1.0000000

ANOVA - Leaf abaxial surface

Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)

Algoritmo 5 0.0122 0.002431 0.083 0.995

Residuals 54 1.5734 0.029138

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = F_Measure ~ Algoritmo, data = data_baixo)

\$Algoritmo

	diff	lwr	upr	p adj
Local KNN-DL4J	0.0415	-0.1840401	0.2670401	0.9940381
Optimized Forest-DL4J	0.0137	-0.2118401	0.2392401	0.9999726
Random Forest-DL4J	0.0103	-0.2152401	0.2358401	0.9999934
Reselib KNN-DL4J	0.0345	-0.1910401	0.2600401	0.9975013
SVM-DL4J	0.0233	-0.2022401	0.2488401	0.9996248
Optimized Forest-Local KNN	-0.0278	-0.2533401	0.1977401	0.9991140
Random Forest-Local KNN	-0.0312	-0.2567401	0.1943401	0.9984546
Reselib KNN-Local KNN	-0.0070	-0.2325401	0.2185401	0.9999990
SVM-Local KNN	-0.0182	-0.2437401	0.2073401	0.9998885
Random Forest-Optimized Forest	-0.0034	-0.2289401	0.2221401	1.0000000
Reselib KNN-Optimized Forest	0.0208	-0.2047401	0.2463401	0.9997848
SVM-Optimized Forest	0.0096	-0.2159401	0.2351401	0.9999953
Reselib KNN-Random Forest	0.0242	-0.2013401	0.2497401	0.9995485
SVM-Random Forest	0.0130	-0.2125401	0.2385401	0.9999789
SVM-Reselib KNN	-0.0112	-0.2367401	0.2143401	0.9999899

ANOVA - Leaf combined surfaces

Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)

Algoritmo 5 0.0068 0.001356 0.054 0.998

Residuals 54 1.3652 0.025282

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = F_Measure ~ Algoritmo, data = data_todo)

\$Algoritmo

	diff	lwr	upr	p adj
Local KNN-DL4J	0.0069	-0.2031898	0.2169898	0.9999987
Optimized Forest-DL4J	-0.0187	-0.2287898	0.1913898	0.9998193
Random Forest-DL4J	-0.0161	-0.2261898	0.1939898	0.9999136
Reselib KNN-DL4J	-0.0050	-0.2150898	0.2050898	0.9999997
SVM-DL4J	0.0094	-0.2006898	0.2194898	0.9999940

Optimized Forest-Local KNN	-0.0256	-0.2356898	0.1844898	0.9991619
Random Forest-Local KNN	-0.0230	-0.2330898	0.1870898	0.9995020
Reselib KNN-Local KNN	-0.0119	-0.2219898	0.1981898	0.9999807
SVM-Local KNN	0.0025	-0.2075898	0.2125898	1.0000000
Random Forest-Optimized Forest	0.0026	-0.2074898	0.2126898	1.0000000
Reselib KNN-Optimized Forest	0.0137	-0.1963898	0.2237898	0.9999611
SVM-Optimized Forest	0.0281	-0.1819898	0.2381898	0.9986857
Reselib KNN-Random Forest	0.0111	-0.1989898	0.2211898	0.9999863
SVM-Random Forest	0.0255	-0.1845898	0.2355898	0.9991777
SVM-Reselib KNN	0.0144	-0.1956898	0.2244898	0.9999502

ANOVA - Comparing leaf surfaces

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tipo	2	0.162	0.08122	3.119	0.0466 *
Residuals	177	4.609	0.02604		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
> print(TukeyHSD(anova_grupo))
```

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = F_Measure ~ Tipo, data = dados_grupos)

\$Tipo

	diff	lwr	upr	p adj
Leaf adaxial surface-Leaf abaxial surface	0.00270000	-0.066933938	0.07233394	0.9953802
Leaf combined surfaces-Leaf abaxial surface	0.06503333	-0.004600605	0.13466727	0.0726718
Leaf combined surfaces-Leaf adaxial surface	0.06233333	-0.007300605	0.13196727	0.0895292

7. CAPÍTULO III

Artigo em preparação para submissão à revista Revista Flora, ISSN versão online:

1618-0585

Distinção de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi* e espécies de Malpighiaceae relacionadas à Ayahuasca por morfoanatomia das folhas

Resumo

Diversas espécies de Malpighiaceae estão associadas ao uso tradicional da Ayahuasca, a principal delas *Banisteriopsis caapi*, liana amplamente utilizada por povos indígenas amazônicos e por comunidades ayahuasqueiras. Em *B. caapi*, as comunidades reconhecem diferentes “tipos” de cipó, denominados etnotaxa, tradicionalmente diferenciados principalmente por características morfológicas do caule e por atributos associados à bebida produzida. Apesar desse reconhecimento cultural, são de grande importância estudos que investiguem a diversidade morfoanatômica desses etnotaxa e sua relação com outras espécies de Malpighiaceae utilizadas em contextos rituais. Neste estudo, avaliou-se a diversidade morfoanatômica foliar de oito etnotaxa de *B. caapi* e das espécies relacionadas *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *Diplopterys pubipetala*. Foram analisados caracteres de macromorfologia, micromorfologia e anatomia do pecíolo e da lâmina foliar, complementados por análises estatísticas multivariadas baseadas em matriz binária de caracteres morfoanatômicos. No contexto interespecífico, a morfoanatomia foliar permitiu distinguir claramente as quatro espécies analisadas. *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* formaram agrupamentos distintos, enquanto os etnotaxa de *B. caapi* se organizaram como um agrupamento coeso, refletindo a proximidade estrutural entre esses etnotaxa. Ainda assim, no contexto intraespecífico observou-se variação morfoanatômica detectável entre os etnotaxa. Essa diferenciação foi evidenciada pela presença de caracteres exclusivos e por combinações raras de atributos estruturais, especialmente relacionados a padrões glandulares, características da superfície foliar, organização dos feixes vasculares e ocorrência de drusas e cristais prismáticos. As análises multivariadas corroboraram esses padrões

estruturais, indicando maior singularidade morfoanatômica para os etnotaxa Quebrador, Caupuri e Arara, que apresentaram maior afastamento relativo no espaço morfológico. Os resultados indicam que os etnotaxa de *B. caapi* representam variação intraespecífica detectável por meio de caracteres morfoanatômicos foliares. A integração entre morfoanatomia e análises multivariadas demonstrou elevado potencial para a diferenciação de espécies e para a compreensão da diversidade estrutural dentro de *B. caapi*, contribuindo para o diálogo entre taxonomia botânica e conhecimento tradicional no contexto das plantas associadas à Ayahuasca.

Palavras-chave: Malpighiaceae; etnobotânica; sistemas bioculturais; diversidade intraespecífica; análises multivariadas.

Introdução

O gênero *Banisteriopsis* C.B. Rob., pertencente à família Malpighiaceae, que compreende 65 espécies distribuídas nas regiões tropicais da América do Sul, com destaque para o Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador e Peru (Francener & Almeida, 2020; Powo, 2026). Entre as espécies do gênero, *Banisteriopsis caapi* (Spruce ex Griseb.) C.V. Morton ocupa posição de destaque por seu papel central na preparação da Ayahuasca.

A Ayahuasca é amplamente utilizada por povos indígenas amazônicos em contextos rituais, medicinais e cosmológicos, e seu uso se expandiu para diferentes regiões do Brasil e diversos continentes (Gates, 1982; Labate & Araújo, 2002; Tupper, 2008; Oliveira et al., 2023). A relevância cultural e simbólica de *B. caapi* tem impulsionado estudos etnobotânicos, morfoanatômicos, filogenéticos, químicos e farmacológicos nas últimas décadas (Palhano-Fontes et al., 2014; Naganime-Pinheiro et al., 2021; Oliveira et al., 2023; Ruffell et al., 2023; Santos et al., 2025).

A formulação mais comum da Ayahuasca é o decocto dos caules de *B. caapi* e as folhas de *Psychotria viridis* Ruiz & Pav. (Rubiaceae) ou de *Diplopterys cabrerana* (Cuatrec.) B.Gates (Malpighiaceae). A atividade psicoativa da Ayahuasca está associada, principalmente, aos alcaloides β -carbolínicos presentes em *B. caapi*, como harmina, harmalina e tetrahydroharmina, que atuam como inibidores da monoamina oxidase (MAO), permitindo a ação da N,N-dimetiltriptamina (DMT) presente em *P. viridis* e *D. cabrerana* (McKenna et al., 1984; Riba et al., 2012; Santos et al., 2020). Essa interação química é responsável pelos efeitos introspectivos e sensoriais da bebida, despertando interesse tanto no contexto tradicional quanto em pesquisas científicas e terapêuticas (McKenna et al., 1984; Labate & Araújo, 2002; Palhano-Fontes et al., 2014; McKenna &

Riba, 2015; Labate & Assis, 2018; Santos et al., 2020; Oliveira et al., 2023; Santos et al., 2025).

A produção da Ayahuasca baseia-se em conhecimentos empíricos transmitidos por muitas gerações de vários povos indígenas, com registros históricos para cerca de 70 grupos étnicos (Schultes, 1957) e comunidades tradicionais que fazem uso da bebida. Essa diversidade de povos resultou numa complexidade de substâncias que vem sendo denominada academicamente como Ayahuasca. O termo Ayahuasca é, nesse contexto, aplicado para bebidas muito distintas. Schultes (1978) e Langdon (1986) descreveram uma bebida denominada por eles como Ayahuasca, produzida por alguns povos da Colômbia, à partir de macerados com água fria, embora a formulação difundida e descrita anteriormente, seja a de infusões.

Há também o registro do uso de outras espécies entre os povos tradicionais, muitas dessas pouco conhecidas. Esse é o caso de *Tetrapteryx methystica* R.E. Schult. (Schultes, 1957) e *T. mucronata* Cav. (Malpighiaceae) (Schultes and Hofmann, 1993; Ott, 1994). Estudos fitoquímicos de 22 acessos de *T. mucronata* mostraram componentes que não foram registrados para a Ayahuasca com formulação mais conhecida (i.e., *B. caapi* e *P. virides*) (Queiroz et al., 2015).

Embora sem registro direto na literatura, é fácil encontrar à venda na internet sementes de *Alicia anisopetala* (A. Juss.) W.R. Anderson ou *Alicia macrodisca* (Triana & Planch.) W.R. Anderson, como *Black Ayahuasca*. Ao que se conhece, o uso dessas espécies foi devido a um raizeiro do Peru, que vendeu sementes de *Alicia* como se fosse de *Diplopteryx cabrerana* (<https://herbalistics.com.au/product/alicia-anisopetala-black-ayahuasca-plant/>).e o uso vem se difundindo entre os psicodélicos. Além disso, experiências individuais narradas durante o estudo de Oliveira et al. (2023), surgiram referência ao uso de *Diplopteryx pubipetala* (A.Juss.) W.R. Anderson & C.C. Davis e estudos fitoquímicos detectaram betacarbolinas no acesso referido (Santos et al., 2020).

Nesse contexto de diversidade taxonômica associada à Ayahuasca, diversos autores registraram que povos indígenas e comunidades ayahuasqueiras reconhecem diferentes “tipos” de *B. caapi* (Langdon, 1986; Schultes, 1986; Oliveira et al., 2023). De modo geral, esses “tipos” são distinguidos, principalmente, por características morfológicas do caule, como a presença ou ausência de nós dilatados e formação de “tranças”, além de atributos associados à bebida produzida, como coloração, sabor e efeitos cognitivos (Callaway et al., 1999; Santos et al., 2020; Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023). Dessa forma, assim como ocorre em outras espécies de uso étnico (Ragupathy

et al., 2009), há o reconhecimento de diferentes “tipos” de cipós, neste estudo denominados etnotaxa, seguindo a terminologia proposta por Oliveira et al. (2023).

O termo etnotaxa não correspondem a categorias taxonômicas formais, mas representam unidades culturalmente reconhecidas dentro dos sistemas tradicionais de classificação da planta. No entanto, há especulação na literatura se haveria relação dos etnotaxa de *B. caapi* com categorias taxonômicas formais (Luz et al. 2003).

Há estudos para outras Angiospermas que comprovam correlação entre o conhecimento tradicional e categorias taxonômicas formais. Exemplo é a distinção de *Tripogon cope* Newmaster, V.Balas., Murug. & Ragup., que é corretamente discriminada de *T. wightii* Hook.f. por povos tradicionais da Índia, mas confundidas entre si pelos botânicos em identificações de herbários. A distinção de ambas à partir de morfologia, dados moleculares e etnobotânicos foi provada por Ragupathy et al. (2009). Luz et al. (2023) resgataram clados dentro da circunscrição de *B. caapi* à partir de amostras de etnotaxa coletados no Brasil, mas a interpretação dessa filogenia permanece inconclusiva por estar baseada, apenas, em caracteres moleculares.

A circunscrição de espécies de *Banisteriopsis* é, tradicionalmente, baseada na morfologia de flores e/ou frutos (Gates, 1982; Francener e Almeida, 2020). Pouco se conhece sobre a morfologia dos órgãos reprodutivos de *B. caapi*, já que a maior parte da documentação de *B. caapi* disponível em herbários, e são muitas, são de amostras estéreis, o que dificulta a identificação botânica precisa (Gates, 1982; Oliveira et al., 2023). Então, quando se fala em um etnotaxa de *B. caapi*, muitas vezes, é uma referência empírica se o material está estéril, pela impossibilidade de se proceder à identificação taxonômica formal.

Considerando que há pouca documentação em herbários de flores e frutos de *B. caapi* e táxons relacionados a Ayahuasca, uma análise detalhada da morfoanatomia foliar pode se apresentar como um método sistemático alternativo de diferenciação, complementando a taxonomia tradicional. A morfologia e a anatomia foliar constituem ferramentas fundamentais para a delimitação de espécies vegetais, especialmente em grupos com elevada similaridade macromorfológica (Judd et al., 2007). Caracteres relacionados à forma da lâmina, padrões de nervação e arquitetura foliar refletem tanto relações filogenéticas quanto adaptações funcionais (Ellis et al., 2009).

Abordagens micromorfológicas, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), ampliam ainda mais a resolução dos estudos morfoanatômicos (Possobom et al., 2010; Araújo et al., 2020a; Macedo et al., 2023; Silva et al., 2025). A análise da superfície

foliar permite a caracterização detalhada da cutícula, das paredes celulares epidérmicas e de estruturas especializadas (Macedo et al., 2023; Possobom et al., 2010). Associada a essa técnica, a espectroscopia de energia dispersiva de raios X, também chamada análise de biomineralização, possibilita a detecção qualitativa e semiquantitativa de elementos minerais associados a essas estruturas, contribuindo para a interpretação de padrões de biomineralização e sua possível relação com a diferenciação morfoanatômica entre os táxons analisados, conforme abordagens consolidadas na literatura para estudos de biomineralização vegetal (Ensikat & Weigend, 2021).

A anatomia foliar permite o acesso a caracteres menos sujeitos à variação ambiental imediata. A organização dos tecidos do pecíolo e lâmina, a estrutura do mesofilo, a distribuição vascular e a diferenciação epidérmica têm sido amplamente utilizadas em estudos taxonômicos e sistemáticos (Dickson, 2000, Araújo et al., 2020). Em Malpighiaceae, análises anatômicas já demonstraram alto potencial diagnóstico em diferentes níveis taxonômicos (Araújo et al., 2010; Araújo & Meira, 2016; Araújo et al., 2020; Santos et al., 2020; Nagamine-Pinheiro et al., 2021; Oliveira et al., 2023; Vilarinho et al., 2023). Além disso, estudos recentes demonstram que a análise integrada desses caracteres fornece suporte consistente para a distinção entre táxons próximos. Essa abordagem tem sido aplicada com sucesso em diferentes grupos de Angiospermas, inclusive em contextos taxonômicos complexos e etnobotânicos (Araújo & Meira, 2016; Oliveira et al., 2018; Araújo et al., 2020; Santos et al., 2020; Nagamine-Pinheiro et al., 2021; Vilarinho et al., 2023 Oliveira et al., 2023; Silva et al., 2025).

No caso de *B. caapi*, apesar da ampla literatura sobre aspectos químicos e farmacológicos, ainda são inexistentes estudos que avaliam de forma integrada a diversidade morfoanatômica foliar dos etnotaxa tradicionalmente reconhecidos. A ausência desse tipo de abordagem limita a compreensão da circunscrição da espécie e pode abrir um panorama sobre a interpretação dos etnotaxa e dos clados de *B. caapi* revelados por Luz et al. (2023). Assim, a caracterização detalhada dos etnotaxa de *B. caapi* e espécies relacionadas pode fornecer subsídios importantes para a sistematização do conhecimento tradicional, ao mesmo tempo em que contribui para a conservação da diversidade genética e cultural associada às espécies (Araújo et al., 2020; Araújo & Meira, 2016; Oliveira et al., 2023).

O estudo de plantas sagradas como *B. caapi* não apenas fortalece o entendimento sobre seu uso e variabilidade fenotípica, como também desempenha um papel essencial na conservação e proteção do conhecimento tradicional. Esse tipo de investigação é

particularmente relevante para espécies com alto grau de uso na Amazônia, uma região que sofre diariamente com ações de desmatamento e que exige esforços contínuos para a preservação de sua flora. Compreender e documentar a diversidade dessas plantas pode subsidiar estratégias de conservação mais eficazes, garantindo tanto a manutenção de recursos naturais quanto a valorização dos saberes tradicionais (Naranjo, 1986; Martin, 1995; Lamarca et al., 2020; Oliveira et al., 2018; Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023).

Este estudo testa a hipótese de que os etnotaxa de *B. caapi* apresentam diferenças morfoanatômicas consistentes, capazes de refletir linhagens distintas dentro da complexidade da espécie, conforme sugerido por Luz et al. (2023), embora ainda sem definição quanto à sua categoria taxonômica formal. Avalia-se, ainda, se outras espécies de Malpighiaceae associadas ao preparo ritual da Ayahuasca podem ser diferenciadas de *B. caapi* com base na morfoanatomia foliar.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a diversidade morfoanatômica foliar de etnotaxa de *B. caapi* e das espécies *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetela*, investigando a possível distinção dos etnotaxa e integrando análises macromorfológicas, micromorfológicas e anatômicas do pecíolo e lâmina foliar, como subsídio à taxonomia e conhecimento etnobotânico das espécies e do complexo da Ayahuasca.

Material e Métodos

Caracterização morfoanatômica

Foram analisadas folhas e pecíolos de indivíduos adultos de oito etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. pubipetala* e *D. cabrerana* (Tabela 1, Fig. 1). Foram usadas folhas desidratadas de exsicatas depositadas no Herbário UB (acrônimo segundo Thiers, 2026) da Universidade de Brasília (UnB) e material fresco coletado e fixado em FAA 50% (formaldeído, ácido acético glacial e álcool etílico 50% na proporção 1:1:18) a campo por 48 horas e, em seguida, armazenado em etanol 70% (Johansen, 1941).

Tabela 1. Espécies, etnotaxa, tipos de dados produzidos voucher de herbário de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diploteris cabrerana* e *D. pubipetala* incluídos na análise morfoanatômica foliar.

Espécie	Etnotaxa	Análise	Voucher
<i>Banisteriopsis caapi</i> (Spruce ex	Arara	Macromorfologia e Raio X	Santos 86; Saavedra-Saenz 18
		MEV e Biomineralização	Saavedra-Saenz 18

Griseb.)
C.V.Morton

	Anatomia	Santos 86; Saavedra-Saenz 18
<i>Cabi</i>	Macromorfologia e Raio X	Oliveira 3682; Oliveira 3697; Oliveira 3702; Santos 85; Oliveira 3687; Oliveira 3704; Oliveira 3684; Oliveira 3696; Oliveira 3685
		Oliveira 3682; Oliveira 3697; Oliveira 3702
		Oliveira 3651; Oliveira 3799; Oliveira 3668
<i>Caupuri</i>	MEV e Biomineralização	Oliveira 3668;
	Anatomia	Oliveira 3651; Oliveira 3799; Behrens 47; Oliveira 3668
		Oliveira 3432; Oliveira 3552; Oliveira 3623; Oliveira 3440
<i>Híbrido</i>	Anatomia	Oliveira 3432; Oliveira 3552; Oliveira 3430; Oliveira 3623
		Oliveira 3643; Oliveira 3661; Oliveira 3667; Oliveira 3669
		Oliveira 4021
<i>Ourinho</i>	Anatomia	Oliveira 3643; Oliveira 3661; Behrens 39; Oliveira 3400; Oliveira 3667; Oliveira 3669
		Oliveira 3660; Behrens 41; Oliveira 3653; Oliveira 3657; Oliveira 3652; Oliveira 3671
		Oliveira 4038
<i>Pajezinho</i>	Anatomia	Behrens 41; Oliveira 3653; Oliveira 3652; Oliveira 3671

			Macromorfologia e Raio X	Oliveira 3672; Oliveira 3514; Oliveira 3553; Oliveira 3622
			MEV e Biomineralização	Oliveira 3672
			Anatomia	Oliveira 3672; Oliveira 3514; Oliveira 3553; Oliveira 3622
<i>Quebrador</i>			Macromorfologia e Raio X	Santos 64; Oliveira 3670; Oliveira 3551; Oliveira 3434; Oliveira 3664; Oliveira 3550
			MEV e Biomineralização	RCO 3670
			Anatomia	Santos 64; Oliveira 3508; Oliveira 3670; Oliveira 3710; Oliveira 3551
<i>Tucunacá</i>			Macromorfologia e Raio X	Plowman 12277; Steven 13140; Oliveira 4053
			MEV e Biomineralização	Oliveira 4053
			Anatomia	Plowman 12277; Steven 13140
<i>Alicia macrodisca</i> (Triana & Planch.) Griseb.	---		Macromorfologia e Raio X	Santos 82; Oliveira 3791
			MEV e Biomineralização	Santos 82
			Anatomia	Santos 82; Oliveira 3791
<i>Diplopterys cabrerana</i> (Cuatrec.) B.Gates	---		Macromorfologia e Raio X	Fagg 2454; Fagg 2469; Oliveira 3863; Soares-Silva 1604; Oliveira 4091; Oliveira 4079
			MEV e Biomineralização	Oliveira 4091
			Anatomia	Fagg 2454; Fagg 2469; Oliveira 3863; Soares-Silva 1604
<i>D. pubipetala</i> (A.Juss.) W.R.Anderson & C.Davis	---		Macromorfologia e Raio X	Fagg 2454; Fagg 2469; Oliveira 3863; Soares-Silva 1604
			MEV e Biomineralização	Oliveira 4091
			Anatomia	Fagg 2454; Fagg 2469; Oliveira 3863; Soares-Silva 1604

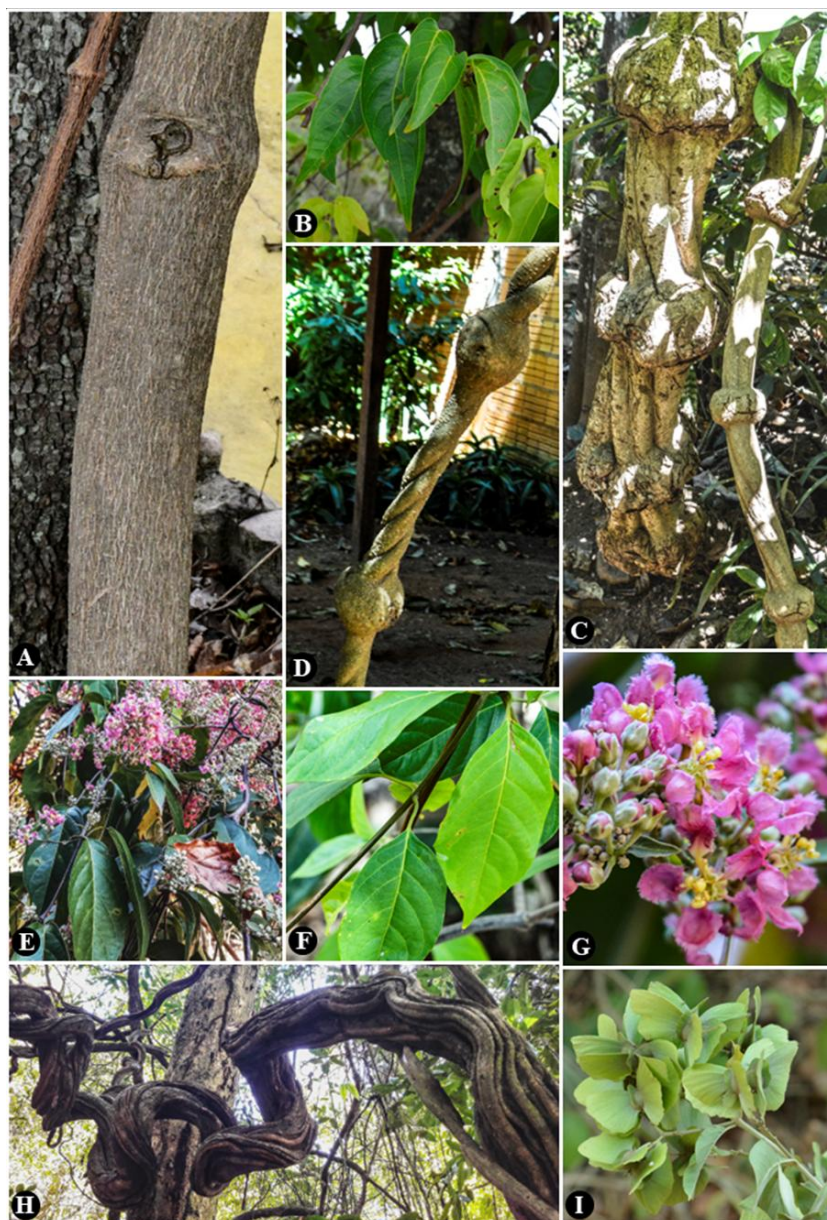


Figura 1. (A – H) Aspectos morfológicos de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*. A) Caule de Arara. B) Folha de Arara. C) Caule de Caupuri. D) Caule de Cabi. E) Folhas e flores de Ourinho. F) Folhas de Híbrido. G) Flores de Quebrador. H) Caule de Tucunacá. I) Samarídeos de *Alicia macrodisca*.

Macromorfologia e Raio X

A análise macromorfológica das folhas avaliou caracteres morfológicos qualitativos e quantitativos da lâmina foliar e do pecíolo. Dentre esses, forma da lâmina, consistência, tipo de ápice e base, margem, presença de tricomas, padrão geral de venação, presença de pecíolo, tamanho do pecíolo e presença e disposição de glândulas. Esses caracteres foram registrados por observação direta sob lupa estereoscópica e por documentação fotográfica digital, permitindo a padronização das observações e a

comparação entre os taxa analisados. Os descritores macromorfológicos foram definidos com base em terminologia botânica clássica (Radford et al., 1974; Gates, 1982; Ellis et al., 2009).

A análise dos padrões de venação foliar foi complementada com imagens de Raios X, obtidas no Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira da USP-Esalq/Piracicaba-SP. As imagens foram adquiridas utilizando o equipamento Faxitron XRay, operando sob exposição de 29 kV por 21 segundos. Antes da análise das amostras, foram realizadas imagens de referência do tipo DARK e BRIGHT, empregadas para a calibração do sistema. O material analisado está citado na tabela 1.

O processamento das imagens foi realizado no software ImageJ, permitindo a análise comparativa dos padrões de venação entre os taxa. A descrição e a classificação dos padrões de venação foliar seguiram a terminologia e os critérios estabelecidos no Manual of Leaf Architecture (Ellis et al., 2009), incluindo a identificação do tipo de venação primária, do arranjo das nervuras secundárias, do padrão de conexão das nervuras terciárias e da organização geral da rede vascular.

MEV e Biomineralização

A microestrutura da superfície foliar foi analisada por MEV no Centro de Microscopia Eletrônica do Instituto de Biociências da Unesp, Campus de Botucatu, em Botucatu-SP. Com o objetivo de caracterizar atributos epidérmicos finos, foram avaliados caracteres como distribuição e morfologia dos tricomas, distribuição e padrão das glândulas, presença e padrão de ceras epicuticulares e características estomáticas.

Para essas análises, fragmentos da lâmina foliar, preferencialmente da região mediana, foram preparados segundo protocolos usuais para MEV. As amostras foram submetidas à desidratação gradual em série etanólica, seguida de secagem em ponto crítico utilizando CO₂, quando necessário. Posteriormente, os fragmentos foram metalizados com ouro e analisados em microscópio eletrônico de varredura Philips 515, operando a 12,5 kV. A descrição e a interpretação dos caracteres micromorfológicos seguiram a terminologia e os critérios anatômicos estabelecidos por Metcalfe & Chalk (1979), permitindo a padronização das observações e a comparação entre os táxons analisados.

A biomineralização foliar foi investigada por meio de análises de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX), acoplada à microscopia eletrônica no Centro de

Microscopia Eletrônica do Instituto de Biociências da Unesp, Câmpus de Botucatu, em Botucatu-SP. Com o objetivo de identificar e comparar a composição elementar de estruturas específicas da lâmina e do pecíolo, avaliando a superfície do pecíolo e as glândulas e tricomas da lâmina foliar. Considerando que a disponibilidade e a deposição de elementos podem sofrer influência de fatores ambientais e fisiológicos, os dados de EDX não foram incorporados como descritores primários na matriz morfoanatômica utilizada nas análises comparativas. Assim, o mapeamento elementar foi empregado como evidência complementar, oferecendo corroboração funcional às estruturas mineralizadas e auxiliando na contextualização fisiológica dos padrões anatômicos observados.

Anatomia das folhas

Para a análise anatômica, as folhas retiradas das exsicatas passaram por um processo de reversão de herborização. Esse procedimento consistiu em submergir as folhas em uma solução de glicerina a 20%, mantendo-as em estufa a 60°C por um período que variou entre 24 a 96 horas, dependendo da necessidade. Após esse período, as amostras foram lavadas com água destilada e armazenadas em etanol 50% para posterior processamento.

Foram feitas secções transversais no pecíolo (região distal) e lâmina foliar (região mediana), abrangendo a borda e a nervura mediana. Os cortes transversais foram clarificados em hipoclorito de sódio 20%, corados com Safranina 1% por cinco minutos e posteriormente lavadas em bateria alcoólica por dois minutos em cada gradiente, posteriormente corados com Azul de alcian 1% por dois minutos, repetindo a lavagem no gradiente alcoólico e montados em lâminas permanentes com verniz vitral incolor (Johansen, 1941; Paiva et al., 2006). As secções paradérmicas foram obtidas a partir da dissociação epidérmica em ácido de Franklin (peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial em proporção 1:1), onde permaneceram por aproximadamente 24 horas antes de serem coradas com safranina 1% e montadas em lâminas semipermanentes com gelatina glicerizada (Kraus & Arduin, 1997).

A documentação fotográfica das amostras foi realizada com um sistema de captura de imagens composto por um microscópio Axioskop/Zeiss, uma câmera digital Moticam 2300 e o software MotiC 2.0 Image Plus, garantindo registros detalhados das estruturas analisadas. Para a análise anatômica, caracteres estruturais de pecíolo e lâmina foram avaliados, incluindo características da epiderme, mesofilo, organização do sistema

vascular e presença de cristais prismáticos e drusas, conforme critérios morfoanatômicos amplamente utilizados e discutidos por Araújo et al., 2010 e Araújo et al. (2020).

Análises multivariadas e métricas de similaridade

Os caracteres morfoanatômicos obtidos a partir das análises macromorfológica, micromorfológica e anatômica foram organizados em uma matriz binária de presença (1) e ausência (0), admitindo valores ausentes (NA) quando a observação do caráter não foi possível. Apenas caracteres independentes entre si e que não apresentaram sobreposição completa entre os táxons foram selecionados, visando maximizar o poder discriminatório das análises multivariadas.

As análises estatísticas foram conduzidas em duas abordagens complementares: (i) um dataset completo, incluindo etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, e (ii) um subconjunto restrito aos etnotaxa, permitindo avaliar separadamente os padrões de diferenciação interespecífica e a variação intraespecífica. Essa estratégia possibilitou testar de forma explícita o efeito da inclusão de táxons relacionados na estruturação morfoanatômica do conjunto e, simultaneamente, investigar a coesão e a diferenciação interna entre os etnotaxa.

A similaridade morfoanatômica entre os táxons foi quantificada por meio do coeficiente de Jaccard, adequado para dados binários e insensíveis à coausência de caracteres. A matriz de dissimilaridade correspondente foi calculada utilizando a função `vegdist` do pacote `vegan`, com o argumento `binary = TRUE` e remoção de valores ausentes (`na.rm = TRUE`). A partir dessa base, foi obtida a matriz de similaridade ($1 - \text{distância}$), da qual se calcularam valores mínimos, médios e máximos de similaridade para cada conjunto de dados.

Adicionalmente, foram calculadas similaridades médias intra e intergrupos, considerando tanto os subgrupos definidos a priori (etnotaxa, *A. macrodisca* e *D. cabrerana* e *D. pubipetala*) quanto a comparação exclusiva entre etnotaxa. Essa abordagem permitiu quantificar o grau de coesão interna dos etnotaxa em contraste com sua similaridade em relação às espécies relacionadas.

A estrutura hierárquica dos dados foi avaliada por meio de análises de agrupamento hierárquico utilizando o método UPGMA (média aritmética), aplicada a matriz de dissimilaridade de Jaccard. A qualidade do ajuste do dendrograma às distâncias originais foi avaliada por meio da correlação cofenética, fornecendo uma medida quantitativa da fidelidade das representações hierárquicas.

A ordenação dos taxa foi investigada por meio de Análise de Coordenadas Principais (PCoA), baseada na matriz de dissimilaridade de Jaccard. Os autovalores foram utilizados para calcular a porcentagem de variação explicada pelos dois primeiros eixos, permitindo avaliar a estruturação do espaço morfológico e a distribuição relativa dos taxa.

Complementarmente, foi realizada uma análise de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS), também baseada na dissimilaridade de Jaccard, com múltiplas tentativas de convergência (trymax = 200). A qualidade da ordenação foi avaliada por meio do valor de stress, utilizado como indicador da adequação da representação bidimensional das distâncias originais.

Para investigar a diferenciação interna de *B. caapi*, foram realizadas análises adicionais restritas ao subconjunto de etnotaxa. Inicialmente, calculou-se a dissimilaridade média de cada etnotaxa em relação às demais, a partir da matriz de dissimilaridade de Jaccard, permitindo identificar etnotaxa com maior singularidade morfoanatômica relativa.

Além disso, foram identificados caracteres exclusivos (presentes em apenas um etnotaxa) e caracteres raros (presentes em dois ou três etnotaxa), possibilitando avaliar quais traços contribuíram de forma mais relevante para a diferenciação interna observada nas análises multivariadas. A contribuição relativa dos caracteres para a organização do espaço morfológico foi investigada por meio da correlação entre os caracteres binários e os eixos da PCoA, permitindo identificar quais atributos apresentaram maior associação com os principais gradientes de variação morfoanatômica entre as etnotaxa.

Por fim, uma chave de identificação foi elaborada a partir da matriz binária de caracteres morfoanatômicos utilizada nas análises de similaridade e ordenação. Foram priorizados: caracteres exclusivos (frequência = 1); caracteres raros (frequência = 2 ou 3); caracteres com maiores valores absolutos de correlação com os eixos da PCoA; caracteres de fácil observação morfológica ou anatômica, visando aplicabilidade prática. Caracteres amplamente compartilhados (frequência ≥ 4) não foram utilizados como pontos primários de separação, sendo empregados apenas como suporte confirmatório quando necessário. A chave foi estruturada no formato dicotômico, organizando inicialmente caracteres morfológicos externos, seguidos por caracteres anatômicos internos, de modo a facilitar sua aplicação em campo e em laboratório.

Resultados

Caracterização morfoanatômica estrutural e microestrutural

Macromorfologia e Raio X

Os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubibetala* apresentaram elevada uniformidade macromorfológica foliar (Fig. 2). Folhas pecioladas, com pecíolos majoritariamente seríceos, glandulares e comprimento variando entre 0,5–2,6 cm (Fig. 2A–E, G). As lâminas foliares apresentam forma com variação de ovada a ovada-elíptica, truncadas-obtusas a levemente cuneadas na base, acuminadas no ápice e margem inteira a levemente sinuosa. Glândulas laminares ocorreram predominantemente na face abaxial da lâmina com distribuição proximal e marginal, associadas à nervura principal e às secundárias (Fig. 2B, D, F-G).

A venação foliar foi uniforme entre os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubibetala* (Fig. 2A-C, F, H). Venação primária pinada e nervuras secundárias broquidódromas festonadas, com veia perimarginal fimbrial (Fig. 2A-C, H). O espaçamento e o ângulo das secundárias diminuem gradualmente em direção à porção proximal da lâmina, com inserção decurrente. Veias intersecundárias apresentaram curso proximal paralelo às secundárias, comprimento inferior a 50% das adjacentes e curso distal reticulado ou ramificado, com frequência superior a uma por área intercostal. A venação terciária é percurrente mista, com ângulos predominantemente obtusos. Veias quaternárias são reticuladas irregulares e a venação quinternária livremente ramificada, com areolação moderada. As terminações de venação fina foram altamente ramificadas e associadas a esclereídes. A venação marginal final formou arcos fechados (Fig. 2H).

Os descritores que diferiram entre os taxa estão relacionados principalmente ao comprimento do pecíolo, distribuição de glândulas e padrão de indumento (Fig. 2). Os maiores comprimentos peciolares foram registrados em Cabi (1,1-2,6cm), Caupuri (1,3-2,0 cm) e *A. macrodisca* (1,5–2,3 cm), em que mesmo as menores medidas foram superiores a 1cm. Enquanto os menores comprimentos ocorreram em Quebrador (0,5-1,2cm), *D. pubipetala* (0,5–0,8 cm) e *D. cabrerana* (0,6–1,0 cm).

Glândulas foliares estiveram associadas simultaneamente à lâmina e ao pecíolo na maioria dos taxa (Fig. 2D, F-G), enquanto em *D. cabrerana* foram registradas apenas na lâmina foliar (Fig. 2 B, E). Glândulas peciolares foram geralmente laterais e pareadas, próximas à transição lâmina-pecíolo (Fig. 2D, G). Diferenças também foram observadas no padrão de distribuição: em *D. cabrerana* as glândulas concentraram-se nas margens e porção proximal da lâmina, enquanto em *D. pubipetala* mostraram-se distribuídas ao longo da margem e frequentemente aglomeradas distalmente (Fig. 2B).

O indumento variou de superfícies glabras a seríceas. A condição serícea predominou em pecíolo, nervuras e na face abaxial da lâmina foliar. Superfícies adaxiais glabras ocorreram em Pajezinho e *D. cabrerana*, enquanto Quebrador apresentou variação de glabro a levemente seríceo. Em *D. pubipetala*, tricomas foram restritos principalmente ao pecíolo e às nervuras.

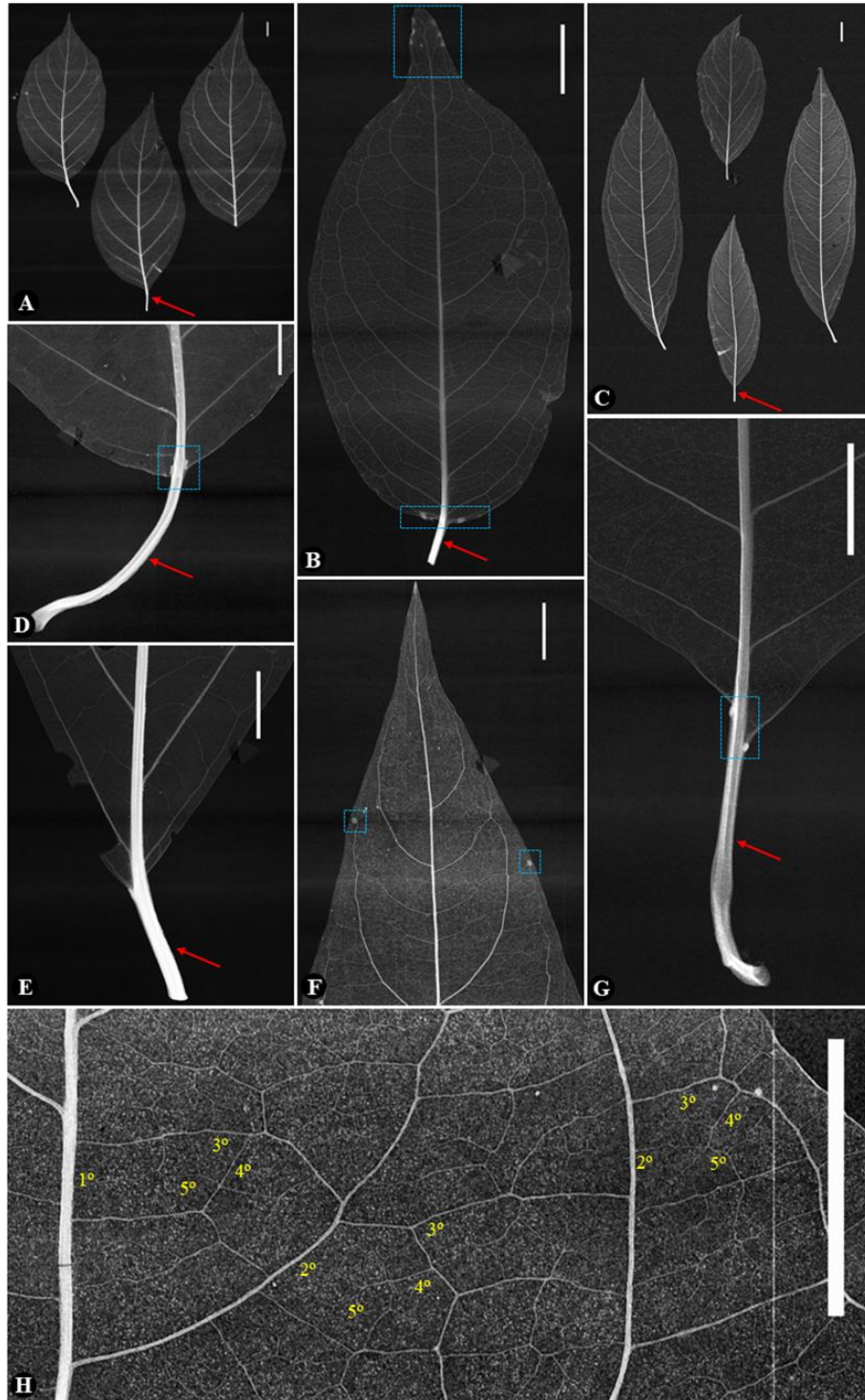


Figura 2. Macromorfologia e raio x foliar de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubibetala*, evidenciando presença de pecíolo,

forma da lâmina, base e ápice foliar, padrão de nervação e presença de glândulas peciolares e laminares. A) Aspecto geral de folhas de Tucunacá. B) Folha inteira de *D. pubipetala* com destaque para a presença de glândulas laminares basais e apicais. C) Aspecto geral de folhas de *A. macrodisca*. D) Folha de arara com pecíolo longo e glândula peciolar. E) Folha de *D. cabrerana* peciolada e ausência de glândulas. F) Ápice foliar acumulado de Ourinho. G) Folha de Cabi com pecíolo longo e glândulas na parte proximal da lâmina. H) Padrão de nervação de Arara com arranjo pinado e presença de veias até a 5ª ordem. Marcações azuis destacam a presença de glândulas peciolares e laminares. Setas vermelhas indicam o pecíolo. Numerações amarelas indicam a ordem do padrão de venação. Escala: A, C = 1 cm; B, D-H = 0,5 cm.

MEV e Biomineralização

Os etnotaxa de *B.s caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubibetala* analisados em conjunto mostram caracteres micromorfológicos compatível com o padrão estrutural da família, porém com variações na morfologia, distribuição e arranjo das estruturas epidérmicas (Fig. 3–4). Em alguns grupos, observaram-se caracteres exclusivos e combinações estruturais pouco frequentes entre os demais taxa. Cabi e Híbrido não foram incluídos nesta análise por ausência de material adequado para observação em (MEV).

Nos pecíolos, além da presença frequente de tricomas, a superfície epidérmica foi predominantemente sulcada, com formação de estrias longitudinais bem marcadas, particularmente evidentes em Pajezinho (Fig. 3A) e Caupuri. Essas variações, embora consistentes entre estruturas e etnotaxa, não configuraram padrões diagnósticos isolados, mas contribuíram para a caracterização micromorfológica comparativa do grupo.

A micromorfologia das superfícies epidérmicas variou desde áreas relativamente mais lisas, como na face adaxial de Tucunacá, até superfícies com paredes celulares bem delimitadas e levemente convexas, como observado na face adaxial de *A. macrodisca*. Mesmo nas superfícies aparentemente lisas, como em Tucunacá, a epiderme apresentou textura rugosa ou áspera em maior aumento. Em alguns taxa, como *D. pubipetala* e Arara, a superfície adaxial exibiu um padrão mais complexo, formando uma organização em rede ou aspecto de teia (Fig. 3B). Quebrador apresentou na face adaxial superfície de aspecto liso formando dobras longas longitudinalmente (Fig. 3I). Um padrão papiloso distinto foi observado na face abaxial de *A. macrodisca*, onde a epiderme formava dobras irregulares com aspecto de pequenas projeções arredondadas (Fig. 3E).

As ceras epicuticulares estiveram presentes em muitos etnotaxa, apresentando diferentes padrões morfológicos. Em alguns casos, ocorreram como depósitos amorfos ou grânulos sem forma definida; em outros, organizaram-se em placas, como na face adaxial de Quebrador (Fig. 3I), ou em cristais bem definidos, especialmente nas faces abaxiais de Ourinho, Quebrador, Pajezinho e Tucunacá (Fig. 3F).

Os estômatos foram predominantemente anomocíticos em todos os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, com células-guarda reniformes e poro elíptico. Apesar desse padrão recorrente, observou-se variação na morfologia das células epidérmicas adjacentes, que apresentaram contornos mais arredondados (Fig. 3D, H; *D. pubipetala* e Tucunacá), alongados (Fig. 3G; *D. cabrerana*) ou losangulares (Fig. 3F; Quebrador), sem perda do arranjo geral estomático.

Os tricomas também exibiram um padrão estrutural comum, correspondendo a tricomas tectores malpighiáceos longos, pontiagudos e paralelos à superfície, em pecíolos e lâminas foliares (Fig. 3A, E, G-H). No entanto, variações foram registradas quanto à densidade e à ornamentação da parede. Em Caupuri e Pajezinho, especialmente no pecíolo, os tricomas apresentaram elevada abundância de verrugas (Fig. 3A), enquanto em Tucunacá alguns tricomas mostraram-se levemente retorcidos (Fig. 3H), embora mantivessem o formato alongado característico.

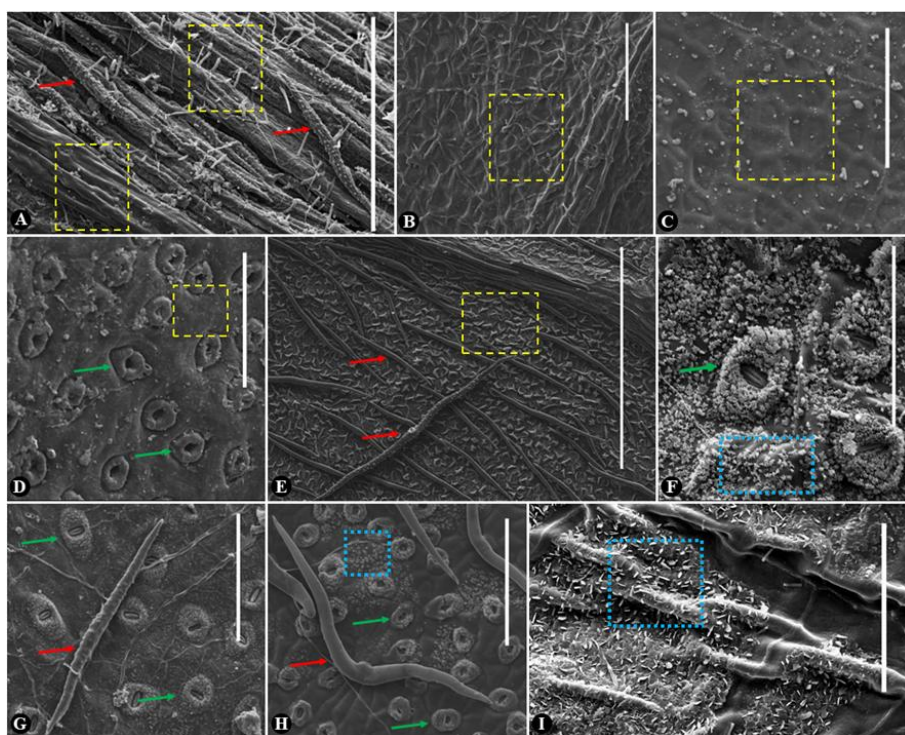


Figura 3. Micromorfologia de superfícies foliares em etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*, observada por microscopia

eletrônica de varredura (MEV). A) Superfície do pecíolo de Pajezinho com aspecto sulcado e presença de tricomas malpighiáceos de superfície densamente verrugosa; B) Face adaxial de Arara com superfície de epiderme elevada com aspecto de teia; C) Face adaxial de *D. pubipetala* com superfície de aspecto rugoso e demarcações que formam redes; D) Face abaxial de *D. pubipetala* com superfície de textura aspera e estômatos com contornos mais arredondados; E) Face abaxial de *A. macrodisca* com superfície papilosa e tricomas malpighiaceos de superfície verrugosa e lisa; F) Face abaxial de Quebrador com superfície recoberta de cera epicuticular em forma de cristais; G) Face abaxial de *D. cabrerana* com superfície de textura áspera, estômatos com contorno arredondado longo e tricoma malpighiaceo; H) Face abaxial de Tucunacá com superfície rugosa, com acúmulo de cera epicuticular em forma de cristais, estômatos com contornos mais arredondados e tricoma malpighiaceo retorcido e superfície predominantemente lisa; I) Face adaxial de Quebrador com superfície de textura lisa e dobras longas cobertas por cera epicuticular em forma de placas. Marcações amarelas destacam o aspecto geral da superfície. Marcações azul destacam a cobertura da superfície por ceras epicuticulares. Setas verdes indicam estômatos. Setas vermelhas indicam tricomas. Escala: A=300µm; B-D, G-H=100µm, E=500µm; F, I=50µm.

Glândulas foram observadas no pecíolo e/ou na lâmina foliar na maioria dos taxa analisados (Fig. 4). No pecíolo, predominam glândulas sésseis e elevadas, com formas elíptica a circulares discóides e superfície irregular a rugosa, frequentemente associadas a pregas cuticulares e células globosas salientes de aspecto papiloso. Esse padrão geral foi observado em Arara (Fig. 4A), Caupuri, Ourinho, Pajezinho (Fig. 4D) e Tucunacá (Fig. 4H). Em *A. macrodisca*, as glândulas do pecíolo são circulares discóides a ovais, sésseis e elevadas, com superfície predominantemente lisa a levemente rugosa. Em *D. pubipetala*, as glândulas são circulares, sésseis, praticamente niveladas à superfície do pecíolo, com superfície irregular predominantemente rugosa e estriada. Em Quebrador, as glândulas do pecíolo diferem por apresentar forma discóide, com borda saliente e bem delimitada, superfície regular a levemente estriada e papilosidade predominante (Fig. 3G).

Na face adaxial da lâmina foliar, as glândulas correspondem majoritariamente a elaiopódeos, com variação morfológica entre os taxa. Em Arara, ocorrem elaiopódeos proeminentes, formados por um anel de células elevadas organizadas em padrão radiado, delimitando uma abertura central deprimida e parcialmente obstruída, associada a

cutícula com cristas ou estrias divergentes e margens sinuosas. Em Caupuri, os elaiopódeos são globosos e compactos, sem abertura visível, com superfície fortemente rugosa, pregas e saliências cuticulares integradas à epiderme. Em Ourinho, os elaiopódeos são globosos e elevados, com superfície densamente rugosa, microprojeções e poro apical discreto. Em Tucunacá, observa-se glândula poral circular situada em depressão cuticular, com borda espessada, contorno regular e pregas cuticulares radiais convergentes. Em *D. cabrerana*, as glândulas adaxiais são circulares e elevadas, com leve depressão central, margem saliente bem definida, células altamente sinuosas, dobras cuticulares convergentes e acúmulo de cera amorfa em placas. Glândulas adaxiais não foram observadas em Pajezinho, Quebrador, *A. macrodisca* e *D. pubipetala*.

Na face abaxial, as glândulas exibem ampla diversidade morfológica. Um padrão comum, observado em Caupuri (Fig. 4B), Ourinho, Pajezinho e Tucunacá, consiste em glândulas circulares discóides, grandes, achatadas a hemisféricas, salientes, com superfície intensamente pregueada e emergente da epiderme, associadas ou não à presença de cera amorfa. Em Arara, ocorre um morfotipo pouco saliente, elíptico a ovado, com superfície rugosa formada por pregas compactas e deposição de cera amorfa irregular. Em Quebrador, as glândulas abaxiais distinguem-se por apresentar grande porte, forma circular, borda espessa e elevada formada por células papilosas, região central composta por células menores e compactas, textura finamente enrugada e depressão central bem definida, sem cobertura de cera (Fig. 4F). Em *A. macrodisca*, observa-se glândula circular de grande porte, com margem elevada e bem delimitada, superfície reticulada e levemente ondulada, centro plano e compacto, sem cera impregnada. Em *D. pubipetala*, as glândulas abaxiais são globosas e salientes, com superfície lisa a irregular, aspecto colapsado e deposição de cera amorfa irregular.

Em alguns taxa, um segundo morfotipo abaxial foi registrado, caracterizado predominantemente por glândulas globosas, com superfície lisa a levemente lobada e irregular, sem padrão radial e com pregas cuticulares discretas. Esse padrão ocorre em Arara, Ourinho (Fig. 4C), Pajezinho (Fig. 4D), Quebrador, Tucunacá e *A. macrodisca*, variando quanto à presença de cera amorfa e, em Pajezinho, à associação com estômatos (Fig. 4D). *D. cabrerana* foi o único táxon que não apresentou glândulas no pecíolo e em nenhuma das faces da lâmina foliar.

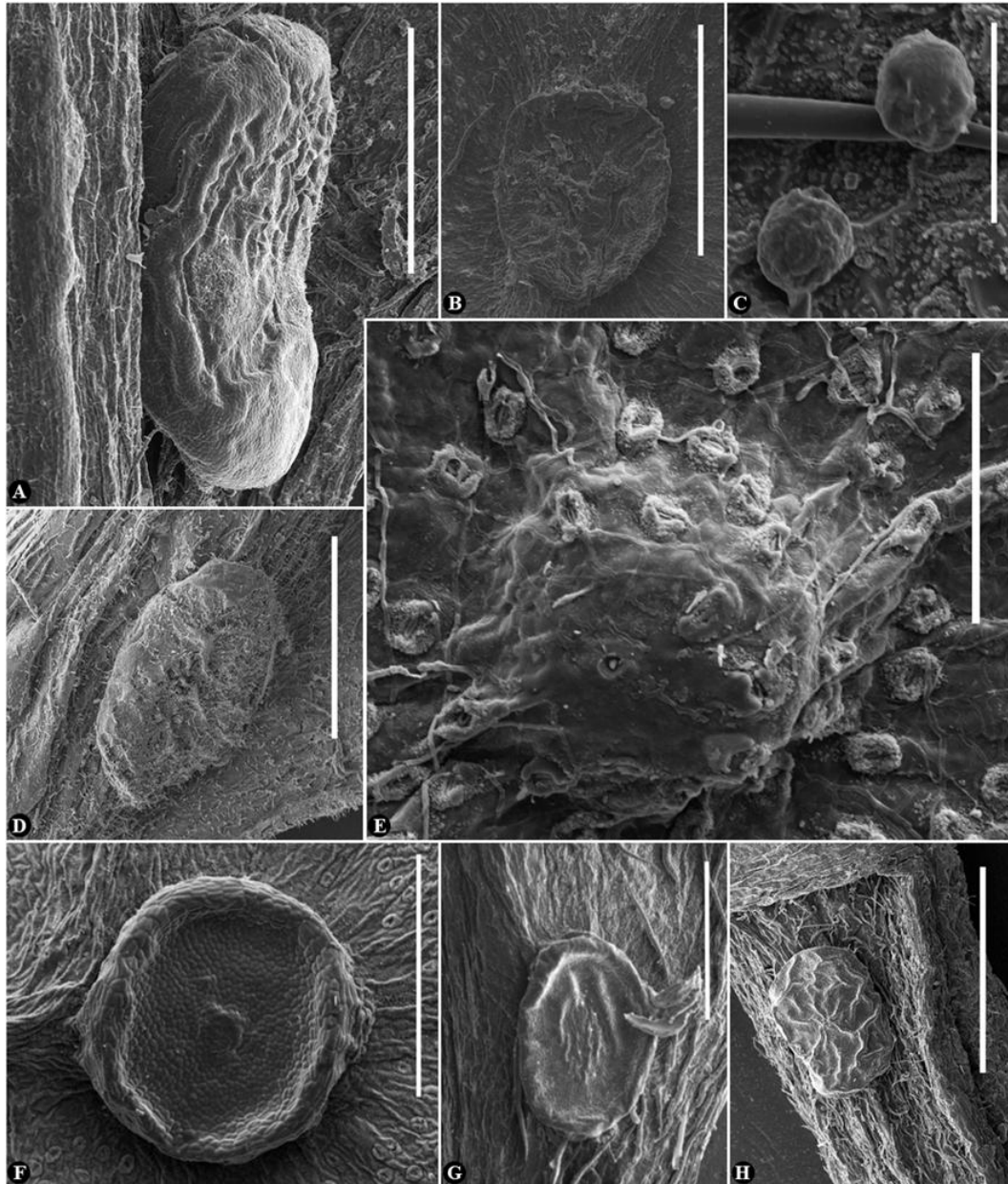


Figura 4. Micromorfologia de glândulas presentes no pecíolo e na lâmina foliar em etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, observada em MEV. A) Pecíolo de Arara com glândula elipsoidal a reniforme. B) Face abaxial de Caupuri com glândula circular achatada. C) Face abaxial de Ourinho com glândula globosa elevada, de superfície irregular. D) Pecíolo de Pajezinho com glândula oval, elevada, de superfície irregular e rugosa. E) Face abaxial de Pajezinho com glândula globosa, apresentando estômatos. F-G) Face abaxial de Quebrador com glândula circular discóide de borda espessa e depressão central e pecíolo com glândula elíptica com borda saliente e bem delimitada. H) Pecíolo de Tucunacá com glândula levemente elíptica elevada com borda espessada e pregas cuticulares radiais. Escala: A-B, G=500 μ m; C=50 μ m; D, H=1000 μ m; E, =100 μ m; F=300 μ m.

As análises de EDX evidenciaram padrões elementares compartilhados entre os taxa analisados e entre as diferentes estruturas vegetativas (Fig. 5). Oxigênio (O), ouro (Au) e alumínio (Al) foram excluídos das interpretações por estarem associados ao preparo e à metalização das amostras. Entre os elementos remanescentes detectados, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) foram os mais frequentes, compondo um perfil elemental básico recorrente para todos os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubibetala*. As amostras de Cabi e Híbrido não foram submetidas à análise por EDX e, portanto, não foram consideradas nas interpretações elementares.

De modo geral, as análises permitiram reconhecer padrões de deposição mineral associados a regiões micromorfológicas específicas (Fig. 5), contribuindo para a compreensão da organização estrutural das paredes celulares e de possíveis implicações funcionais relacionadas à rigidez e especialização tecidual. Apesar de variações pontuais na intensidade relativa de determinados elementos (Fig. 5), os resultados mostraram-se mais informativos para a interpretação dos processos de biomineralização do que como caracteres taxonômicos, sendo empregados como suporte interpretativo às análises morfoanatômicas apresentadas a seguir.

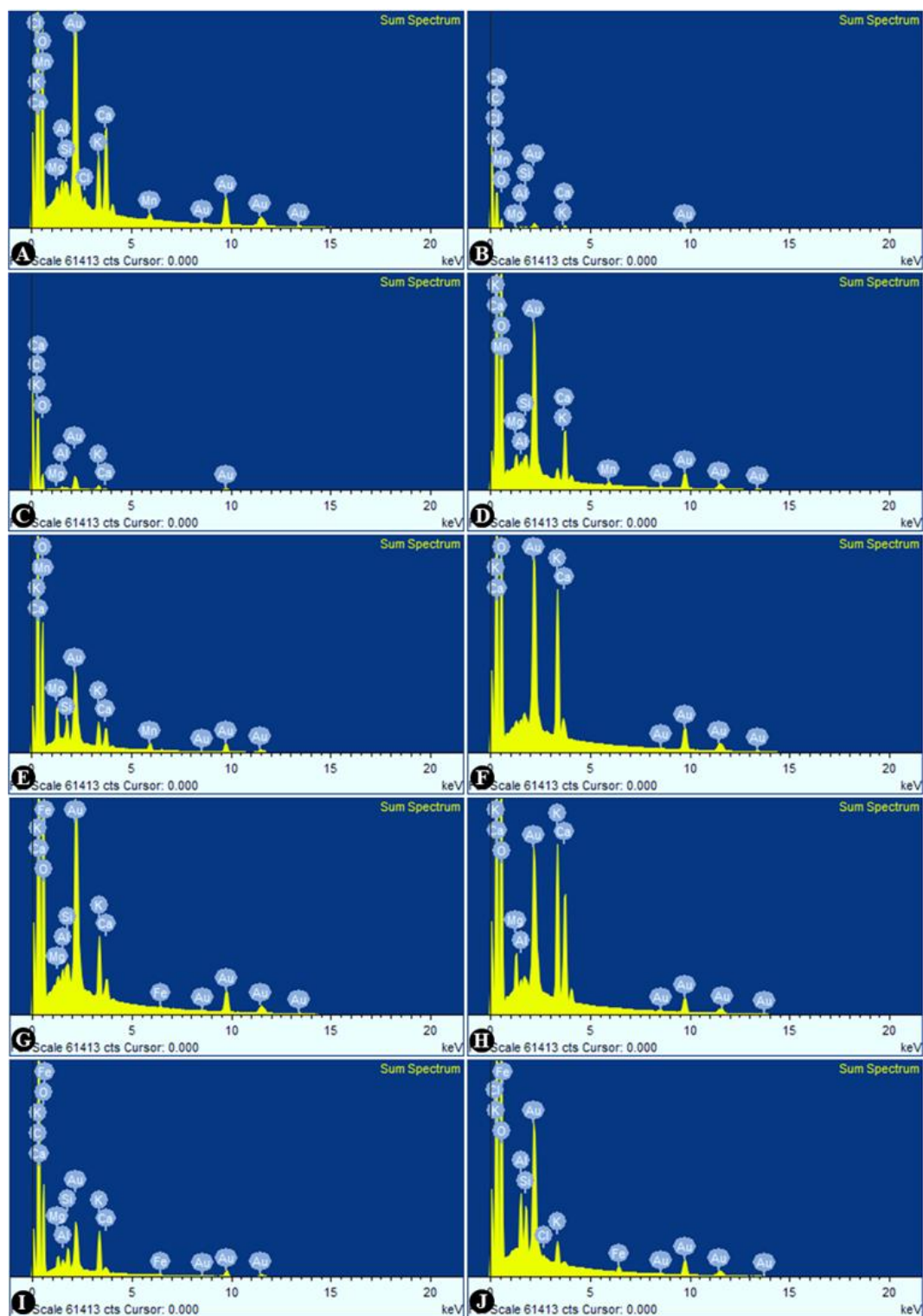


Figura 5. Espectros de energia dispersiva de raios X (EDX) ilustrando o perfil elemental em diferentes estruturas vegetativas de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi* (A–D), *Alicia macrodisca* (H), *Diplopterys cabrerana* (I) e *D. pubipetala* (J). A) glândula foliar de Arara; B) glândula foliar de Caupuri; C) pecíolo de Ourinho; D) pecíolo de Pajezinho; E) tricoma de Pajezinho; F) pecíolo de Quebrador; G) pecíolo de Tucunacá; H) tricoma de *A. macrodisca*; I) tricoma de *D. cabrerana*; J) glândula foliar de *D. pubipetala*.

No pecíolo, potássio (K) e cálcio (Ca) constituíram os elementos mais recorrentes, apresentando variação quantitativa entre os taxa analisados, sem diferenciação taxonômica consistente. Entre os elementos de ocorrência mais restrita, destacaram-se cloro (Cl), ferro (Fe) e manganês (Mn). Cl foi detectado em Arara (1,33%), *D. cabrerana* (0,31%) e *D. pubipetala* (0,29%). Fe ocorreu em Arara (0,20%), Tucunacá (0,23%, Fig. 5G) e *D. pubipetala*, nesta última com o maior teor registrado para a estrutura (3,15%). O Mn apresentou distribuição restrita, sendo registrado apenas em Arara (0,27%) e Pajezinho (0,62%, Fig. 5D). Adicionalmente, titânio (Ti) foi observado exclusivamente no pecíolo de *D. pubipetala* (0,22%), configurando a única ocorrência desse elemento entre todas as amostras analisadas.

Nas glândulas peciolares e laminares, K e Ca novamente predominaram, compondo um perfil mineral amplamente compartilhado, acompanhado por magnésio (Mg) e silício (Si) em proporções variáveis. Entre os elementos de ocorrência restrita, o cloro foi detectado apenas em Caupuri (0,06%, Fig. 5B) e *D. pubipetala* (0,40%, Fig. 5J). O ferro atingiu seu maior valor entre todas as estruturas analisadas nas glândulas de Arara (4,45%, Fig. 5A), superando os teores registrados no pecíolo e nos tricomas dessa amostra, enquanto ocorreu em menores concentrações em Tucunacá (0,61%), *D. cabrerana* (0,30%) e *D. pubipetala* (1,59%). O manganês apresentou distribuição restrita, sendo registrado apenas em Arara (0,65%), Caupuri (0,11%, Fig. 5B) e Pajezinho (0,61%).

Nos tricomas, o perfil elemental foi semelhante ao observado nas demais estruturas, com predominância de K e Ca, cujos teores variaram de 0,89 a 10,43% e de 0 a 8,06%, respectivamente, ambos com os maiores valores registrados em Quebrador. Entre os elementos de ocorrência restrita, destacou-se o enxofre (S), observado exclusivamente nos tricomas de Arara (2,89%), constituindo a única ocorrência desse elemento em todo o conjunto analisado. O ferro apresentou distribuição pontual, sendo detectado apenas em *D. cabrerana* (0,11%, Fig. 5I) e *D. pubipetala* (2,59%). O manganês também exibiu ocorrência restrita, sendo registrado somente em Arara (1,62%) e Pajezinho (3,04%, Fig. 5E). Cloro não foi detectado em tricomas de nenhum dos taxa analisados.

Anatomia de pecíolo

O pecíolo apresentou variação anatômica entre os taxa analisados (Fig. 6), principalmente relacionada a forma, quantidade de feixes vasculares acessórios e abundância de drusas no parênquima. Quanto à forma geral, o padrão mais frequente foi o pecíolo côncavo-convexo, observado em *B. caapi* etnotaxa Arara, Caupuri, Híbrido, Pajezinho, Quebrador, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* (Fig. 6A, C, F, I, J). Pecíolos plano-convexos foram registrados em Cabi (Fig. 6D), Ourinho (Fig. 6K) e Tucunacá (Fig. 6H). Em Arara, além da forma côncavo-convexo o pecíolo também apresentou projeções laterais aliformes predominantes (Fig. 6A), assim como *D. cabrerana* (Fig. 6J).

Em todos os taxa, o feixe vascular principal foi colateral, disposto em arco aberto. A ausência de invaginações foi observada em Arara, Cabi, Caupuri, Híbrido, Ourinho, Pajezinho, Quebrador, Tucunacá e *D. cabrerana* (Fig. 6A, C-H, J-L). Em *A. macrodisca*, o feixe vascular apresenta arco aberto com extremidades convolutas (Fig. 6I), enquanto em *D. pubipetala* foram observados feixes colaterais em arco aberto com presença ou ausência de invaginações.

Feixes vasculares acessórios estiveram presentes em todos os taxa, variando quanto ao número e à disposição. O padrão geral foi observado em Cabi, Caupuri, Ourinho, Pajezinho, Quebrador, Tucunacá e *A. macrodisca* que apresentaram apenas um par de feixes vasculares acessórios (Fig. 6C-D, F-I, K). Híbrido, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* de um a dois pares (Fig. 6J). Em Arara observados de um a três pares de feixes acessórios (Fig. 6A-B).

A ocorrência de drusas no pecíolo apresentou variação marcante entre os etnotaxa. Drusas muito abundantes, com contagens superiores a 90 por secção, foram registradas em Arara (Fig. 6A), Caupuri (Fig. 6C), Híbrido, Ourinho (Fig. 6K-L) e Tucunacá (Fig. 6G-H), distribuídas principalmente no parênquima fundamental e medular, com ocorrência rara no colênquima subepidérmico e elevada no floema do feixe vascular principal. Em contraste, drusas raras a pouco abundantes, com contagens inferiores a 30 por secção, foram observadas em Quebrador (Fig. 6F), *A. macrodisca* (Fig. 6I) e *D. pubipetala*, localizadas predominantemente no parênquima medular, com ocorrência esporádica no colênquima subepidérmico e no floema do feixe vascular principal. Cristais prismáticos não foram observados no pecíolo de nenhum dos taxa analisados, sendo os biominerais restritos à forma de drusas.

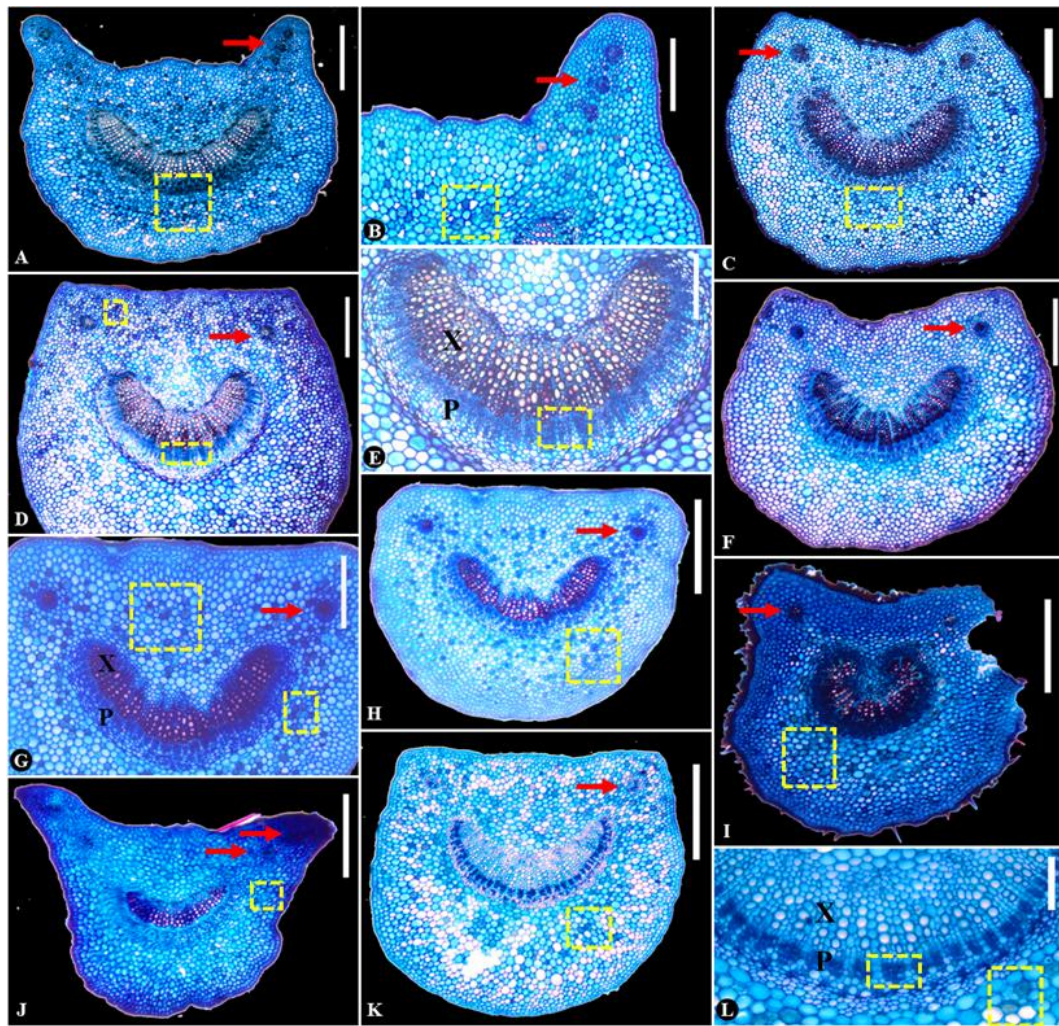


Figura 6. Secções transversais do pecíolo de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*, evidenciando a forma do pecíolo, a organização do sistema vascular e a distribuição de drusas. A) Visão geral de Arara com forma côncavo-convexa com projeções laterais aliformes, feixe vascular principal em arco aberto, três feixes vasculares acessórios e elevada densidade de drusas. B) Detalhe dos feixes vasculares acessórios com 3 pares de feixes localizados nas projeções laterais e presença de drusas em Arara. C) Pecíolo de Caupuri com forma côncavo-convexa, presença de feixes vasculares acessórios e drusas. D) Visão geral Cabi com pecíolo plano-convexo, feixes vasculares acessórios e drusas. E) Detalhe do feixe vascular principal de Cabi disposto em arco aberto e destaque para a presença de drusas do floema. F) Pecíolo de Quebrador com forma côncavo-convexa e presença rara ou ausência de drusas no parênquima. G) Detalhe do pecíolo de Tucunáca com feixe vascular principal disposto em arco aberto, um par de feixes vasculares acessórios e a presença de drusas no parênquima e floema. H) Visão geral do pecíolo de Tucunacá com forma plano-convexo. I) Pecíolo de *A. macrodisca* com forma côncavo-convexa, feixe vascular principal em

arco aberto com extremidades convolutas, presença de feixes vasculares acessórios e drusas. J) Visão geral do pecíolo de *D. cabrerana* com forma concavo-convexa côncavo-convexa com projeções laterais aliformes, feixes vasculares acessórios com 2 pares de feixes localizados nas projeções laterais e presença de drusas. K) Pecíolo de Ourinho com forma plano-convexa, feixe vascular principal disposto em arco aberto, um par de feixes vasculares acessórios e a presença de drusas. L) Detalhe do feixe vascular principal de Ourinho disposto em arco aberto e destaque para a presença de drusas principalmente no floema. Marcações amarelas destacam a presença de drusas. Setas vermelhas indicam feixes vasculares acessórios. X= xilema. P = floema. Escala: A, C, E-G, I, K-L, N, P-Q=50µm; B, D, H, J, M=25µm, O, R=10µm.

Nervura mediana

A nervura mediana apresentou padrão anatômico amplamente compartilhado entre os etnotaxa de *B. caapi* analisados (Fig. 7), sobretudo na forma e organização do feixe vascular principal. As principais diferenças foram observadas na avaliação quando considerados os padrões entre as espécies *B. caapi* (Fig. 7 A-D, F), *A. macrodisca* (Fig. 7I), *D. cabrerana* (Fig. 7H) e *D. pubipetala* (Fig. 7K).

A forma biconvexa foi predominante, ocorrendo em Arara, Cabi, Caupuri, Ourinho, Quebrador, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* (Fig. 7A-B, H, K). Forma plano-convexa a biconvexa foi observada em Híbrido, Pajezinho, Tucunacá e *A. macrodisca* (Fig. 7C, F, I).

O feixe vascular principal apresentou organização colateral em arco aberto e sem invaginações em Arara, Cabi, Caupuri, Híbrido, Ourinho, Pajezinho, Quebrador, Tucunacá e *D. pubipetala* (Fig. 7A-D, F, G, K). Em *A. macrodisca*, o feixe vascular é colateral em arco fechado, sem invaginações (Fig. 7I). Feixes vasculares acessórios na nervura mediana foram ausentes na maioria dos taxa, ocorrendo apenas em Híbrido e *D. cabrerana*, quando presentes, com forma circular nas extremidades do feixe principal (Fig. 7E-F, H). A bainha de fibras esteve ausente em todos os taxa, exceto *A. macrodisca*, em que as fibras formam uma faixa contínua mais densa ao redor do xilema e floema (Fig. 7I).

A presença de drusas na nervura mediana apresentou variação entre os taxa. O padrão mais frequente correspondeu a contagens entre 10 e 30 drusas por secção, observado em Arara, Híbrido, Ourinho, Pajezinho, Quebrador, Tucunacá e *A. macrodisca*, distribuídas predominantemente no parênquima medular e presentes no

floema (Fig. 7A, C, F, I). Contagens superiores a 30 drusas por secção foram registradas em Cabi e Caupuri, também predominando no parênquima medular e abundantes no floema (Fig. 7B, D). Em *D. cabrerana*, as drusas foram raras, com contagem inferior a 10 por secção, restritas principalmente ao parênquima medular e ausentes no floema (Fig. 7H). Em *D. pubipetala*, drusas não foram observadas (Fig. 7K). Cristais prismáticos também não foram registrados na nervura mediana de nenhum dos taxa analisados.

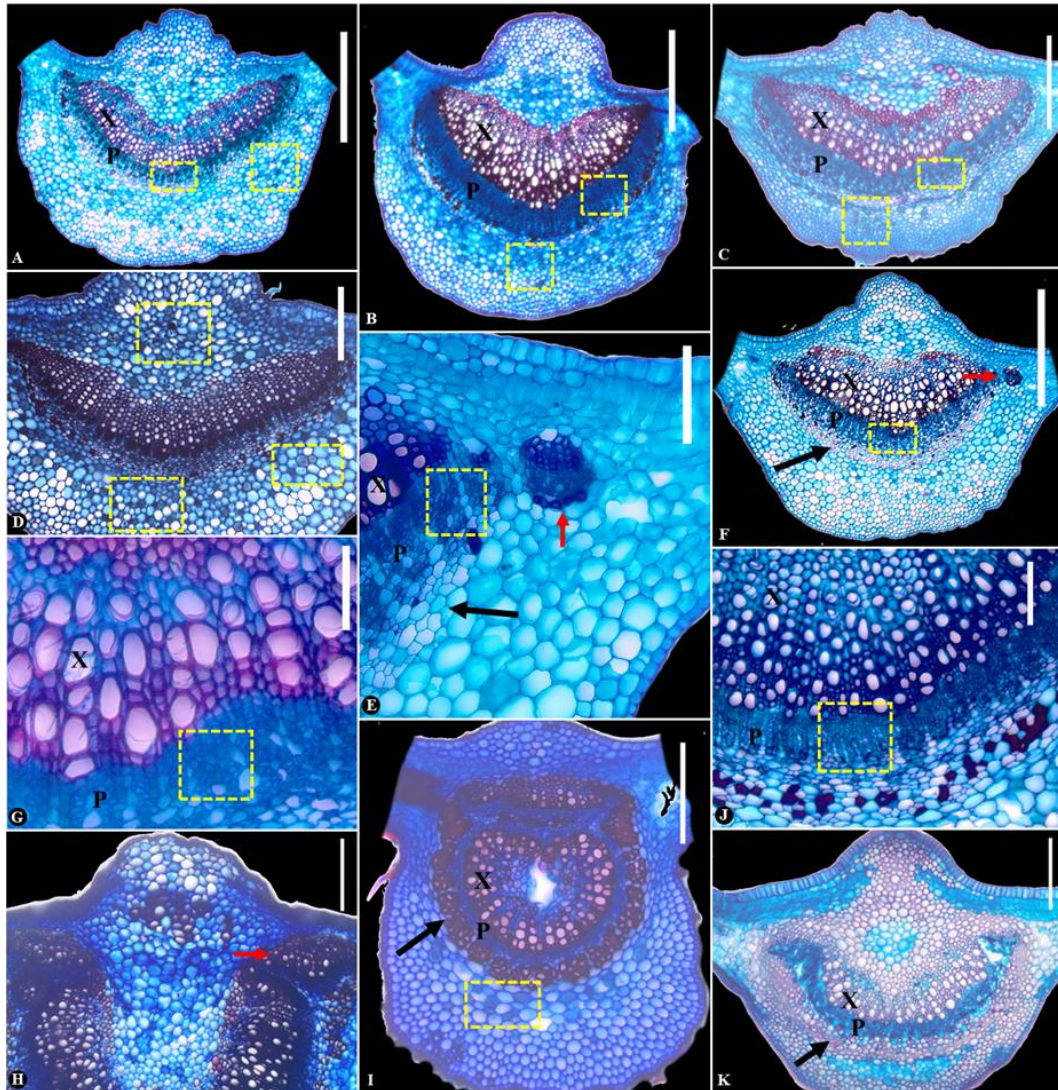


Figura 7. Secções transversais da nervura mediana de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*, evidenciando a forma da nervura, a organização dos feixes vasculares principais e acessórios e a distribuição de drusas. A) Nervura mediana de Arara com forma biconvexa, feixe vascular principal em arco aberto e presença de drusas. B) Arranjo geral da nervura mediada de Cabi com forma biconvexa, feixe vascular principal em arco aberto e presença de drusas. C) Nervura mediana de Tucunacá com forma plano convexa a levemente biconvexa, feixe vascular

principal em arco aberto e presença de drusas. D) Destaque da nervura mediana de Caupuri com feixe vascular principal em arco aberto e abundância de drusas. E) Detalhe da nervura mediana de Híbrido com feixe vascular acessório de forma circular nas extremidades do feixe principal e presença de drusas no floema. F) Arranjo geral da nervura mediana de Híbrido com forma plano convexa a biconvexa, feixe vascular principal em arco aberto e feixe vascular acessório de forma circular. G) Destaque do feixe vascular principal da nervura mediana de Tucunacá com presença de drusas no floema. H) Destaque da nervura mediana de *D. cabrerana* evidenciando feixe vascular acessório nas extremidades do feixe principal. I) Nervura mediana de *A. macrodisca* com forma plano-convexa, feixe vascular principal em arco fechado e presença de drusas. J) Destaque da nervura mediana de Quebrador com presença de drusas no floema do feixe vascular principal. K) Visão geral da nervura mediana de *D. pubipetala* com forma biconvexa, feixe vascular principal em arco aberto. Marcações amarelas destacam a presença de drusas. Setas vermelhas indicam feixes vasculares acessórios. Setas pretas indicam a presença de fibras que formam faixas próximas ao feixe vascular principal. X= xilema. P = floema. Escala: A-B, F=50µm; C-D, H-I=25µm; E, G, J=10µm.

Bordo foliar e mesofilo

O bordo e mesofilo foliares apresentam organização dorsiventral assimétrica em todos os taxa analisados (Fig. 8). As epidermes adaxial e abaxial foram exclusivamente uniestratificada para todos os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* (Fig. 8). A epiderme adaxial apresentou formato variando entre quadrado a retangular arredondado para todos os taxa (Fig. 8), enquanto que a epiderme abaxial foi predominantemente retangular arredondada (Fig. 8D-F, K), exceto para *A. macrodisca* (Fig. 8L) em que foram observadas células piriformes, com projeção externa arredondada.

O parênquima paliçádico foi predominantemente unisseriado em Arara (Fig. 8A), Cabi, Caupuri, Híbrido (Fig. 8E-F), Ourinho, Pajezinho, Quebrador, Tucunacá (Fig. 8J), *A. macrodisca* e *D. cabrerana* (Fig. 8K), enquanto *D. pubipetala* apresentou uma a duas camadas, especialmente próximas aos feixes e ao bordo foliar. As células do paliçádico foram, em todos os taxa, mais altas que largas, com proporção mínima de duas vezes a altura em relação à largura. Proporções iguais ou superiores a quatro vezes foram registradas em Arara (Fig. 8A), Híbrido, Ourinho, Quebrador e Pajezinho (Fig. 8H-I), sendo que este último apresentou proporções iguais ou superiores a seis vezes. Proporções inferiores a duas vezes foram observadas em *D. cabrerana* (Fig. 8K). Quanto ao formato

celular, o padrão predominante correspondeu a células longas e uniformes com aspecto fimbriado em Arara (Fig. 8A), Caupuri, Pajezinho (Fig. 8H-I) e Quebrador, e a células longas de formato predominantemente retangular com contorno sinuoso a irregular foram observadas em Cabi (Fig. 5B-C), Híbrido, Ourinho, Tucunacá (Fig. 8J), *A. macrodisca* e *D. pubipetala*, enquanto células com formato predominantemente quadrado foram registradas em *D. cabrerana* (Fig. 8K).

O parênquima lacunoso apresentou predominantemente mais de cinco camadas na maioria dos taxa, incluindo Arara, Cabi (Fig. 8B-C), Caupuri, Híbrido (Fig. 8E-F), Ourinho (Fig. 8G), Pajezinho, Quebrador e Tucunacá e *A. macrodisca* (Fig. 8L). *D. cabrerana* (Fig. 8K) variou de três a cinco e *D. pubipetala* de três a quatro camadas. Células proporcionalmente mais largas que altas, com proporção igual ou superior a três vezes, foram registradas em Arara (Fig. 8A), Cabi, Híbrido, Ourinho (Fig. 8G), Tucunacá (Fig. 8J) e *A. macrodisca*. Organização alternada de células retangulares e circulares formando camadas foi observada em Arara (Fig. 8A), Cabi, Híbrido (Fig. 8F), Ourinho e Pajezinho (Fig. 8I). A proporção de parênquima lacunoso superior a 60% foi registrada em Arara (Fig. 8A), Caupuri, Híbrido (Fig. 8E-F), Quebrador (Fig. 8D), *D. cabrerana* (Fig. 8K) e *D. pubipetala*.

Cristais prismáticos estiveram presentes no mesofilo de Arara (Fig. 8A), Cabi (Fig. 8C), Caupuri, Híbrido (Fig. 8F), Ourinho, Pajezinho (Fig. 8I), Quebrador (Fig. 8D) e Tucunacá (Fig. 8J). Em Arara (Fig. 8A), Híbrido (Fig. 8F) e Ourinho (Fig. 8G), os cristais foram mais frequentes no parênquima paliádico; em Caupuri e Quebrador (Fig. 8D), predominaram no lacunoso; em Cabi (Fig. 8C) e Pajezinho ocorreram em ambos os parênquimas, com variação na abundância. Em *A. macrodisca* (Fig. 8L), os cristais foram raros. Cristais prismáticos não foram observados em *D. cabrerana* e *D. pubipetala*; nestas espécies, foram registradas drusas no mesofilo, predominando no parênquima lacunoso em *D. cabrerana* (Fig. 8K) e ocorrendo em ambos os parênquimas em *D. pubipetala*.

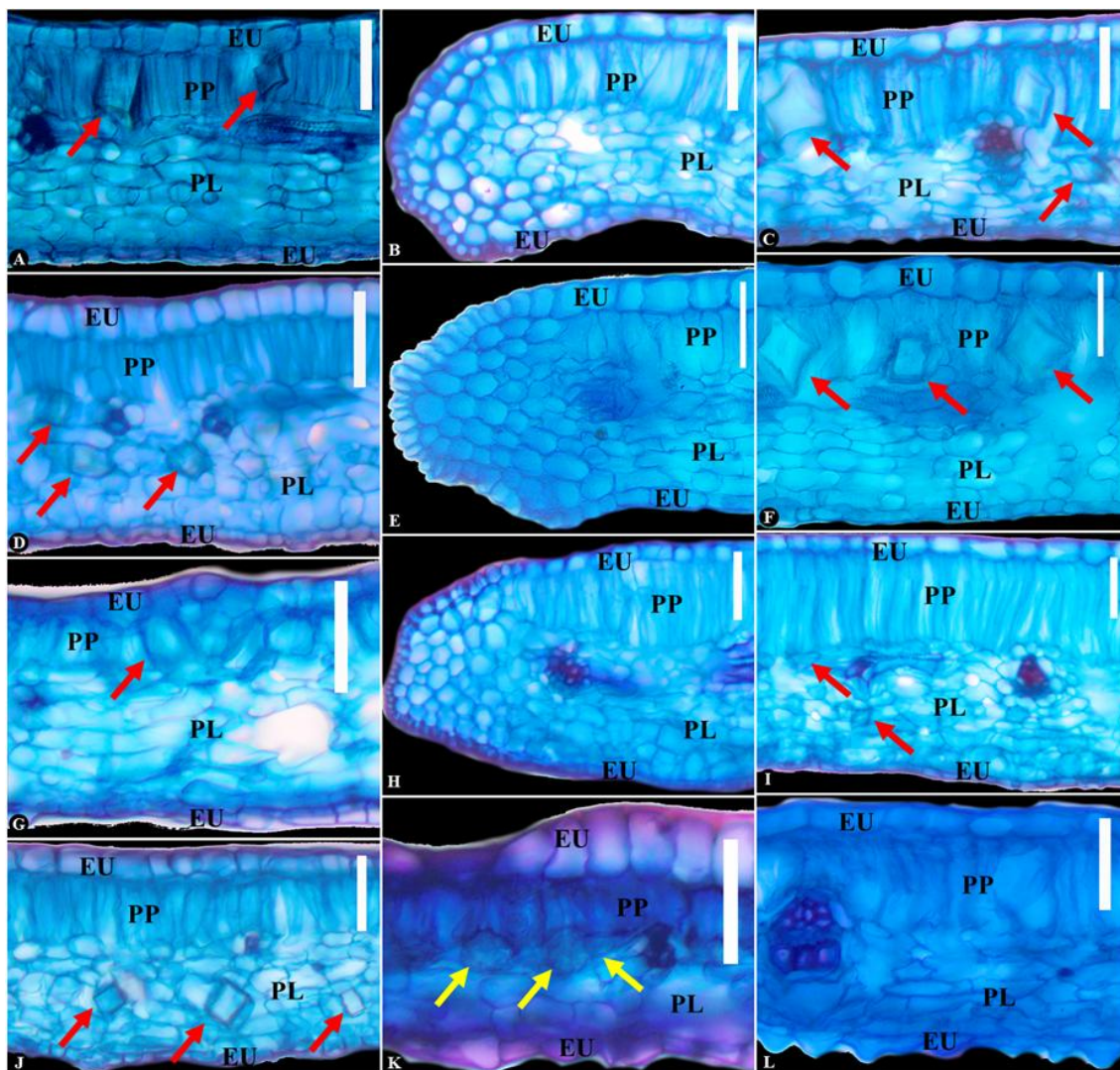


Figura 8. Secções transversais da margem e região intercostal da lâmina foliar de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*, evidenciando a organização dos arranjos parenquimáticos, presença e distribuição de cristais e drusas. A) Região intercostal de Arara com predominância de parênquima lacunoso e presença de cristais prismáticos no parênquima paliçádico. B-C) Margem e região intercostal da lâmina de Cabi com presença de cristais prismáticos nos parênquimas paliçádico e lacunoso. D) Região intercostal de Quebrador com presença de cristais prismáticos nos parênquimas paliçádico e lacunoso. E-F) Margem e região intercostal da lâmina de Híbrido com presença predominante de cristais prismáticos no parênquima paliçádico. G) Região intercostal de Ourinho com presença de cristais prismáticos no parênquima paliçádico. H-I) Margem e região intercostal da lâmina de Pajezinho com parênquima paliçádico em formato fimbriado e presença de cristais prismáticos. J) Região intercostal de Tucunacá com presença de cristais prismáticos no parênquima lacunoso. K) Região intercostal de *D. cabrerana* com presença de drusas no

parênquima lacunoso. L) Região intercostal de *A. macrodisca* com epiderme abaxial piriformes, com projeção externa arredondada. Setas vermelhas indicam cristais prismáticos. Setas amarelas indicam drusas. EU= epiderme uniestratificada. PP= parênquima paliádico. PL= parênquima lacunoso. Escala=5µm.

A análise da epiderme em preparados paradérmicos evidenciou elevada uniformidade estrutural entre os taxa analisados (Fig. 9). Os estômatos ocorreram exclusivamente na face abaxial da lâmina foliar em todos os táxons, caracterizando folhas hipoestomáticas. O complexo estomático foi classificado como anomocítico em Arara (Fig. 9A), Cabi, Caupuri, Híbrido (Fig. 9C), Ourinho (Fig. 9D), Pajezinho, Quebrador, Tucunacá, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* (Fig. 9I) e *D. pubipetala*. Os estômatos localizaram-se predominantemente ao nível das células epidérmicas comuns, podendo apresentar leve projeção, sem formação de depressões marcadas. As células-guarda apresentaram formato reniforme em todos os taxa analisados.

Cicatrizes de tricomas foram registradas na maioria dos taxa (Fig. 9), mantendo padrão estrelado formado por 4 a 8 células dispostas radialmente ao redor da célula pedal. Predominaram células mais largas que longas, organizadas em arranjo rosetado radial ao redor da célula pedal. Essas cicatrizes ocorreram em ambas as faces da lâmina foliar na maior parte dos taxa, com maior frequência na face abaxial (Fig. 9A-E, G). Em Quebrador e *D. cabrerana*, a distribuição ocorreu em proporções semelhantes entre as faces, sendo escassa nesta última. Em *D. pubipetala*, cicatrizes de tricomas foram predominantemente ausentes em ambas as faces da epiderme foliar (Fig. 9J).

Cristais prismáticos foram observados na epiderme adaxial de Arara, Caupuri, Híbrido, Pajezinho (Fig. 9E) e Tucunacá (Fig. 9). Em Caupuri e Híbrido, a ocorrência foi esporádica, com menos de cinco cristais por secção analisada. Em contraste, Arara, Pajezinho (Fig. 9E) e Tucunacá (Fig. 9F) apresentaram ocorrência expressiva, com mais de 30 cristais por secção, tornando-se visualmente conspícuos nas imagens. Nos demais etnotaxa, cristais prismáticos não foram registrados na epiderme.

A origem desses cristais não pôde ser determinada a partir dos preparados paradérmicos, podendo corresponder a estruturas provenientes do mesofilo subjacente; contudo, sua presença e abundância foram registradas exclusivamente em alguns etnotaxa.

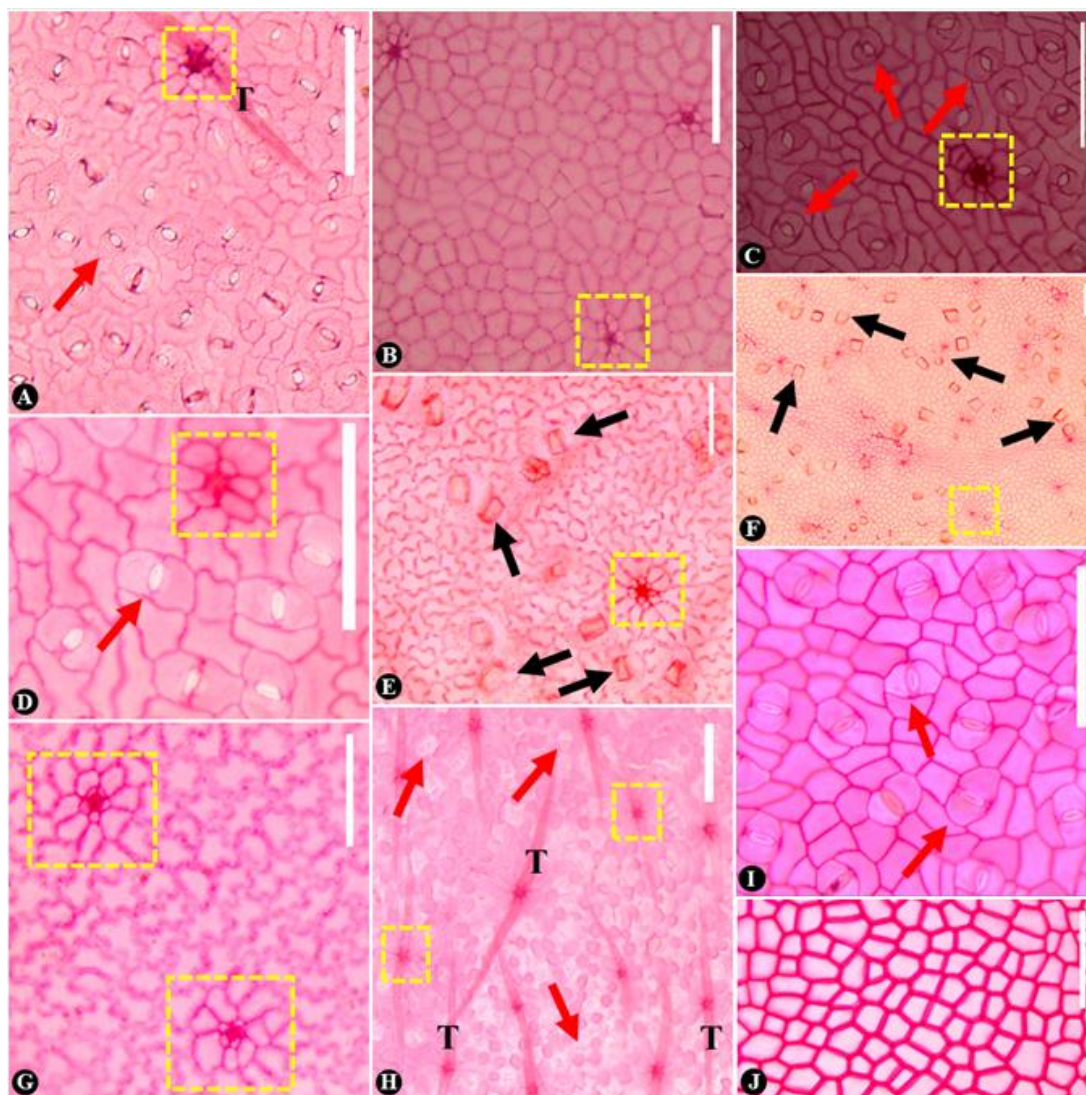


Figura 9. Preparados paradermicos da epiderme adaxial e abaxial da lâmina foliar de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*, evidenciando o complexo estomático, cicatrizes de tricomas e a presença de cristais prismáticos. A) Face abaxial de Arara com presença de estômatos e tricoma. B) Face adaxial de Caupuri com presença de cicatrizes de tricomas. C) Face abaxial de Híbrido com estômatos e cicatriz de tricoma. D) Face abaxial de Ourinho com stômatos e cicatriz de tricoma. E) Face adaxial de Pajezinho com presença de cristais prismáticos e cicatriz de tricoma. F) Face adaxial de Tucunacá com presença de cistrais prismáticos. G) Face adaxial de *A. macrodisca* com cicatriz de tricoma. H) Face abaxial de *A. macrodisca* com estômatos e tricomas. I) Face abaxial de *D. cabrerana* com estômatos. J) Face adaxial de *D. pubipetala*. Marcações amarelas destacam cicatrizes de tricomas. Setas vermelhas indicam estômatos. Setas pretas indicam cristais prismáticos. T= tricoma. Escala=10μm.

Estrutura multivariada e padrões de similaridade da variação morfoanatômica

A Tabela 2 apresenta a matriz binária de presença (1) e ausência (0) dos 63 caracteres morfoanatômicos codificados para os etnotaxa de *B. caapi* e para as espécies relacionadas *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*. Considerando o conjunto completo de taxa analisados (etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*), evidencia-se três classes principais de caracteres: 20 caracteres conservados (>70% de frequência), 34 caracteres variáveis informativos (presentes em, pelo menos dois taxa) e nove caracteres exclusivos (individuais).

Os caracteres conservados (Tabela 2) incluíram a presença de glândula no pecíolo (1), glândulas na transição lâmina–pecíolo (2), células epidérmicas adaxiais proporcionalmente mais altas (5), padrão retangular-arredondado das células epidérmicas adaxiais (7), células epidérmicas abaxiais predominantemente retangulares (8), presença de cicatrizes de tricomas em preparados paradérmicos (9–11), mesofilo unisseriado quanto ao parênquima paliçádico (12), células paliçádicas ao menos duas vezes mais altas que largas (17), presença de cristais prismáticos no mesofilo (24), nervura mediana biconvexa com feixe colateral em arco aberto (29–30), presença de drusas na nervura mediana (32–33), glândulas do pecíolo de forma discóide (44), glândulas circulares achatadas/discóides na face abaxial (54) e estômatos restritos à face abaxial (63). Esse conjunto indica elevado compartilhamento estrutural entre os etnotaxa e as demais espécies analisadas, refletindo a proximidade morfológica dentro das linhagens associadas à ayahuasca.

Os 34 caracteres variáveis informativos (Tabela 2) foram: morfologia do pecíolo, padrões de cera epicuticular, abundância e distribuição de drusas nas proporções celulares do mesofilo e número de feixes vasculares acessórios. Parte desses apresentou distribuição restrita, ocorrendo em apenas dois ou três taxa, como o comprimento máximo do pecíolo até 1,0 cm (3), parênquima lacunoso com até cinco camadas celulares (20), presença de drusas no mesofilo (28), abundância de tricomas malpighiáceos no pecíolo (39), lâmina foliar abaxial glabra ou com rara ocorrência de tricomas (53) e superfície abaxial com cera epicuticular de padrão irregular a granular (62). Esses caracteres contribuíram de forma expressiva para a heterogeneidade estrutural detectada nas análises comparativas.

Para os nove caracteres exclusivos (Tabela 2), *D. cabrerana* distinguiu-se pela presença de parênquima paliçádico com células predominantemente quadrangulares (16) e *A. macrodisca* apresentou como caráter exclusivo a cera epicuticular filamentosa

formando rede contínua na face abaxial (61). Entre os etnotaxa de *B. caapi*, registraram-se como caracteres exclusivos: células paliçádicas ao menos seis vezes mais altas que largas em Pajezinho (19), presença exclusiva de glândula no pecíolo em Arara (40), glândula oval no pecíolo em Pajezinho (47), glândula discóide no pecíolo em Quebrador (48) e combinação de glândulas elíptico-ovadas e globosas na face abaxial em Arara (57), além da associação entre glândulas circulares achatadas/discóides e cera epicuticular em placas amorfas em Caupuri (58, 60).

Tabela 2. Matriz de presença (1) e ausência (0) dos caracteres morfoanatômicos codificados para etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*. (1) glândula no pecíolo; (2) glândulas próximas à transição lâmina–pecíolo; (3) comprimento máximo do pecíolo até 1,0 cm; (4) comprimento máximo do pecíolo superior a 1,5 cm; (5) altura das células comuns da epiderme proporcionalmente maior na face adaxial; (6) células comuns da epiderme adaxial mais largas que altas; (7) células comuns da epiderme adaxial predominantemente retangulares-arredondadas, com paredes lisas a levemente sinuosas; (8) células comuns da epiderme abaxial predominantemente retangulares, com paredes lisas; (9) cicatrizes de tricomas observadas em preparo paradérmico; (10) cicatrizes de tricomas com células adjacentes à célula pedal mais longas que largas, dispostas em padrão radial estrelado; (11) cicatrizes de tricomas presentes em ambas as faces, com maior frequência na face abaxial; (12) mesofilo com apenas uma camada de parênquima paliçádico; (13) parênquima paliçádico constituído por células longas e uniformes, com aspecto fimbriado; (14) parênquima paliçádico de células longas e uniformes, predominantemente retangulares; (15) parênquima paliçádico de células longas com contorno sinuoso e irregular; (16) parênquima paliçádico com células predominantemente quadrangulares; (17) parênquima paliçádico com células ao menos duas vezes mais altas que largas; (18) parênquima paliçádico com células ao menos quatro vezes mais altas que largas; (19) parênquima paliçádico com células ao menos seis vezes mais altas que largas; (20) parênquima lacunoso com até cinco camadas celulares; (21) parênquima lacunoso com organização em camadas alternadas de células retangulares e circulares; (22) parênquima lacunoso com células pelo menos três vezes mais largas que altas; (23) proporção de parênquima lacunoso superior a 60% do mesofilo; (24) mesofilo com presença de cristais prismáticos; (25) mesofilo com presença rara ou ausência de cristais prismáticos; (26) cristais prismáticos predominantemente no parênquima paliçádico; (27) cristais prismáticos predominantemente no parênquima lacunoso; (28) mesofilo com presença de drusas; (29) nervura mediana predominantemente biconvexa; (30) nervura mediana com feixe vascular em arco aberto; (31) nervura mediana com feixes vasculares acessórios; (32) nervura mediana com drusas no parênquima; (33) nervura mediana com drusas no floema; (34) nervura mediana com drusas abundantes no parênquima (contagem >30); (35) pecíolo predominantemente côncavo-convexo, sem projeções laterais definidas; (36) pecíolo predominantemente côncavo-convexo, com projeções laterais aliformes; (37) pecíolo predominantemente plano-convexo; (38) pecíolo com um par de feixes vasculares acessórios; (39) pecíolo com um a dois pares de feixes vasculares acessórios; (40) pecíolo com um a três pares de feixes vasculares acessórios; (41) pecíolo com drusas abundantes, predominantemente nas regiões parenquimáticas (contagem >90); (42) pecíolo com drusas raras a pouco abundantes, predominantemente nas regiões parenquimáticas (contagem <30); (43) pecíolo com tricomas malpighiáceos abundantes; (44) pecíolo com presença de glândulas; (45) glândulas do pecíolo predominantemente circulares; (46) glândulas do pecíolo predominantemente elipsoides; (47) glândulas do pecíolo predominantemente ovais; (48) glândulas do pecíolo predominantemente discóides, com bordas salientes; (49) superfície do pecíolo com cera formando camada fina e contínua; (50) lâmina foliar com face adaxial glabra; (51) glândulas presentes na face adaxial da lâmina foliar; (52) face adaxial com cera epicuticular amorfa; (53) lâmina foliar com face abaxial glabra ou com rara ocorrência de tricomas; (54) lâmina foliar com face abaxial glandular; (55) face abaxial com mais de um tipo/forma glandular predominante; (56) face abaxial com glândulas circulares e globosas; (57) face abaxial com glândulas elíptico-ovadas e globosas; (58) face abaxial com glândulas circulares achatadas e discóides; (59) superfície abaxial com cera epicuticular em cristais estrelados; (60) superfície abaxial com cera epicuticular em placas amorfas; (61)

No contexto interespecífico, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* diferenciaram-se de *B. caapi* por combinações estruturais próprias. Em *A. macrodisca*, o principal caráter distintivo concentrou-se na micromorfologia da superfície foliar, com presença exclusiva de cera epicuticular filamentosa formando rede contínua na face abaxial (61), padrão não registrado nos demais taxa e com elevado valor diagnóstico morfológico. As espécies *D. cabrerana* e *D. pubipetala* compartilharam caracteres morfológicos e anatômicos restritos ao gênero no conjunto analisado, incluindo comprimento máximo do pecíolo até 1,0 cm (3), pecíolo com presença de 1 a 2 pares de feixes vasculares acessórios (39), parênquima lacunoso com até cinco camadas celulares (20) e presença de drusas no mesofilo (28). Esse compartilhamento reforça a proximidade estrutural entre as espécies do mesmo gênero, ao passo que a exclusividade do caráter 16 (parênquima paliçádico de células com formato predominantemente quadrado) em *D. cabrerana* sustenta sua distinção específica.

Por sua vez, o conjunto dos etnotaxa de *B. caapi* apresentou sobreposição estrutural e compartilhamento de atributos, incluindo presença de glândulas no pecíolo e na transição lâmina–pecíolo (1–2), mesofilo com parênquima paliçádico unisseriado (12), células paliçádicas ao menos duas vezes mais altas que largas (17), nervura mediana biconvexa com feixe em arco aberto (29–30) e estômatos restritos à face abaxial (63). Esse padrão de coesão morfoanatômica reforça a interpretação dos etnotaxa como integrantes de uma mesma entidade específica, apesar da variação interna observada.

A análise do conjunto completo de dados, incluindo os etnotaxa de *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, apresentou similaridade média de 0,490 com base no índice de Jaccard. O dendrograma UPGMA (Fig. 10A), construído a partir da matriz de dissimilaridade de Jaccard, apresentou elevada correlação cofenética ($r = 0,973$), indicando alta concordância entre a estrutura hierárquica e as distâncias originais. Na estrutura recuperada, os etnotaxa de *B. caapi* formaram um agrupamento principal, dentro do qual se observaram subagrupamentos sucessivos. *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* posicionaram-se externamente ao agrupamento de *B. caapi*. As espécies de *Diplopterys* (*D. cabrerana* e *D. pubipetala*) formaram um subgrupo próprio, enquanto *A. macrodisca* ocupou posição intermediária entre esse subgrupo e o agrupamento composto pelos etnotaxa de *B. caapi*.

O bubblemap de similaridade (Fig. 10B) evidenciou maiores valores de similaridade entre os etnotaxa de *B. caapi* (predominantemente entre 0,6 e 0,8). As comparações envolvendo *D. cabrerana* e *D. pubipetala* apresentaram valores mais baixos

de similaridade, enquanto *A. macrodisca* exibiu valores intermediários em relação aos etnotaxa de *B. caapi* (aproximadamente entre 0,4 e 0,55), em concordância com sua posição intermediária no dendrograma.

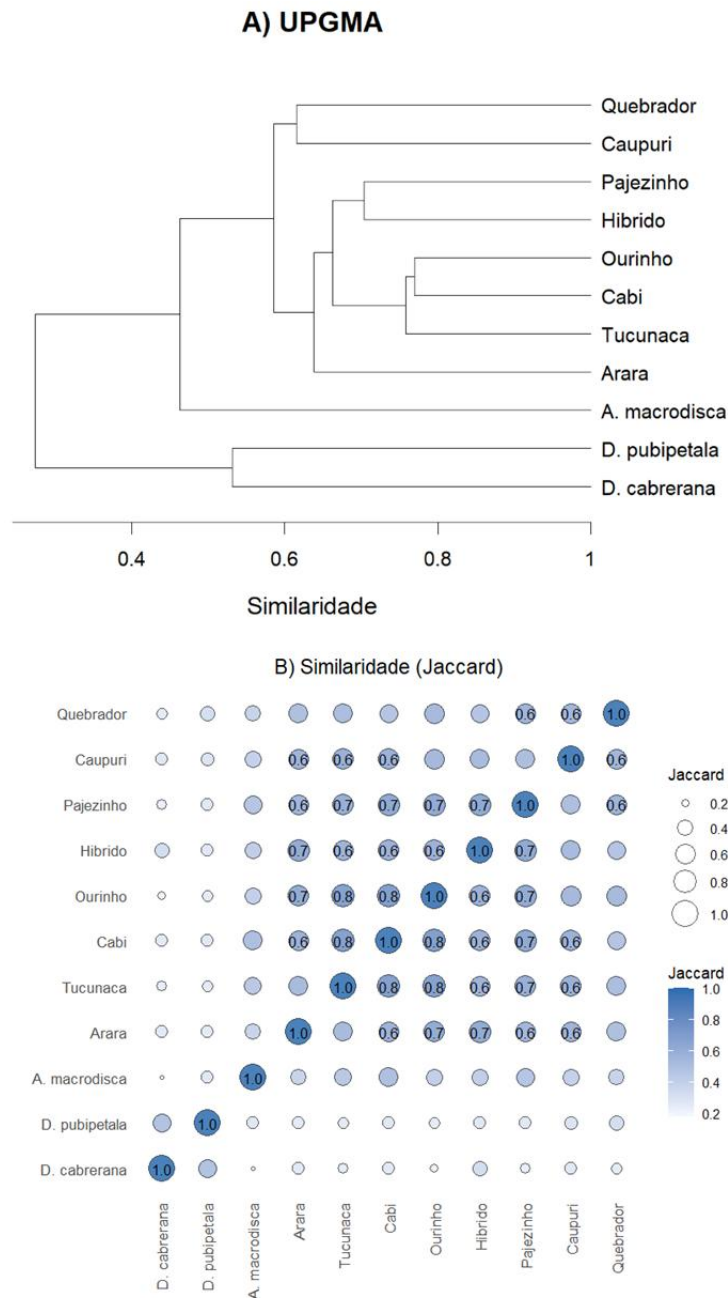


Figura 10. Análise de similaridade morfoanatômica baseada no índice de Jaccard para etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*. A) Dendrograma UPGMA com correlação cofenética ($r = 0,973$). B) Bubblemap de similaridade.

A ordenação por PCoA (Fig. 11A), baseada na dissimilaridade de Jaccard, indicou que o primeiro eixo explicou 46,25% da variação total e o segundo eixo 16,76%,

totalizando 63,01% da variação representada nos dois primeiros eixos. No plano bidimensional, os etnotaxa de *B. caapi* concentraram-se no lado esquerdo do eixo 1, com sobreposição parcial entre si. *D. cabrerana* e *D. pubipetala* posicionaram-se no extremo positivo do eixo 1, evidenciando separação clara em relação ao agrupamento principal. *A. macrodisca* ocupou posição superior no eixo 2, mantendo separação espacial em relação aos etnotaxa de *B. caapi*.

A análise NMDS (Fig. 11B) apresentou stress = 0,00007, indicando excelente ajuste bidimensional às dissimilaridades morfoanatômicas. A configuração espacial foi congruente com a PCoA, com os etnotaxa de *B. caapi* agrupados no lado esquerdo da ordenação, enquanto *D. cabrerana* e *D. pubipetala* ocuparam posições isoladas no extremo direito. *A. macrodisca* manteve posição separada, deslocada no eixo vertical da ordenação.

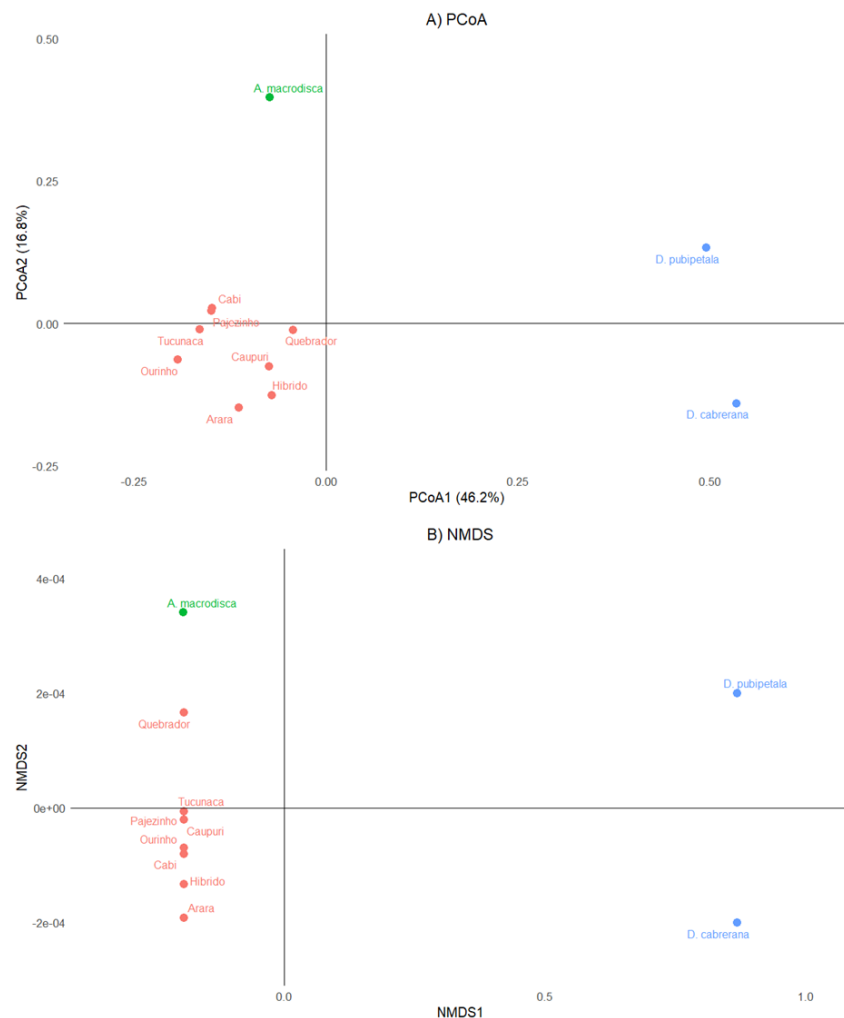


Figura 11. Ordenações multivariadas baseadas no índice de Jaccard para etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*, *Alicia macrodisca*, *Diplopterys cabrerana* e *D. pubipetala*. A) Análise de Coordenadas Principais (PcoA). B) NMDS (stress = 0,00007).

Considerando os padrões de similaridade, agrupamento e ordenação observados nas Figuras 10 e 11, os etnotaxa de *B. caapi* apresentaram elevada coesão estrutural no conjunto completo analisado, evidenciada pela proximidade no espaço multivariado e pela formação de um agrupamento principal consistente nas análises hierárquicas e de ordenação. Ainda assim, a distribuição espacial interna e os subagrupamentos observados indicaram a presença de variação morfoanatômica intraespecífica, refletida na diferenciação relativa entre alguns etnotaxa dentro do grupo principal.

As espécies *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* exibiram padrões morfoanatômicos que promoveram sua segregação interespecífica. *Alicia macrodisca* apresentou separação consistente em relação ao agrupamento de *B. caapi*, enquanto *D. cabrerana* e *D. pubipetala* formaram um subgrupo próprio, sustentado pelo compartilhamento de caracteres morfoanatômicos e pela proximidade nas análises hierárquicas e de ordenação, configurando a segregação do conjunto de *Diplopterys* no contexto analisado.

Quando a análise foi restrita exclusivamente aos etnotaxa de *B. caapi*, observou-se aumento expressivo da similaridade média morfoanatômica, com valor de 0,65 para o índice de Jaccard, superior ao registrado no conjunto de dados completo (0,51). Esse incremento evidencia maior compartilhamento de caracteres estruturais entre os etnotaxa quando analisados isoladamente, refletindo elevada coesão interna do grupo.

O dendrograma UPGMA (Figura 12A) apresentou de 0,81, indicando ajuste adequado entre as distâncias originais e a estrutura hierárquica representada. Diferentemente do dataset completo, no qual havia clara separação entre espécies, o agrupamento entre os etnotaxa revelou distâncias relativamente curtas e organização menos hierarquizada. Observa-se a formação de subconjuntos com alta similaridade, como o agrupamento entre Pajezinho e Ourinho, bem como a proximidade entre Híbrido e Arara. Quebrador e Caupuri posicionaram-se como os etnotaxa mais diferenciados dentro do conjunto, apresentando os menores valores relativos de similaridade no dendrograma e maior distância em relação aos demais etnotaxa.

O bubblemap de similaridade (Figura 12B) confirma esses padrões, evidenciando valores predominantemente moderados a elevados de similaridade par a par ($\geq 0,6$), com diversos pares atingindo valores iguais ou superiores a 0,7. A maior similaridade foi registrada entre Arara e Híbrido (0,8), destacando-se como o par mais próximo dentro do conjunto analisado. Cabi apresentou os valores mais elevados de similaridade geral, compartilhando coeficientes relativamente altos com maior número de etnotaxa. Em

contraste, Quebrador e Caupuri exibiram os menores valores relativos de similaridade com um número maior de etnotaxa.

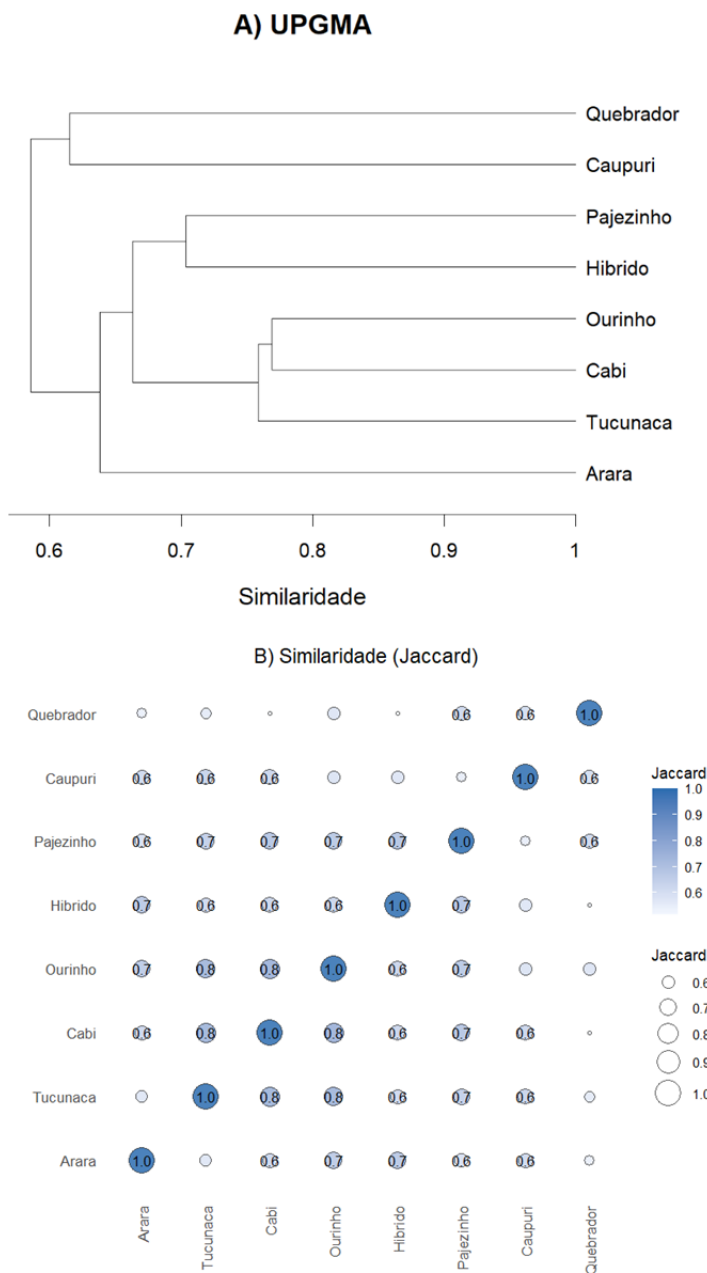


Figura 12. Análise de similaridade morfoanatômica baseada no índice de Jaccard para etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*. A) Dendrograma UPGMA com correlação cofenética ($r = 0,965$). B) Bubblemap de similaridade.

A ordenação por PCoA (Figura 13A) demonstrou distribuição mais equilibrada da variância entre os dois primeiros eixos, com o primeiro eixo explicando 33,96% e o segundo 27,70% da variação total, totalizando aproximadamente 61,7% da variância acumulada. Os etnotaxa distribuíram-se de forma relativamente contínua no espaço

bidimensional, sem a formação de grupos discretos bem delimitados. Quebrador apresentou maior deslocamento ao longo do eixo 1, enquanto Caupuri destacou-se ao longo do eixo 2, indicando diferenciações morfoanatômicas.

A análise NMDS (Figura 13B) apresentou valor de stress de 0,115, considerado aceitável para dados binários, indicando representação adequada das dissimilaridades em duas dimensões. A ordenação corroborou o padrão observado na PCoA, com ampla sobreposição entre os etnotaxa e ausência de segregações abruptas no espaço morfológico. Quebrador novamente ocupou posição relativamente periférica, enquanto os demais etnotaxa mantiveram distribuição mais concentrada.

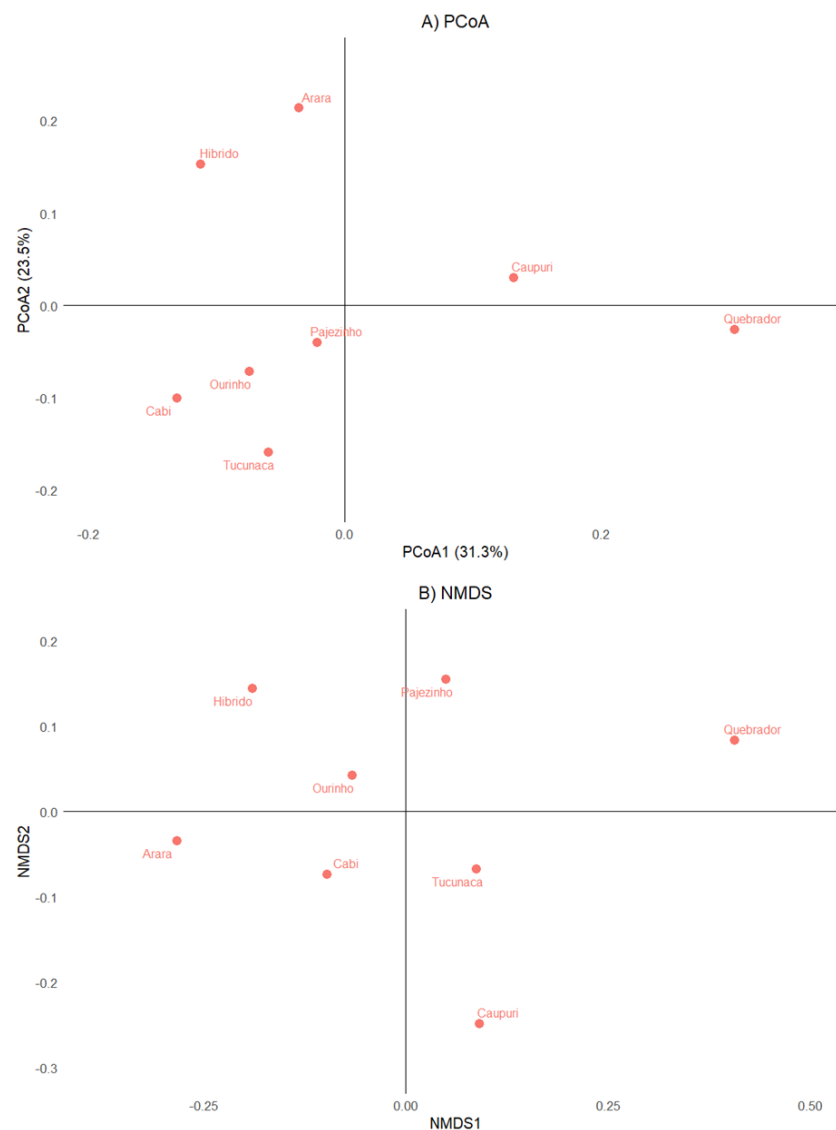


Figura 13. Ordenações multivariadas baseadas no índice de Jaccard para etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*. A) Análise de Coordenadas Principais (PcoA). B) NMDS (stress = 0,115).

De forma geral, a análise restrita aos etnotaxa evidencia elevada similaridade morfoanatômica e continuidade estrutural no espaço multivariado, com variações graduais entre os indivíduos analisados. Apesar dessa coesão geral, alguns etnotaxa apresentaram posicionamentos mais periféricos nas análises de agrupamento e ordenação, destacando-se principalmente Quebrador, e em menor grau Caupuri e Arara, que exibiram maior distanciamento relativo em relação ao núcleo central do agrupamento.

A análise de frequência dos caracteres morfoanatômicos (Figura 14A) revelou predomínio de caracteres amplamente compartilhados entre os etnotaxa, refletindo conservadorismo estrutural no conjunto analisado. A maior parte dos caracteres ocorreu em três ou mais etnotaxa, enquanto um subconjunto apresentou baixa frequência, incluindo caracteres exclusivos (frequência = 1) e raros (frequência ≤ 2).

Foram identificados 12 caracteres exclusivos, cada um presente em apenas um etnotaxon: parênquima paliçádico de células longas, uniformes e predominantemente retangulares (caráter 14; Ourinho); parênquima paliçádico com células ao menos seis vezes mais altas que largas (caráter 19; Pajezinho); parênquima lacunoso com células ao menos três vezes mais largas que altas (caráter 22; Arara); nervura mediana com feixes vasculares acessórios (caráter 31; Híbrido); pecíolo predominantemente côncavo-convexo com projeções laterais aliformes (caráter 36; Arara); pecíolo com um a três pares de feixes vasculares acessórios (caráter 40; Arara); pecíolo com drusas raras a pouco abundantes (caráter 42; Quebrador); glândulas do pecíolo predominantemente ovais (caráter 47; Pajezinho); glândulas do pecíolo predominantemente discóides com bordas salientes (caráter 48; Quebrador); face abaxial com glândulas elíptico-ovadas e globosas (caráter 57; Arara); face abaxial com glândulas circulares achatadas e discóides (caráter 58; Caupuri); e superfície abaxial com cera epicuticular em placas amorfas (caráter 60; Caupuri).

Além dos 12 caracteres exclusivos, dois caracteres apresentaram frequência igual a 2: o caráter 34 (nervura mediana com drusas abundantes no parênquima), compartilhado por Cabi e Caupuri, e o caráter 50 (lâmina foliar com face adaxial glabra), presente em Arara e Caupuri. Cinco caracteres apresentaram frequência igual a 3, configurando distribuição intermediária entre subconjuntos específicos de etnotaxa: caráter 15 (parênquima paliçádico de células longas com contorno sinuoso e irregular) compartilhado por Cabi, Híbrido e Tucunacá; caráter 27 (cristais prismáticos predominantemente no parênquima lacunoso) compartilhado por Caupuri, Quebrador e Tucunacá; caráter 37 (pecíolo predominantemente plano-convexo) compartilhado por

Cabi, Ourinho e Tucunacá; caráter 43 (pecíolo com tricomas malpighiáceos abundantes) compartilhado por Ourinho, Pajezinho e Tucunacá; caráter 52 (face adaxial com cera epicuticular amorfa) compartilhado por Caupuri, Pajezinho e Tucunacá.

Destaca-se que no etnotaxa Tucunacá ocorre todos os caracteres com frequência igual a 3, compondo diferentes combinações de compartilhamento parcial entre etnotaxa. Esse padrão é congruente com sua posição intermediária observada nas análises de agrupamento e ordenação (UPGMA, PCoA e NMDS; Fig. 12 e 13), nas quais o etnotaxon ocupa posição estruturalmente conectiva entre subconjuntos distintos.

A contribuição dos caracteres para a estruturação multivariada foi avaliada por meio da correlação com os eixos da PCoA (Figura 14B). O primeiro eixo (PCoA1) apresentou maiores correlações absolutas com atributos relacionados à morfologia glandular do pecíolo (caracteres 48 e 42), à distribuição de cristais prismáticos no mesofilo (caracteres 26 e 27), à organização do parênquima paliçádico (caráter 13) e às cicatrizes de tricomas (caracteres 10 e 11), além do comprimento do pecíolo (caráter 4). Esses caracteres estruturaram a principal dimensão de variação morfoanatômica entre os etnotaxa.

O segundo eixo (PCoA2) foi fortemente influenciado pelos caracteres que envolvem principalmente variações na morfologia glandular da face abaxial (caráter 57), na presença de cera epicuticular (caráter 56), na proporção do parênquima lacunoso (caráter 23), na arquitetura do pecíolo (caracteres 36 e 40), na organização do mesofilo (caráter 22), no padrão estrutural do pecíolo (caráter 37) e na abundância de drusas (caráter 38). A distribuição desses caracteres evidencia que a diferenciação interna entre os etnotaxa é determinada por combinações específicas de atributos morfológicos e anatômicos, distribuídos de maneira assimétrica ao longo dos dois eixos principais.

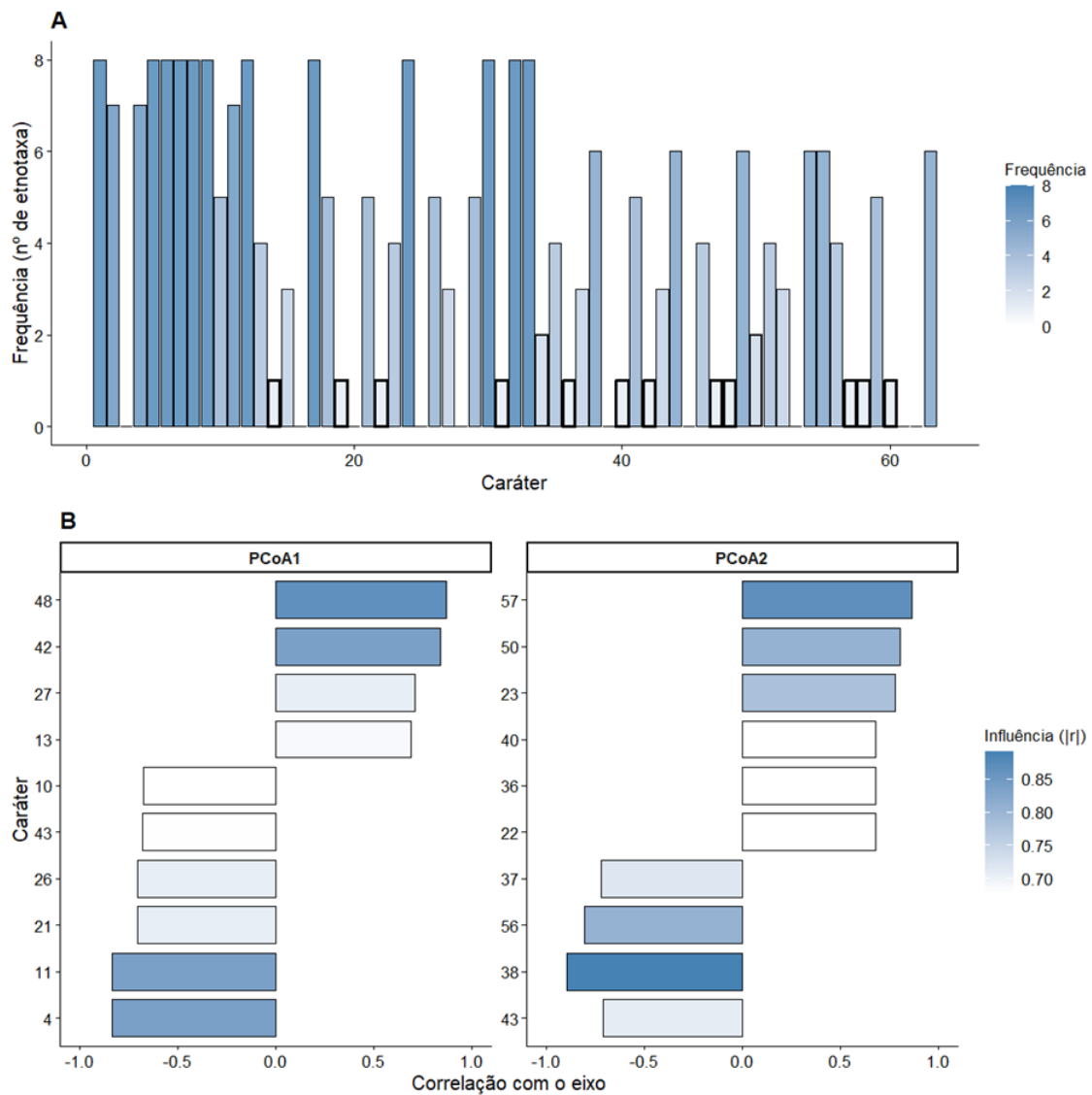


Figura 14. Frequência e contribuição dos caracteres morfoanatômicos dos etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*. A) Frequência de ocorrência dos caracteres entre os etnotaxa. B) Correlação dos principais caracteres com os eixos da PCoA (PCoA1 e PCoA2), evidenciando sua influência na organização do espaço morfológico. Caracteres exibidos no painel B: 4 – comprimento máximo do pecíolo superior a 1,5 cm; 10 – cicatrizes de tricomas com células adjacentes à célula pedal mais longas que largas, em arranjo radial estrelado; 11 – cicatrizes de tricomas presentes em ambas as faces, com maior frequência na face abaxial; 13 – parênquima paliádico constituído por células longas e uniformes, com aspecto fimbriado; 21 – parênquima lacunoso com organização alternada de células retangulares e circulares; 22 – parênquima lacunoso com células pelo menos três vezes mais largas que altas; 23 – proporção de parênquima lacunoso superior a 60% do mesofilo; 26 – cristais prismáticos predominantemente no parênquima paliádico; 27 – cristais prismáticos predominantemente no parênquima lacunoso; 36 – pecíolo

predominantemente côncavo-convexo com projeções laterais aliformes; 37 – pecíolo predominantemente plano-convexo; 38 – pecíolo com drusas raras a pouco abundantes; 40 – pecíolo com um a três pares de feixes vasculares acessórios; 42 – glândulas do pecíolo predominantemente elipsoides; 43 – pecíolo com tricomas malpighiáceos abundantes; 48 – glândulas do pecíolo predominantemente discóides com bordas salientes; 50 – lâmina foliar com face adaxial glabra; 56 – superfície abaxial com cera epicuticular em placas amorfas; 57 – face abaxial com glândulas elíptico-ovadas e globosas.

Em conjunto, as Figuras 12, 13 e 14 demonstram que, os caracteres exclusivos (frequência = 1), juntamente com aqueles de frequência intermediária (2–3) e com maiores valores absolutos de correlação nos eixos da PCoA, estruturaram os padrões de segregação observados no UPGMA, PCoA e NMDS. De maneira geral, Caupuri, Quebrador e, em menor grau, Arara configuraram os etnotaxa com maior expressão de diferenciação nas análises multivariadas, evidenciada pelo afastamento relativo nas estruturas de agrupamento e ordenação. Contudo, todos os etnotaxa puderam ser distinguidos por pelo menos um caráter exclusivo ou combinação particular de atributos morfoanatômicos.

Esse padrão também é visível nas análises de ordenação (PCoA e NMDS), nas quais cada etnotaxon ocupa posição própria no espaço multivariado, mantendo distanciamento relativo em relação aos demais. Assim, mesmo dentro de um agrupamento estrutural coeso, observa-se segregação interna consistente entre os etnotaxa. Com base nos caracteres diagnósticos identificados, especialmente aqueles exclusivos ou com maior contribuição para a separação multivariada, foi elaborada uma chave de identificação dos etnotaxa, priorizando atributos de maior poder discriminatório.

Chave com caracteres anatômicos de folhas para distinção de etnotaxa de *Banisteriopsis caapi*:

1. Glândulas peciolares predominantemente circulares discoide bem delimitadas, com superfície regular a levemente estriada e papilosidade predominante (car. 48).....**Quebrador**
- 1'. Glândulas peciolares predominantemente elípticas a ovais2
2. Face abaxial com glândulas circulares discoides achatadas com superfície intensamente pregueada (car. 58)**Caupuri**
- 2'. Face abaxial com glândulas de forma elípticas a ovadas3

3. Pecíolo predominantemente côncavo–convexo com projeções laterais aliformes (car. 36)	Arara
3'. Pecíolo concavo-convexo ou plano convexo sem projeções aliformes	4
4. Glândulas peciolaras predominantemente ovais (car. 47)	Pajezinho
4'. Glândulas peciolaras predominantemente elípticas	5
5. Parênquima paliçádico de células longas, uniformes e predominantemente retangulares (car. 14)	Ourinho
5'. Parênquima paliçádico com células longas e uniformes, de aspecto fimbriado ou de células longas com contorno sinuoso e irregular ou com células com forma predominantemente quadradas	6
6. Nervura mediana com feixes vasculares acessórios (car. 31)	Híbrido
6'. Nervura mediana sem feixes vasculares acessórios	7
7. Cristais prismáticos predominantemente no parênquima lacunoso (car. 27).....	Tucunacá
7'. Parênquima paliçádico com contorno sinuoso e irregular (car. 15); organização do parênquima lacunoso em camadas alternadas de células retangulares e circulares (car. 21).....	Cabi

Discussão

A ayahuasca constitui um sistema biocultural de profunda relevância na Amazônia, articulando dimensões ecológicas, farmacológicas, históricas e espirituais (Tupper, 2008; Fotiou, 2019; Ruffell et al., 2023; Manuel-Navarrete et al., 2024). A partir da consolidação e difusão das religiões ayahuasqueiras brasileiras no século XX e, posteriormente, de sua expansão transnacional, o uso da bebida ultrapassou o contexto amazônico original e adquiriu projeção global (Labate & Araújo, 2002; Tupper, 2009; Palhano-Fontes et al., 2019). Atualmente, seu consumo não se restringe a práticas religiosas, sendo incorporado também em contextos terapêuticos, neo-xamânicos e de busca pessoal na América do Norte, Europa, Ásia e Oceania, configurando um fenômeno contemporâneo de circulação intercultural de saberes e práticas envolvendo plantas psicoativas, o que reforça a necessidade de preservar as espécies vegetais quanto e os sistemas de conhecimento tradicional nos quais elas estão inseridas (Tupper, 2008; Tupper, 2009; Labate e Assis, 2018; Oliveira et al., 2023).

O reconhecimento e o manejo das plantas envolvidas no preparo da Ayahuascas são sustentados pelo conhecimento tradicional acumulado ao longo de gerações, no qual

categorias locais, frequentemente designadas como “tipos” ou etnotaxa, são tradicionalmente descritos com base em critérios que incluem hábito, morfologia do caule, propriedades organolépticas da bebida e efeitos do preparo e história de circulação de linhagens. Nesse contexto, a correspondência entre classificação tradicional e taxonomia formal não deve ser presumida, mas investigada empiricamente (Monteles, 2020; Naganime-Pinheiro et al., 2021; Luz et al., 2023; Oliveira et al., 2023; Chavarro-Mesa et al., 2024).

A caracterização morfoanatômica estrutural e microestrutural realizada neste estudo insere-se nesse diálogo. Ao documentar detalhadamente atributos vegetativos de 8 etnotaxa de *B. caapi* e das espécies relacionadas *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* associados ao complexo ayahuasca, organizando-os em matriz binária e explorando-os por meio de análises multivariadas, buscamos responder a uma questão central: em que medida a variação reconhecida tradicionalmente encontra respaldo em discontinuidades morfoanatômicas estruturais detectáveis na folha?

O padrão de venação é compartilhado pelas Malpighiaceae, Stigmaphyllonids e particularmente recorrente em *Banisteriopsis* (Gates, 1982; Araújo et al., 2010; Araújo et al., 2020; Vilarinho et al., 2023). Esse mesmo padrão foi igualmente observado em *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, indicando que tais atributos são conservados, provavelmente plesiomórficos. Esse conservadorismo dos estados de caracteres estende-se a elementos micromorfológicos (Fig. 3 e 4) e anatômicos fundamentais (Fig. 6-9), como presença de cera epicuticular, glândulas peciulares e laminares, tricomas tectores em forma de T orientados paralelos a superfície, organização dorsiventral do mesófilo, parênquima paliádico predominantemente unisseriado, epiderme uniestratificada e feixes vasculares colaterais em arco aberto na nervura mediana e no pecíolo. Do mesmo modo, os preparados paradérmicos (Fig. 9) evidenciaram folhas hipoestomáticas e complexo estomático predominantemente anomocítico, com células-guarda reniformes, padrão amplamente compartilhado entre as Malpighiaceae, sobretudo para espécies do gênero *Banisteriopsis* (Machado et al., 2008; Araújo et al., 2010; Possobom et al., 2010; Araújo et al., 2020).

Em contraste, a posição e forma das glândulas foliares (Fig. 2) possuem maior valor taxonômico, sobretudo quando combinada a outros caracteres anatômicos ou reprodutivos (Machado et al., 2008; Araújo et al., 2010; Possobom et al., 2010; Araújo et al., 2020; Vilarinho et al., 2023). A literatura sobre Malpighiaceae indica que o sistema glandular, particularmente a posição das glândulas (marginal, laminar ou peciolar), sua

morfologia (discóide, elíptica, achatada) e a organização anatômica interna dos nectários, apresenta elevada variabilidade estrutural e relevância taxonômica. Machado et al. (2008) destacaram a diversidade morfológica e a vascularização dos nectários extraflorais em *Banisteriopsis*, enquanto Possobom et al. (2010) descrevem em detalhe a complexidade estrutural das glândulas em *Diplopterys*, incluindo epiderme secretora especializada, parênquima nectarífero e formação de espaço subcuticular. Em conjunto, esses estudos indicam que, dentro de Banisterieae, a diferenciação taxonomicamente informativa tende a concentrar-se em caracteres microanatômicos associados ao sistema glandular, mais do que na morfologia geral da lâmina foliar.

Um aspecto particularmente relevante é a ausência de glândulas no pecíolo e na lâmina foliar em *D. cabrerana* (Fig. 2E), contrastando claramente com o padrão observado nos demais etnotaxa. Esse caráter constitui um elemento distintivo importante e tende a contribuir significativamente para a segregação desse táxon em análises comparativas. *Diplopterys cabrerana* mostrou um arranjo mais restrito (glândulas concentradas na lâmina, em posição marginal e proximal; Fig. 2E), e *D. pubipetala* exibiu distribuição peculiar ao longo da margem, frequentemente aglomerada no ápice (Fig. 2B). Esse tipo de “geografia glandular” é justamente um dos componentes apontados pela literatura como comparativamente informativo em Banisterieae, sobretudo quando articulado à anatomia do nectário (Machado et al., 2008; Possobom et al., 2010).

Em MEV, o padrão geral do pecíolo foi dominado por glândulas séssseis elevadas, elipsoides a circulares, com superfície irregular/rugosa, associadas a pregas cuticulares e células papilosas (Arara: Fig. 4A; Pajezinho: Fig. 4D; Tucunacá: Fig. 4H). Entretanto, surgem assinaturas morfológicas com claro potencial diagnóstico. Os padrões de cera epicuticular ampliam esse espectro de diferenciação (Fig 3). Depósitos amorfos, placas e cristais estrelados configuram estados discretos facilmente codificáveis em matriz binária.

A diversidade estrutural observada na cera epicuticular da lâmina foliar é consistente com os padrões micromorfológicos descritos por Barthlott et al. (1998), que reconhecem múltiplos tipos de deposição de cera, incluindo filmes amorfos e cristais organizados em diferentes formas e padrões de agregação, frequentemente com relevância sistemática. Entretanto, a literatura também indica que a morfologia dessas ceras pode ser influenciada por fatores ecológicos e fisiológicos, como condições ambientais, idade da folha e estágio de desenvolvimento, de modo que sua variação nem sempre reflete diretamente relações taxonômicas (Barthlott et al., 1998). Ainda assim,

quando analisados em conjunto com caracteres anatômicos e glandulares, os padrões de deposição de cera contribuem para ampliar a resolução morfológica e auxiliar na discriminação de entidades morfoanatômicas próximas.

As análises de EDX (Fig. 5) devem ser interpretadas principalmente como uma abordagem complementar à caracterização morfoanatômica, permitindo reconhecer padrões gerais de biomineralização e distribuição elementar nos tecidos vegetais. A predominância de Ca, K, Mg e Si observada nas diferentes estruturas analisadas é consistente com os principais elementos envolvidos na formação de biominerais e compostos mineral-orgânicos em plantas. Estudos recentes demonstram que esses elementos frequentemente se acumulam em estruturas epidérmicas especializadas, como tricomas e células da superfície foliar, formando compósitos mineral-orgânicos que contribuem para o reforço estrutural dos tecidos e podem desempenhar funções ecológicas e fisiológicas relevantes, incluindo proteção contra herbivoria e regulação iônica (Ensikat & Weigend, 2021).

Nesse contexto, os padrões elementares identificados podem ser relacionados às estruturas morfoanatômicas observadas nos taxa analisados, como a presença de cristais prismáticos e drusas, bem como a possíveis deposições minerais associadas à superfície foliar e a estruturas epidérmicas especializadas, incluindo regiões recobertas por cera epicuticular e tricomas. Assim, embora os perfis elementares não configurem caracteres taxonômicos diagnósticos isolados, os dados de EDX contribuem para interpretar a organização estrutural e funcional dos tecidos (Ensikat & Weigend, 2021), fornecendo evidências adicionais de processos de biomineralização associados às características anatômicas descritas nos taxa analisados.

A presença de cristais prismáticos e drusas (Fig. 8) revelou contraste informativo tanto entre gêneros quanto dentro de *B. caapi*. A presença recorrente de cristais prismáticos no mesófilo em *B. caapi*, contrastando com padrões distintos em *D. cabrerana* e *D. pubipetala*, fornece marcador estrutural robusto para separação interespecífica. Internamente, variações quantitativas na abundância de drusas no pecíolo e na nervura mediana, especialmente quando organizadas em classes, contribuem para diferenciação relativa entre etnotaxa.

Nesse contexto, a variação anatômica registrada entre os etnotaxa de *B. caapi* concentra-se justamente nesses elementos estruturais, sugerindo que modificações discretas em componentes específicos da anatomia foliar podem refletir trajetórias evolutivas diferenciadas dentro de um arcabouço estrutural compartilhado. Dessa forma,

os dados sugerem que existe um padrão morfoanatômico compartilhado que caracteriza a espécie, mas também um conjunto de estruturas anatômicas cuja variação é decisiva para a identificação e diferenciação de entidades intraespecíficas dentro do complexo analisado.

A síntese multivariada dos caracteres morfoanatômicos evidencia uma propriedade central do complexo analisado: um pano de fundo estrutural amplamente compartilhado, compatível com o conservadorismo foliar reconhecido em Malpighiaceae/Banisterieae, e, simultaneamente, um subconjunto restrito de estados discretos potencialmente capaz de concentrar o sinal de separação taxonômica. Essa dualidade é coerente com a literatura que aponta que caracteres vegetativos foliares frequentemente exibem elevada estabilidade em nível de “arquitetura básica” (Araújo et al., 2010; Araújo et al., 2020; Vilarinho et al., 2023), enquanto a resolução diagnóstica emerge do acúmulo de diferenças em componentes específicos (p. ex., sistema glandular, organização do mesófilo, presença de cristais e drusas e detalhes vasculares), especialmente quando os estados são tratados de forma combinatória (Araújo et al., 2020; Naganime-Pinheiro et al., 2021).

No conjunto completo de dados, a similaridade média moderada e a estrutura hierárquica com alta correlação cofenética indicam que o conjunto de caracteres codificado captura, com eficiência, descontinuidades interespecíficas (Machado et al., 2008; Possobom et al., 2010; Araújo et al., 2020; Vilarinho et al., 2023). Nesse contexto, *B. caapi* forma um agrupamento principal, enquanto *Diplopterys* (*D. cabrerana* + *D. pubipetala*) constitui um subgrupo próprio e *A. macrodisca* ocupa posição intermediária, padrão corroborado pelas ordenações (PCoA/NMDS) com segregação espacial consistente. Esse resultado sustenta que, embora a folha apresente atributos conservados, a anatomia e microestrutura codificadas em estados binários são suficientemente informativas para separar gêneros e espécies, em concordância com abordagens comparativas que ressaltam o valor taxonômico de caracteres foliares quando analisados sob lógica integrativa e não isolada (Araújo et al., 2020; Vilarinho et al., 2023).

Em termos conceituais, esse cenário é potencialmente compatível com sistemas bioculturais de manejo prolongado, nos quais variantes mantidas e propagadas culturalmente podem acumular assinaturas morfoanatômicas discretas, incluindo caracteres raros ou exclusivos. Estudos sobre plantas manejadas em contextos tradicionais demonstram que práticas culturais de seleção e propagação podem gerar

padrões detectáveis de diferenciação morfológica dentro de um mesmo complexo biológico (Suparman et al., 2025).

No entanto, evidências recentes indicam que *B. caapi* apresenta origem evolutiva antiga e não exibe sinais claros de domesticação recente (Santos et al., 2025). Além de que, diversos caracteres vegetativos apresentam alto grau de conservação estrutural dentro de Banisterieae, enquanto a diferenciação taxonômica frequentemente depende da combinação de múltiplos atributos morfológicos e anatômicos (Araújo et al., 2020; Araujo-Chavez, 2022). Nesse contexto, as variações observadas em *B. caapi* podem resultar tanto de processos evolutivos naturais quanto de manejo humano e dispersão cultural associados às tradições ayahuasqueiras.

Luz et al. (2023) fizeram uma filogenia com etnotaxa de *B. caapi* coletadas no Brasil e mostraram a formação de clados e sugeriram que a espécie está englobando várias linhagens, mas não conseguiram caracteres morfológicos informativos. Os estudos morfológicos com etnotaxa de *B. caapi* foram iniciados recentemente e a descrição étnica dos caules e dos chás resultantes do uso de diferentes etnotaxa de *B. caapi* foi apresentado por Oliveira et al. (2023). Oliveira et al. (2023) complementaram o estudo etnobotânico pela inclusão da descrição e avaliação da anatomia do caule na distinção dos etnotaxa. Embora a morfologia do caule seja um dos caracteres mais relevantes na etnodistinção dos etnotaxa de *B. caapi*, apenas dois grupos foram resgatados: Caupuri e Tucuncá.

Além de validarem a diversidade intraespecífica em *B. caapi*, esses estudos também reconhecem variantes culturalmente distintas, principalmente os etnotaxa Caupuri e Tucunacá, amplamente reconhecidas em diferentes comunidades ayahuasqueiras (Luz et al., 2022; Oliveira et al., 2023). Os etnotaxa analisados no presente estudo incluem todos esses morfotipos amplamente documentados, além de variantes adicionais descritas localmente, como Arara, Cabi, Ourinho, Pajezinho, Quebrador e Híbrido, ampliando o espectro de diversidade considerado nas análises morfoanatômicas.

O presente estudo, pioneiro na descrição da morfoanatomia de folhas de etnotaxa de *B. caapi*, surpreendeu pelo resgate de vários caracteres taxômicos que auxiliam efetivamente na distinção dos etnotaxa. Assim como, as imagens analisadas por IA no capítulo 2. Contudo, não conseguimos relacionar a morfologia das folhas aos clados resgatados por Luz e tal. (2023), indicando que estudos que englobem dados morfoanatômicos, moleculares e filogenia ainda precisam ser implementados.

O ponto decisivo é que, morfoanatomicamente, todos os etnotaxa puderam ser distinguidos por ao menos um caráter exclusivo ou por combinações consistentes de estados, o que torna a variação operacionalmente diagnóstica. A chave construída a partir desses caracteres (p. ex., glândulas peciolares discóides com borda saliente em Quebrador; morfotipos abaxiais específicos em Caupuri; distribuição predominante de cristais em Tucunacá; feixes acessórios na nervura em Híbrido; extremos de proporção paliádica em Pajezinho; padrão celular do paliádico em Ourinho) demonstra que diferentes combinações de caracteres anatômicos e micromorfológicos permitem distinguir operacionalmente os etnotaxa reconhecidos neste estudo.

Os caracteres utilizados na chave de identificação proposta neste estudo incluem, em parte, estados morfoanatômicos também mencionados em chaves anteriores para *B. caapi*. Entre eles, destacam-se caracteres relacionados à morfologia das glândulas e à forma do pecíolo, previamente empregados por Araújo et al. (2020) na caracterização anatômica da espécie. Em particular, a combinação de glândulas sem concavidade evidente e pecíolo transversalmente plano-convexo, citada por esses autores, corresponde a um conjunto de estados morfológicos que, na chave aqui proposta, ocorre em três etnotaxa: Cabi, Ourinho e Tucunacá. Assim, embora o estudo de Araújo et al. (2020) não tenha tratado explicitamente de etnotaxa, os caracteres descritos permitem sugerir que o material analisado por esses autores pode corresponder a um desses morfotipos. Considerando ainda que as amostras examinadas naquele estudo foram coletadas em cultivos religiosos em Manaus, Rio Branco e Porto Velho, existe uma probabilidade maior de correspondência com os etnotaxa Ourinho ou Tucunacá, frequentemente mencionados em contextos ayahuasqueiros nessas regiões, enquanto Cabi é mais frequentemente associado a coletas registradas no Pará. Essa correspondência reforça que os caracteres utilizados na presente chave capturam padrões morfoanatômicos já observados na literatura, permitindo reinterpretar descrições anatômicas anteriores à luz da diversidade etnobotânica atualmente reconhecida para *B. caapi*.

Em síntese, a análise morfoanatômica foliar evidenciou que espécies relacionadas ao complexo da ayahuasca, como *A. macrodisca*, *D. pubipetala* e *D. cabrerana*, apresentam conjuntos estruturais claramente distintos daqueles observados em *B. caapi*, permitindo sua diferenciação consistente com base em caracteres micromorfológicos e anatômicos. Esses resultados indicam que, embora filogeneticamente próximas e frequentemente associadas a contextos etnobotânicos semelhantes, essas espécies não se

confundem com a variação morfológica observada em *B. caapi*, evidenciando limites interespecíficos bem definidos no conjunto de caracteres analisados.

Assim, a convergência entre dados etnobotânicos, morfoanatômicos e moleculares reforça que a diversidade culturalmente reconhecida em *B. caapi* possui expressão biológica detectável. Essa convergência, evidencia a importância de abordagens integrativas que articulem métodos científicos contemporâneos com o conhecimento tradicional para compreender e conservar a diversidade associada a *B. caapi* e ao complexo biocultural de plantas associadas à Ayahuasca.

Além das implicações taxonômicas, os resultados deste estudo reforçam a relevância do conhecimento tradicional na identificação e distinção de unidades biológicas significativas. Os etnotaxa de *B. caapi*, reconhecidos por povos indígenas e comunidades ayahuasqueiras a partir de critérios empíricos relacionados à morfologia do caule, manejo e efeitos da bebida, refletem sistemas próprios de classificação que dialogam com padrões reais de variação biológica. Ainda que esses sistemas não correspondam necessariamente a categorias taxonômicas formais, sua correspondência parcial com diferenças morfoanatômicas detectáveis evidencia o potencial da etnotaxonomia como fonte de hipóteses e como ferramenta complementar para a investigação da diversidade vegetal. Nesse contexto, a integração entre abordagens botânicas e saberes tradicionais amplia a compreensão da variabilidade de espécies culturalmente relevantes e contribui para valorizar e preservar os conhecimentos associados às plantas utilizadas na Ayahuasca.

Conclusão

A morfoanatomia foliar constitui uma ferramenta eficiente para a diferenciação taxonômica entre espécies de Malpighiaceae associadas à Ayahuasca. No contexto interespecífico, *B. caapi*, *A. macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* apresentaram diferenças morfoanatômicas consistentes, evidenciando que caracteres estruturais do pecíolo e da lâmina foliar são informativos para a delimitação dessas espécies.

No contexto intraespecífico, os etnotaxa de *B. caapi* apresentaram caracteres exclusivos e de combinações raras de atributos estruturais, revelando a existência de variação morfoanatômica detectável para todos os etnotaxa, sobretudo para Quebrador, Caupuri e Arara, que apresentaram maior singularidade relativa no espaço morfológico definido pelas análises multivariadas.

As variações intraespecíficas dos etnotaxa de *B. caapi* representam potencialmente relações aos processos de diversificação local, manejo humano ou adaptação ecológica. A integração entre morfoanatomia foliar e análises multivariadas mostrou-se eficaz para explorar padrões de diversidade dentro da espécie, contribuindo para a compreensão da variabilidade estrutural de *B. caapi* e para o diálogo entre taxonomia botânica e sistemas tradicionais de classificação das plantas associadas à Ayahuasca.

Referências

Araújo, J.S., Almeida, R.F., Meira, R.M.S.A., 2020. Taxonomic relevance of leaf anatomy in *Banisteriopsis* C.B. Rob. (Malpighiaceae). *Acta Botanica Brasilica* 34(1), 214–228. <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0276>

Araújo, J.S., Meira, R.M.S.A., 2016. Comparative anatomy of calyx and foliar glands of *Banisteriopsis* C.B. Rob. (Malpighiaceae). *Acta Botanica Brasilica* 30(1), 112–123. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0248>

Araújo, J. S., Azevedo, A. A., Silva, L. C., & Meira, R. M. S. A. (2010). Leaf anatomy as an additional taxonomy tool for 16 species of Malpighiaceae found in the Cerrado area (Brazil). *Plant Systematics and Evolution*, 286, 117–131. <https://doi.org/10.1007/s00606-010-0268-3>

Araújo-Chávez, P.M., 2022. *Evaluación de las relaciones filogenéticas y morfología del género Banisteriopsis en la Amazonía peruana*. Undergraduate thesis. Universidad Nacional de Trujillo, Peru.

Barthlott, W., Neinhuis, C., Cutler, D., Ditsch, F., Meusel, I., Theisen, I., Wilhelmi, H., 1998. Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society* 126, 237–260.

Chavarro-Mesa, E., Almeida, J.V.A., Silva, S.R., Lopes, S.S., Barbosa, J.B.F., Oliveira, D., Corrêa, M.A., Moraes, A.P., Miranda, V.F.O., Prosdocimi, F., Varani, A.M., 2024. The mitogenomic landscape of *Banisteriopsis caapi* (Malpighiaceae), the sacred liana used for ayahuasca preparation. *Genetics and Molecular Biology* 47(2), e20230301. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2023-0301>

Dickison, W.C., 2000. *Integrative Plant Anatomy*. Academic Press, San Diego.

Ellis, B., Daly, D.C., Hickey, L.J., Johnson, K.R., Mitchell, J.D., Wilf, P., Wing, S.L., 2009. *Manual of Leaf Architecture*. Cornell University Press, Ithaca.

Ensikat, H.J., Weigend, M., 2021. Distribution of biominerals and mineral-organic composites in plant trichomes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 9, 763690. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.763690>

Fotiou, E., 2019. Technologies of the body in contemporary ayahuasca shamanism in the Peruvian Amazon: implications for future research. *Human Ecology* 47(1), 145–151. <https://doi.org/10.1007/s10745-018-0043-6>

Francener, A., Almeida, R.F., 2020. *Banisteriopsis* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB8803>

Gates, B., 1982. *Banisteriopsis, Diplopterys (Malpighiaceae)*. Flora Neotropica Monograph. The New York Botanical Garden.

Johansen, D.A., 1940. *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill, New York.

Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P.F., Donoghue, M.J., 2007. *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*, 3rd ed. Sinauer Associates, Sunderland.

Kraus, J.E., Arduin, M., 1997. *Manual básico de métodos em morfologia vegetal*. EDUR, Rio de Janeiro.

Labate, B.C., Araújo, W.S., 2002. *O uso ritual da ayahuasca*. Mercado de Letras / FAPESP.

Labate, B.C., Assis, G.L., 2018. A critical review of the literature on the diaspora of Brazilian ayahuasca religions. In: Labate, B.C., Cavnar, C. (Eds.), *The Expanding World Ayahuasca Diaspora*. Routledge, New York.

Lamarca, E.V., Oliveira Júnior, C.J.F., Barbedo, C.J., 2020. Etnobotânica na conservação de espécies com sementes sensíveis à dessecação: o exemplo de *Eugenia brasiliensis*. *Hoehnea* 47, e372019. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-37/2019>

Luz, T.Z., Cunha-Machado, A.S., Silva Batista, J., 2023. First DNA barcode efficiency assessment for an important ingredient in the Amazonian ayahuasca tea: mariri/jagube, *Banisteriopsis* (Malpighiaceae). *Genetic Resources and Crop Evolution* 70, 1605–1616. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01522-3>

Machado, S.R., Gregório, E.A., Guimarães, E., 2008. Extrafloral nectaries of *Banisteriopsis* (Malpighiaceae): structure, secretion and ecological significance. *Plant Systematics and Evolution*.

Manuel-Navarrete, D., DeLuca, S., Friso, F., Politi, M., 2024. Ayahuasca ceremonies, relationality, and inner-outer transformations to sustainability: evidence from Takiwasi Center in Peru. *Ecosystems and People* 20(1), 2339227. <https://doi.org/10.1080/26395916.2024.2339227>

Martin, G.J., 1995. Ethnobotany, conservation and community development. In: Martin, G.J. (Ed.), *Ethnobotany: A Methods Manual*. Springer.

McKenna, D.J., Towers, G.H.N., Abbott, F., 1984. Monoamine oxidase inhibitors in South American hallucinogenic plants: tryptamine and beta-carboline constituents of ayahuasca. *Journal of Ethnopharmacology* 10(2), 195–223.

McKenna, D., Riba, J., 2015. New world tryptamine hallucinogens and the neuroscience of ayahuasca. In: *Current Topics in Behavioral Neurosciences*. Springer.

Metcalfe C.R., Chalk L. (1979). *Anatomy of the Dicotyledons*. Clarendon Press, Oxford: 276 pp.

Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C.W., Gomes, S.M., Oliveira, R.C., Sonsin-Oliveira, J., 2021. Vegetative anatomy, morphology and histochemistry of three species of Malpighiaceae used in analogues of the Amazonian psychoactive beverage ayahuasca. *Flora* 275, 151760. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151760>

Naranjo, P., 1986. El ayahuasca en la arqueología ecuatoriana. *América Indígena*.

Oliveira, R.C., Behrens, C.S.B., Nagamine-Pinheiro, N., Fagg, C.W., Silva, M.S., Martins-Silva, T., Sonsin-Oliveira, J., 2023. Ethnobotany and wood anatomy of *Banisteriopsis caapi* ethnotaxa and *Diplopterys cf. pubipetala*. *Economic Botany* 77(1), 18–47. <https://doi.org/10.1007/s12231-023-09567-w>

Newmaster, S.G., Ragupathy, S., 2010. Ethnobotany genomics - discovery and innovation in a new era of exploratory research. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 6, 2. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-6-2>

Oliveira, M.I.U., Rebouças, D.A., Leite, K.R.B., Oliveira, R.P., Funch, L.S., 2018. Can leaf morphology and anatomy contribute to species delimitation? A case in the *Campomanesia xanthocarpa* complex (Myrtaceae). *Flora* 249, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.10.004>

Paiva, J.G.A., Fank-de-Carvalho, S.M., Magalhães, M.P., Graciano-Ribeiro, D., 2006. Verniz vitral incolor 500®: uma alternativa de meio de montagem economicamente viável. *Acta Botanica Brasilica* 20, 257–264.

Palhano-Fontes, F., Alchieri, J.C., Oliveira, J.P.M., Soares, B.L., Hallak, J.E.C., Galvão-Coelho, N., Araújo, D.B., 2014. The therapeutic potentials of ayahuasca in the treatment of depression. In: Labate, B.C., Cavnar, C. (Eds.), *The Therapeutic Use of Ayahuasca*. Springer.

Possobom, C.F., Guimarães, E., Machado, S.R., 2010. Leaf glands act as nectaries in *Diplopterys pubipetala* (Malpighiaceae). *Plant Biology* 12(6), 863–870. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00304.x>

POWO, 2026. Plants of the World Online. Royal Botanic Gardens, Kew. <https://powo.science.kew.org/>

Queiroz, M.M.F., Marti, G., Queiroz, E.F., Marcourt, L., Castro-Gamboa, I., Bolzani, V.S., and Wolfender, J.-L. (2015). LC–MS/MS quantitative determination of *Tetrapteryx mucronata* alkaloids, a plant occasionally used in ayahuasca preparation. *Phytochem. Anal.* 26, 183–188. 10.1002/pca.2548

Radford, A.E., Dickison, W.C., Massey, J.R. & Bell, C.R. 1974. Vascular plants systematic. Harper and Row, New York.

Ragupathy, S., Newmaster, S.G., Murugesan, M., Balasubramaniam, V., 2009. DNA barcoding discriminates a new cryptic grass species revealed in an ethnobotany study by the Hill Tribes of the Western Ghats in southern India. *Mol. Ecol. Resour.* 9, 164–171. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02641.x>

Ruffell, S.G.D., Crosland-Wood, M., Palmer, R., Netzbänd, N., Tsang, W.F., Weiss, B., Sarris, J., 2023. Ayahuasca: a review of historical, pharmacological, and therapeutic aspects. *Psychiatry and Clinical Neurosciences Reports* 2(4), e146. <https://doi.org/10.1002/pcn5.146>

Santos, B.W.L., Oliveira, R.C. de, Sonsin-Oliveira, J., Fagg, C.W., Barbosa, J.B.F. & Caldas, E.D. (2020) Biodiversity of β -Carboline Profile of *Banisteriopsis caapi* and Ayahuasca, a Plant and a Brew with Neuropharmacological Potential. *Plants* 9: 870. <https://doi.org/10.3390/plants9070870>

Santos, J.V.D.C., Oliveira, M.F.V., Santos Filho, F.S., Silva, L.N.N.S., Araújo, J.S., 2020. The taxonomic value of leaf anatomy for species of *Byrsonima*. *Acta Botanica Brasilica* 34(3), 570–579.

Santos, T.A.C., Amorim, B.S., Maciel, J.R., Welker, C.A.D., Biazatti, S.C., Oliveira, R.C., 2025. Dated phylogeny of *Banisteriopsis* (Malpighiaceae) suggests an ancient colonization of the Cerrado and no evidence of human manipulation in the origin of *B. caapi*. *Plants* 14(7), 1149. <https://doi.org/10.3390/plants14071149>

Schultes, R.E., 1954. A new narcotic snuff from the Northwest Amazon. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University* 16(9), 241–260.

Schultes, R.E. (1957) The Identity of the Malpighiaceae Narcotics of South America. Botanical Museum leaflets, Harvard University 18: 1–56.
<https://doi.org/10.5962/p.168508>

Silva, M.J., do Amaral, U.S., Alonso, A.A., 2025. Comparative leaf anatomy of Brazilian *Manihot* species (Euphorbiaceae): diversity, systematic value and ecological significance. *Flora* 333, 152858. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152858>

Suparman, S., Tamalene, M.N., Bahtiar, B., Ilmi, Z.L., 2025. Morphological diversity and cluster relationships of indigenous *Musa* spp. based on biosystematic in North Maluku, Indonesia. *Biodiversitas* 26(8), 4220–4228.
<https://doi.org/10.13057/biodiv/d260848>

Thiers, B. (continuously updated). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. Available at: <https://sweetgum.nybg.org/science/ih/> (accessed 2026).

Tupper, K.W., 2008. The globalization of ayahuasca: harm reduction or benefit maximization? *International Journal of Drug Policy* 19(4), 297–303.

Tupper, K.W., 2009. Ayahuasca healing beyond the Amazon: the globalization of a traditional medicine. *Global Networks*.

Vilarinho, M. P., Silva, A. K., Lima, C. S., Ferreira, N. S. C., Santos, J. V. C., & Araújo, J. S. (2023). New contributions of comparative leaf anatomy to the phylogeny of Stigmaphyllon (Malpighiaceae Juss.). *Flora*, **298**, 152194.
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152194>

8. CONCLUSÃO GERAL

A presente tese investigou a diversidade taxonômica, morfológica e biocultural das espécies de Malpighiaceae associadas ao preparo da Ayahuasca, com ênfase em *B. caapi* e em espécies relacionadas como *A. macrodisca*, *D. cabrerana*, *D. longialata*, *D. pubipetala* e *T. methystica*, *T. mucronata*, historicamente relacionadas a Ayahuasca. A diversidade taxonômica envolvida no chamado “complexo da Ayahuasca” revela um cenário botânico ainda parcialmente compreendido, marcado por desafios nomenclaturais, sobreposição morfológica entre espécies e a existência de sistemas tradicionais de classificação que reconhecem variações fenotípicas relevantes. Nesse contexto, esta tese buscou contribuir para a ampliação do conhecimento taxonômico dessas plantas por meio de uma abordagem integrativa baseada em revisão nomenclatural, ferramentas computacionais de classificação e análises morfoanatômicas.

No primeiro eixo da pesquisa, a revisão nomenclatural permitiu esclarecer inconsistências históricas na circunscrição de espécies de Malpighiaceae associadas à Ayahuasca. A análise de protólogos, materiais-tipo e literatura taxonômica resultou na proposição de sete lectotipificações e na estabilização do uso de nomes botânicos em diferentes táxons do grupo. Esses resultados contribuem para o fortalecimento da base nomenclatural necessária ao desenvolvimento de estudos sistemáticos e etnobotânicos envolvendo espécies dos gêneros *Banisteriopsis*, *Diplopterys* e *Tetrapteryx*, ampliando a segurança taxonômica para investigações futuras sobre a diversidade botânica associada à bebida.

No segundo eixo, a aplicação de ferramentas computacionais de classificação demonstrou o potencial do aprendizado de máquina para investigar padrões morfológicos relacionados à diversidade de *B. caapi*. A análise de imagens digitais de folhas herborizadas indicou que características fenotípicas detectadas por algoritmos podem recuperar parcialmente classificações etnotaxonômicas tradicionalmente reconhecidas por comunidades ayahuasqueiras. Esses resultados sugerem que parte da diversidade percebida nos sistemas tradicionais de classificação encontra correspondência em padrões morfológicos foliares mensuráveis, evidenciando o potencial das ferramentas computacionais como instrumentos complementares para o estudo da diversidade fenotípica em plantas culturalmente relevantes.

No terceiro eixo da tese, as análises morfoanatômicas foliares demonstraram que caracteres estruturais do pecíolo e da lâmina foliar apresentam elevado potencial diagnóstico para a diferenciação entre espécies de Malpighiaceae associadas ao complexo

da Ayahuasca. No contexto interespecífico, *B. caapi*, *macrodisca*, *D. cabrerana* e *D. pubipetala* apresentaram diferenças morfoanatômicas consistentes, evidenciando que a anatomia foliar constitui uma ferramenta eficaz para a delimitação dessas espécies. No contexto intraespecífico, os etnotaxa tradicionalmente reconhecidos de *B. caapi* apresentaram variação morfoanatômica detectável. Essa variação, expressa por combinações específicas de caracteres do pecíolo e da lâmina foliar, permite distinguir os etnotaxa entre si, ainda que essas unidades não correspondam atualmente a categorias taxonômicas formais. Nesse sentido, os resultados indicam que as distinções realizadas por comunidades ayahuasqueiras, indígenas e não indígenas, refletem padrões fenotípicos que também podem ser reconhecidos por meio da análise morfoanatômica das folhas.

De forma mais ampla, esta tese evidencia a importância de abordagens integrativas para o avanço do conhecimento taxonômico em grupos botânicos complexos e culturalmente relevantes. A articulação entre revisão nomenclatural, ferramentas computacionais de classificação e análises morfoanatômicas demonstra que diferentes métodos podem atuar de forma complementar na investigação da diversidade vegetal.

Nesse contexto, os sistemas tradicionais de classificação das plantas associadas à Ayahuasca revelam-se não apenas expressões culturais de profundo valor, mas também importantes fontes de hipóteses para a pesquisa científica. Assim, a integração entre taxonomia clássica, morfologia vegetal, ciência de dados e etnobotânica amplia as possibilidades de compreensão da diversidade biológica e fortalece a construção de uma taxonomia mais abrangente, capaz de dialogar com diferentes formas de conhecimento. Ao reunir nomenclatura, morfologia, ciência de dados e conhecimento tradicional, esta tese demonstra que compreender a diversidade das plantas associadas à Ayahuasca exige não apenas olhar para as espécies, mas também para as múltiplas formas pelas quais a biodiversidade é observada, nomeada e compreendida.