

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**Análises econômicas e químicas relacionadas à cadeia de valor de
Pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae)**

CAROLINE SCHMAEDECK LARA

Manaus, Amazonas

Abril de 2024

CAROLINE SCHMAEDECK LARA

**Análises econômicas e químicas relacionadas à cadeia de valor de
Pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae)**

Orientador: Paulo de Tarso Barbosa Sampaio

Coorientador: Lauro Euclides Soares Barata

Tese apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da
Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutora em Ciências de Florestas Tropicais.

Manaus, Amazonas

Abril de 2024






PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TESE DE DOUTORADO

Ata da Defesa REMOTA de **CAROLINE SCHMAEDECK LARA**, ocorrida no dia 30 de abril de 2024, via plataforma de videoconferência google meet.

Aos 30 dias de abril de 2024, às 08h00 (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de tese de **CAROLINE SCHMAEDECK LARA**, aluna do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada “Análises econômicas e químicas relacionadas à cadeia de valor de Pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae)”, sob a orientação do Dr. Paulo de Tarso Barbosa Sampaio (INPA) e coorientação do Dr. Lauro Euclides Soares Barata (UFOPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Doutor(a) em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Tereza Cristina Monteiro Pastore (SFB), Maria Teresa Gomes Lopes (UFAM), Raquel da Silva Medeiros (INPA), Caroline Ziegler Stuker (Natura S.A.), Harley Silva (UFPA), e tendo como suplentes os seguintes membros: Cecília Verônica Nunes (INPA), Flávia Machado Durgante (KIT), Daniel da Silva (INPA), Joaquim dos Santos (INPA). O Presidente da Banca Examinadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. A aluna fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguida oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente Ata que, após lida e aprovada, foi assinada pela Coordenação:

| Nome | Parecer | Assinaturas |
|----------------------------------|--|--|
| Tereza Cristina Monteiro Pastore | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou |  <small>Documento assinado digitalmente</small> TEREZA CRISTINA MONTEIRO PASTORE Data: 02/05/2024 08:22:15-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br |
| Maria Teresa Gomes Lopes | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou |  <small>Documento assinado digitalmente</small> MARIA TERESA GOMES LOPES Data: 02/05/2024 10:16:43-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br |
| Raquel da Silva Medeiros | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou |  <small>Documento assinado digitalmente</small> RAQUEL DA SILVA MEDEIROS Data: 08/05/2024 10:17:13-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br |
| Harley Silva | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou |  <small>Documento assinado digitalmente</small> HARLEY SILVA Data: 02/05/2024 09:10:40-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br |
| Caroline Ziegler Stuker | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou |  <small>Documento assinado digitalmente</small> CAROLINE ZIEGLER STUKER Data: 02/05/2024 07:54:21-0300 Verifique em https://validar.it.gov.br |
| Menção: | <input type="checkbox"/> “Com Distinção” <input type="checkbox"/> “Com Louvor” <input type="checkbox"/> “Com Distinção e Louvor” | |

Paulo de Tarso Barbosa Sampaio
Presidente da Banca / Orientador

Adriano José Nogueira Lima
Coordenador do PPG-CFT
PO. N° 392/2023

L318a Lara, Caroline Schmaedeck

Análises econômicas e químicas relacionadas à cadeia de valor de Pau-rosa (*Aniba spp.*, *Lauraceae*) / Caroline Schmaedeck Lara; orientador Paulo de Tarso Barbosa Sampaio; coorientador Lauro Euclides Soares Barata. - Manaus : [s.l.], 2024.

2,91 mb

120 p. : il. color.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2023.

1. Pau-rosa. 2. Economia Florestal. 3. Silvicultura. I. Sampaio, Paulo de Tarso Barbosa. II. Barata, Lauro Euclides Soares. III. Título.

CDD 583.23

Sinopse

Estudou-se a cadeia de valor de sementes, mudas, biomassa e óleo essencial de pau-rosa (*Aniba spp.*, *Lauraceae*). Avaliou-se um método simplificado para análise dos compostos voláteis e predição da qualidade de óleo essencial. Foi testado o efeito de fatores como idade da árvore, parte da planta, morfotipos e localização geográfica, na variabilidade da composição volátil em pau-rosa.

Palavras-chave: Silvicultura, *Aniba rosiodora* Ducke., cadeia de valor, óleo essencial, compostos voláteis, linalol

Dedicatória

Dedico esse trabalho ao Sr. Silvestre Pinheiro (*in memoriam*), do Rio Paracuni, por sua dedicação e motivação à silvicultura de pau-rosa. Se essa planta não desapareceu completamente, muito deve-se a pessoas como ele. Os maiores guardiões da biodiversidade da Amazônia raramente recebem títulos ou honrarias. Mas são eles, populações tradicionais e povos indígenas, que ainda mantém essa floresta em pé.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela bolsa concedida (Código de Financiamento 001), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), que financiou grande parte dessa pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPG-CFT) e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela oportunidade de vivenciar essa qualificação em meio a tantos pesquisadores comprometidos em desenvolver ciência de qualidade. À Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela estrutura cedida.

A toda equipe do Laboratório de Silvicultura e Tecnologias Digitais (LASTED), pelo apoio e estrutura disponibilizada para executar esse trabalho. Em especial ao meu orientador, Paulo de Tarso Sampaio por acreditar no meu potencial, por apoiar e incentivar meu trabalho e os tantos projetos que vou inventando no caminho. Nossa parceria se deu principalmente dentro do espaço acadêmico, mas nunca se resumiu a ele, pois compartilhamos do pensamento que a silvicultura e o manejo florestal precisam ser postos em prática para termos resultados efetivos.

Ao meu coorientador, Lauro Barata, que me inspira, me ensina e me acompanha há muito tempo. Eu me sinto privilegiada em conviver com o Lauro, compartilhar minhas ideias e escutar suas dicas, com todo conhecimento que ele carrega. Se eu me apaixonei pela química dos produtos naturais, boa parte devo a ele. Se eu me arrisco a produzir qualquer coisa nessa área, é porque sei que ele está comigo.

Ao Dr. Alberto Vicentini, que também me orientou boa parte do tempo, mesmo que infelizmente o que iniciamos ainda não tenha chegado ao fim. De qualquer forma, agradeço pelos ensinamentos, pelas ideias e pelo tempo de dedicação ao acompanhar o desenvolvimento deste projeto.

Ao Dr. Sérgio Duvoisin, que nos disponibilizou a estrutura da Central de Análises Químicas da UEA para realizar boa parte dessa pesquisa. Muito além disso, a participação do Sérgio foi fundamental na concepção e desenvolvimento das metodologias de análise, e esteve totalmente disponível sempre que precisei.

Ao Dr. Adrian Pohlit, que participou da avaliação do meu projeto quando entrei no doutorado e da minha aula de qualificação. O Dr. Adrian me explicou muito sobre os erros que cometemos ao buscar relacionar dados químicos com fatores biológicos e ambientais, o que me fez ter maior cuidado nas metodologias que usamos. Outros diversos pesquisadores contribuíram muito para a minha formação nesses últimos anos e seria impossível escrever de forma personalizada aqui, por isso agradeço a todos.

Às instituições que prestaram apoio para o desenvolvimento do trabalho de campo: Núcleo de Gestão Integrada do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – Maués (NGI ICMBio-Maués) (no Rio Paracuni, em Maués) e Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM) (no Rio Uatumã, em São Sebastião do Uatumã). Além destas, diversas

instituições e empresas contribuíram para a execução de parte do trabalho, cedendo muitas informações que requisitamos ao longo do projeto, o que destacamos nos capítulos específicos.

A todos os produtores que nos acompanharam durante as coletas em cada região, por todas as trocas, aprendizados, histórias e um tanto mais de coisas que pudemos compartilhar. A colaboração que essas pessoas prestaram foi imprescindível e é imensurável. Espero que, de alguma forma, possamos retornar de alguma forma, através dos projetos que estamos desenvolvendo no Lasted. Agradeço também a todos técnicos, colegas e amigos que me ajudaram nas coletas e nos processos de laboratório.

A toda minha família, especialmente aos meus pais, que sempre viabilizaram e apoiaram o caminho da educação. De meu pai eu herdei a profissão, e ele sempre será a minha maior inspiração e referência. A minha mãe me incentivou mais do que ninguém e sua presença foi fundamental para eu conseguir finalizar essa etapa da minha vida. Aos meus irmãos que me garantiram boas risadas nos tempos de folga. Ao meu companheiro por todos os momentos que compartilhamos e nos apoiamos, sabendo que precisávamos um do outro para concluir essa etapa. Agradeço à minha filha, a pessoa mais incrível, esperta e gentil que eu já conheci. Tenho orgulho de termos chegado juntas até aqui, com muitos desafios pelo caminho, mas também com muita alegria e amor.

Resumo

Pau-rosa são árvores da família Lauraceae, que ocorrem na Amazônia, superexploradas no século passado para extração de óleo essencial aromático. Atualmente, há um rígido controle internacional ao comércio irregular devido à ameaça de extinção e no Brasil só é possível explorar árvores plantadas, mediante autorização dos órgãos ambientais. A valorização do produto tem estimulado o cultivo da espécie, mas diversos fatores dificultam o desenvolvimento da cadeia produtiva e a conservação dessa planta. As principais limitações referem-se à baixa disponibilidade de sementes e mudas no mercado, a burocracia institucional e legislação defasada que dificultam a regularização da exploração sustentável dos cultivos, principalmente para os agricultores familiares. Além disso, a silvicultura de pau-rosa é ainda incipiente, o que está relacionada à própria limitação de conhecimento biológico e químico sobre essa planta, fundamentais para o aprimoramento de técnicas de cultivo e exploração sustentáveis. Nesta pesquisa, monitoramos o comércio dos principais produtos de pau-rosa: sementes, mudas, biomassa e óleo essencial, e identificamos problemas e possíveis estratégias para desenvolvimento da cadeia produtiva, junto a produtores rurais, empresários, analistas de órgãos ambientais, técnicos, extensionistas e pesquisadores. Além disso, analisamos a variação da composição volátil em árvores plantadas e em populações naturais, relacionando a variabilidade química a diversos fatores, como: idade da árvore, órgão da planta, localização geográfica e morfotipos reconhecidos como pau-rosa. Com objetivo de simplificar o processo de obtenção dos dados químicos, testamos a técnica de *headspace* em conjunto com a cromatografia gasosa acoplada a um detector de massas (HS-GC-MS) para identificar os compostos voláteis presentes na matéria vegetal. Comparamos estes resultados aos obtidos com a análise tradicional por cromatografia gasosa acoplada a um detector de massas (CG-MS) de óleos essenciais obtidos por hidrodestilação. Em relação à cadeia de valor, verificamos que em 2019 apenas três empreendedores comercializavam mudas da espécie no mercado formal, com média de produção de 20 mil mudas por ano e preços de venda entre R\$ 10,00 e R\$ 15,00, por unidade. Ao monitorar a cadeia produtiva por mais cinco anos, identificamos 12 fornecedores de sementes e 24 fornecedores de mudas, a maioria comercializando pequenas quantidades no mercado informal. Além disso, registramos que 104 pequenos agricultores possuem cultivos que totalizam mais de 9 mil árvores registradas em inventários florestais, dos quais apenas 36 possuíam autorização para explorar biomassa até 2023. Apenas duas empresas possuem autorização para exportar óleo essencial de pau-rosa e são autossuficientes na produção de biomassa, dispendo de um total de mais de 40 mil árvores plantadas. Na última década, a exportação média foi equivalente a 2 toneladas de óleo essencial por ano, com valor atual de USD 331.56 Kg⁻¹. Com as

análises químicas realizadas em um cultivo comercial, avaliamos que o uso da técnica por *headspace* do material vegetal é eficaz para prever a presença dos principais compostos de interesse, embora apresente diferenças nas proporções relativas dos compostos orgânicos voláteis quando comparada à hidrodestilação. Verificamos ainda que a composição dos voláteis não difere de forma significativa entre folhas e galhos de árvores plantadas, mas varia significativamente de acordo com a idade do cultivo, destacando uma maior presença de óxidos de linalol em plantas mais antigas, e um teor superior de linalol em folhas e galhos de árvores mais jovens. Ao analisar a composição volátil da madeira, folhas e galhos de cinco morfotipos de pau-rosa em seis populações da Amazônia Central, observamos distinções significativas em um morfotipo em relação aos demais e entre algumas populações. Em contraponto ao resultado obtido nas análises de um cultivo comercial, constatamos diferenças na composição volátil entre folhas, galhos e madeira das árvores estudadas nas diferentes populações. Em relação às análises econômicas, observamos um mercado em evolução, com aumento da oferta de sementes e mudas e crescimento dos cultivos com fins comerciais. No entanto, muitos desafios persistem, especialmente no que diz respeito à formalização e legalização das atividades produtivas e à garantia da qualidade do óleo essencial produzido. Dessa forma, abordagens integradas que combinam pesquisa científica, capacitação e políticas públicas são essenciais para promover uma produção sustentável e a conservação desse recurso. Com as análises químicas, constatamos que diversos fatores estão relacionados de forma complexa à composição volátil nas plantas estudadas, reforçando a importância de abordagens integradas que poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficazes na produção de óleo essencial de alta qualidade.

Palavras-chave: *Aniba rosiodora* Ducke., bioeconomia bioecológica, compostos voláteis, linalol, óleo essencial, silvicultura.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Introdução geral..... | 14 |
| Objetivos | 17 |
| Objetivo Geral | 17 |
| Objetivos Específicos | 17 |
| Capítulo 1..... | 18 |
| O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (<i>Aniba</i> spp.) no Estado do Amazonas | |
| Resumo..... | 19 |
| Introdução..... | 20 |
| Métodos | 21 |
| Resultados e Discussão..... | 23 |
| Considerações finais..... | 28 |
| Referências..... | 29 |
| Capítulo 2..... | 31 |
| The rosewood (<i>Aniba</i> spp., Lauraceae) value chain in the Brazilian Amazon | 32 |
| Abstract..... | 32 |
| Introduction | 33 |
| Methods | 34 |
| Results and Discussion | 36 |
| Conclusion..... | 48 |
| References..... | 49 |
| Capítulo 3..... | 54 |
| Rapid analysis of variations in volatile organic composition in rosewood trees | |
| (<i>Aniba</i> spp., Lauraceae) cultivated in the Amazon | |
| Introduction | 56 |

| | |
|--|------------|
| Materials and Methods | 58 |
| Results and Discussion | 61 |
| Conclusions | 72 |
| References..... | 73 |
| Capítulo 4..... | 84 |
| Variabilidade na composição volátil em plantas reconhecidas como Pau-rosa | 86 |
| (<i>Aniba</i> spp., Lauraceae) em populações da Amazônia Central | 86 |
| Abstract | 86 |
| Introdução..... | 87 |
| Parte Experimental..... | 88 |
| Resultados e Discussão..... | 92 |
| Conclusões | 99 |
| Referências bibliográficas..... | 101 |
| Síntese..... | 112 |
| Referências bibliográficas | 114 |

Lista de tabelas

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Table 1. Compilation of the factors and associated problems that affect the rosewood production chain in Brazil..... | 37 |
| Table 2. Production data for rosewood plantations owned by small producers in the state of Amazonas..... | 42 |
| Table 3. Production data for rosewood plantations owned by licensed companies in the state of Amazonas. | 43 |
| Table 4. Compilation of proposals for interventions that overcome priority problems related to the rosewood value chain in Brazil..... | 46 |

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| Table 1. Identification of volatile organic compounds in samples of branches and leaves of rosewood in the fresh and dry states and in the essential oil. | 65 |
| Table 2. Identification of volatile organic compounds in samples of rosewood branches and leaves from trees planted 5, 15, 27 and 35 years ago..... | 70 |
| Table S1. Result of PERMANOVA considering the influence of variables state and type of material on the relative composition of volatile organic compounds (VOCs).. | 81 |
| Table S2. Paired comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between fresh and dry samples analyzed using HS-GC-MS, and essential oils analyzed using GC-MS. | 82 |
| Table S3. Pairwise comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between different age groups.. | 82 |
| Table S4. Results of the ANOVA used to assess the impact of tree age and type of plant material on linalool concentration of the essential oils (EOs).. | 82 |
| Table S5. Result of the Tukey test for the comparison of linalool concentrations in essential oils (EOs) in different age groups..... | 83 |

Capítulo 4

| | |
|--|-----|
| Tabela: 1. Composição relativa média dos compostos orgânicos voláteis em galhos (G), folhas (F) e madeira (M), nos diferentes morfotipos de pau-rosa identificados em seis populações da Amazônia Central..... | 90 |
| Tabela S1. Resultado da PERMANOVA considerando a influência das variáveis Morfotipo, População e Matéria na composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs)..... | 108 |
| Tabela S2. Comparação pareada da composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) entre os diferentes grupos de Morfotipos..... | 108 |
| Tabela S3. Comparação pareada da composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) entre as diferentes Populações..... | 109 |
| Tabela S4. Importância dos Componentes Principais na Análise de Componentes Principais (PCA). | 109 |
| Tabela S5. Contribuição percentual das variáveis nos 3 primeiros Componentes Principais derivados da Análise de Componentes Principais (PCA)..... | 110 |

Lista de figuras

Capítulo 1

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localização dos empreendimentos que produzem e comercializam mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas e produção média anual por município. | 25 |
| Figura 2. Informações da produção, demanda e preços de venda praticados na comercialização de mudas de pau-rosa pelos três empreendimentos. | 26 |
| Figura 3. Municípios do Estado do Amazonas com potencial para coleta de sementes em plantios ou populações naturais de pau-rosa. | 28 |

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| Figure 1. Rosewood products and respective minimum and maximum prices observed between 2019 and 2023. | 36 |
| Figure 2. Mapping of the rosewood value chain, highlighting the cities where the productive activities were identified between 2019 and 2023 (A), the location of the Paracuni River, where the largest number of suppliers of seeds, seedlings and plantations by small producers is concentrated (B), and the location of the state of Amazonas in Brazil, where the research was carried out (C). | 38 |
| Figure 3. Historical series of the amount of rosewood essential oil exported by Brazil (main axis) and free on board (FOB) export values (secondary axis). | 44 |

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| Fig. 1. NMDS representing the dissimilarities between the volatile organic compounds from the samples of fresh and dry branches and leaves and essential oil (A), and between the samples of branches and leaves of trees of different ages (B). | 63 |
| Fig. 2. Heat map representing the number of samples in which each VOC was identified, considering the total of 40 trees, two types of material (branches and leaves) and three states of material (fresh, dry and essential oil). | 66 |
| Fig. 3. Boxplot representing the mean of and variance in linalool concentrations in essential oils (EOs) extracted from branches and leaves of rosewood trees of different ages. | 72 |

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| Figura: 1. Área de estudo, considerando as árvores coletadas em cada localidade (A), com a localização da região em relação à Amazônia Legal (B) e o Brasil (C). | 89 |
| Figura: 2. Análise dos Componentes Principais representando as dissimilaridades na composição volátil de folhas, galhos e madeira de cinco morfotipos de pau-rosa, distribuídos em seis populações da Amazônia Central. | 96 |
| Figura: 3. NMDS representando as dissimilaridades entre os compostos orgânicos voláteis das amostras de galhos, folhas e madeiras das árvores reconhecidas como pau-rosa. | 98 |

Introdução geral

As florestas amazônicas são ambientes extremamente diversos, onde estima-se que ocorram cerca de 15 mil espécies de árvores (ter Steege et al. 2015, 2020). Esses ambientes possuem alta capacidade de prestação de serviços ambientais fundamentais para a população mundial, como a atenuação das mudanças climáticas e a conservação da biodiversidade (Fearnside 1999, Strand et al. 2018, Garrett et al. 2021). A floresta amazônica tem ainda valores intrínsecos, como o direito à existência das centenas de povos indígenas e outros povos tradicionais que a habitam (Fearnside 2021). Tendo uma porção significativa dessas florestas em seu território, o Brasil é constantemente centro de pautas internacionais que cobram medidas para superar as principais ameaças a esta biodiversidade. Estes riscos incluem o desmatamento, as queimadas, a exploração madeireira e, de forma estreitamente relacionada a estes fatores, as alterações climáticas (Fearnside 1999, Gatti et al. 2021).

O modelo econômico de desenvolvimento para a região, em constante disputa política no Brasil, é um fator decisivo que pode agravar ou atenuar as ameaças à manutenção dos serviços ecossistêmicos da Amazônia brasileira (de Area Leão Pereira et al. 2019, 2020, Peres et al. 2023, Rodrigues 2023). Com grande poder estrutural, discursivo e instrumental, o setor do agronegócio ainda molda a economia de base biológica no país, promovendo uma agricultura intensiva com mudanças contínuas no uso do solo (de Area Leão Pereira et al. 2020, Bastos Lima 2021, Ellwanger et al. 2023). Essa proposta é relacionada à bioeconomia de biorrecursos, que embora proponha o crescimento econômico aliado à sustentabilidade ambiental, tem como foco principal o desenvolvimento tecnológico de novos produtos de base biológica e muito menos a proteção ambiental dos recursos (Duchesne and Wetzel 2003, Bugge et al. 2016).

O domínio do agronegócio tem impactos negativos para os pequenos agricultores, para a diversidade alimentar e para os ecossistemas naturais, ao impulsionar o desmatamento e mudanças no uso da terra com maior legitimidade social, sob o guarda-chuva da bioeconomia (Bastos Lima 2021). Tal modelo se contrapõe à bioeconomia bioecológica, que preconiza o desenvolvimento de sistemas de produção integrados e produtos de qualidade e identidade territorial, com as principais metas e objetivos relacionados à sustentabilidade, biodiversidade e conservação de ecossistemas (Bugge et al. 2016). Ao considerar esse conceito, a bioeconomia bioecológica representa um modelo potencial para a conservação da biodiversidade amazônica, aliando o desenvolvimento socioeconômico com a manutenção da floresta em pé.

O potencial da biodiversidade atrai cada vez mais o interesse da indústria (Ellwanger et al. 2023), o que representa uma oportunidade ao Brasil em aproveitar a rica diversidade química associada à sua biodiversidade, em campos como da química medicinal, desenvolvimento de medicamentos, fragrâncias e cosméticos (Valli et al. 2018). A oportunidade que se apresenta para o desenvolvimento de novos produtos leva em conta um mercado internacional ávido de novidades da floresta tropical, e um bom direcionamento corresponde aos produtos para a indústria de perfumaria e cosméticos (Barata 2012). Um exemplo é o crescimento do mercado global de óleos essenciais extraídos de plantas aromáticas, estimado em 8.8 bilhões de dólares em 2022 e com projeção de crescimento de 11.8% até 2027, equivalente a 15.3 bilhões de dólares (Markets and Markets 2023).

Em 2022, o Brasil foi o segundo principal fornecedor de óleo essencial no mundo em relação à quantidade exportada e o quinto em relação ao valor gerado, com aproximadamente 55 mil toneladas e 420 milhões de dólares faturados com a exportação (ITC 2023). Na última década, o principal produto exportado pelo Brasil nesta categoria, correspondeu ao óleo essencial de laranja (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck e outras), subproduto da indústria do suco (Bizo and Rezende 2022), seguido dos óleos essenciais de limão (*Citrus* spp.) e eucalipto (*Eucalyptus* spp.) (MDIC 2023). Com isso, observa-se que apesar da riqueza e qualidade aromática de centenas de espécies da Amazônia, com ótimas condições para exploração econômica (Maia and Andrade 2009), apenas uma parcela irrisória da produção exportada é referente aos óleos essenciais extraídos de plantas dessa região.

Uma das poucas exceções atuais corresponde ao óleo essencial de pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae), que representou uma pequena parcela do montante de óleo exportado pelo Brasil, cerca de 0.01% em relação à quantidade e 0.25% em relação ao faturamento total gerado em 2023. No entanto, se destaca dos demais em relação ao valor de exportação alcançado, chegando a atingir USD 331.56 Kg⁻¹ em 2023, enquanto óleos de laranja, limão e eucalipto variaram entre USD 12.00 e USD 21.00 Kg⁻¹ naquele ano (MDIC 2023). Um dos diferenciais do óleo de pau-rosa corresponde a um alto teor de linalol, um composto quiral, que combinado a outros monoterpenos e sesquiterpenos minoritários, conferem um *bouquet* aromático muito peculiar (Zellner et al. 2006, Barata and Carvalho 2008, Lara et al. 2018).

A qualidade do óleo essencial de pau-rosa é reconhecida há mais de cem anos, quando passou a ser explorado em praticamente toda floresta amazônica para suprir uma demanda da indústria de perfumes finos (May and Barata 2004). O extrativismo de pau-rosa é um dos piores exemplos de uso da biodiversidade da Amazônia com fins comerciais, marcado pela exaustão do recurso ao ponto de provocar o desaparecimento quase completo da planta. Considerada espécie ameaçada de extinção

no Brasil desde 1992 (BRASIL 1992), e incluída no Anexo II da Convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies da Flora e Fauna Selvagens em Perigo de Extinção (CITES) em 2010 (CITES 2010), atualmente só é possível produzir óleo essencial a partir de árvores plantadas (BRASIL 2014).

A valorização deste óleo essencial tem estimulado o aumento do número de plantios de pau-rosa na Amazônia brasileira, muitos desses realizados por povos indígenas e populações tradicionais com algum histórico relacionado ao extrativismo. Com isso, a expectativa de geração de renda através do manejo sustentável dos cultivos tem sido um fator determinante para a conservação genética desse recurso. Técnicas sustentáveis de exploração são bem reportadas na literatura, com a demonstração da viabilidade do sistema de exploração a partir do manejo da copa das árvores, que apresenta uma boa capacidade de rebrota após sucessivas podas (Sampaio et al. 2005, Barata 2007, Ferraz et al. 2009, Krainovic et al. 2017). Apesar das potencialidades, a cadeia produtiva considerando o manejo sustentável dos cultivos, com a inclusão de povos e comunidades tradicionais em uma perspectiva de comércio justo, ainda não está consolidada.

Na área socioeconômica podemos destacar um trabalho de maior relevância, publicado há quase 20 anos, onde os pesquisadores revelaram informações produtivas e econômicas da exploração de Pau-rosa no Brasil (May and Barata 2004). Esses autores destacaram uma série de problemáticas da cadeia, como a confusão de espécies exploradas e a ampla variação química dos óleos produzidos, por exemplo. Desde então, há uma lacuna na literatura científica de alcance internacional com essa abordagem, o que nos motivou a produzir os dois primeiros capítulos dessa tese: o primeiro relacionado à cadeia de sementes e mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas, e o segundo sobre a cadeia de valor em um contexto mais amplo, incluindo também a produção e comércio de biomassa e óleo essencial, além de uma análise dos fatores que dificultam o desenvolvimento da atividade e propostas de intervenção para superar os principais problemas identificados.

Além disso, a expansão dos cultivos de pau-rosa na Amazônia brasileira, refletem a necessidade de compreender a composição química das árvores matrizes e plantadas para exploração, para garantir a produção de materiais vegetativos e óleos essenciais de alta qualidade. Por isso, no terceiro capítulo empregamos a técnica de *headspace* em conjunto com cromatografia gasosa acoplada a um detector de massas (HS-GC-MS) para identificar os compostos voláteis em folhas e galhos frescos e secos, e avaliar se a metodologia pode ser usada na predição da qualidade química do óleo essencial. Adicionalmente, avaliamos as variações da composição volátil entre árvores de diferentes idades e partes da planta.

Já no quarto capítulo, avaliamos a variabilidade química entre cinco morfotipos de pau-rosa em seis diferentes populações da Amazônia Central, além da variação dos compostos voláteis entre folhas, galhos e madeira. Com a integração desses estudos sobre a cadeia de valor e a distribuição das variações químicas entre as plantas que são reconhecidas como pau-rosa, buscamos disponibilizar informações relevantes para a tomada de decisão sobre políticas para a espécie, seleção de material propagativo, manejo das áreas de cultivo e planejamento da exploração para produção de óleo essencial.

Objetivos

Objetivo Geral

Analisar a cadeia de valor, considerando o mercado de sementes, mudas, biomassa e óleo essencial, avaliar métodos analíticos para predição da qualidade de óleo essencial e identificar o efeito de diferentes fatores na variação dos compostos voláteis em plantas reconhecidas como pau-rosa na Amazônia brasileira.

Objetivos Específicos

1. Analisar o mercado de sementes e mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas;
2. Produzir um diagnóstico sobre a cadeia de valor de pau-rosa;
3. Testar o uso de uma técnica simplificada de detecção de compostos voláteis para a predição da qualidade de óleo essencial e análise da variabilidade química em cultivos;
4. Avaliar a variabilidade da composição volátil entre diferentes morfotipos, populações e órgãos da planta.

Lara, C. S., Costa, C. R., Sampaio, P. T. B. (2021). **O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba spp.*) no Estado do Amazonas**. Revista de Economia e Sociologia Rural, 59(3), e221035. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.221035>

O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba spp.*) no Estado do Amazonas

*The market for seeds and seedlings of rosewood (*Aniba spp.*) in the State of Amazonas*

Caroline Schmaedeck Lara¹, Caroline Rabelo Costa², Paulo de Tarso Barbosa Sampaio¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais, Manaus (AM), Brasil. E-mails: carol.slara@gmail.com; sampaio@inpa.gov.br

²Instituto de Pesquisas e Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas, Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba (SP), Brasil. E-mail: caroline.rabelo@gmail.com

Resumo

O pau-rosa é uma das espécies com maior potencial econômico atualmente na Amazônia brasileira. Desta árvore é extraído óleo valorizado pela indústria de perfumaria, tanto que sua exploração levou a espécie à ameaça de extinção. Com a diminuição do recurso, a produção do óleo oscilou de 46 a 2 toneladas ano⁻¹ nos últimos 20 anos, aumentando o preço de venda de USD 40.00 kg⁻¹ a USD 320.00 kg⁻¹ neste mesmo período. Esta valorização tem estimulado o plantio da espécie, que se depara com a limitada disponibilidade de mudas para comercialização. Diante disto, o objetivo desta pesquisa foi analisar o mercado de sementes e mudas de pau-rosa no Amazonas, identificando o número de produtores, produção e demanda média anual, preços praticados, perfil dos clientes e dificuldades na produção. Os produtores foram identificados através de pesquisas na internet e contatados para elucidar questões mais específicas da cadeia produtiva. Foi verificado que atualmente apenas três empreendedores comercializavam mudas da espécie com certa regularidade, totalizando a média de produção de 20.000 mudas/ano com preço de venda entre R\$ 10,00 e R\$ 15,00. É evidente que este mercado representa uma oportunidade promissora de negócio, que poderá obter maior êxito caso sejam estabelecidos novos arranjos produtivos.

Palavras-chave: silvicultura, Amazônia, arranjo produtivo.

Abstract

The rosewood is one of the species with the greatest economic potential in the Brazilian Amazon because its oil is highly valued by the perfumery industry. However, due to exploration the species is threatened of extinction. With the decrease in the resource, oil production has been reduced from 46 to 2 tons/year in the last 20 years, increasing the sale price from USD 40.00 kg⁻¹ to USD 320.00 kg⁻¹ in this same period. This valorization has stimulated the planting of the species, which is faced with limited availability of seedlings for commercialization. Therefore, his research aimed to analyze the

seed and seedlings market of rosewood in Amazonas, identifying the number of producers, average annual production and demand, prices practiced, customer profile and production difficulties. Producers were identified through Internet surveys and contacted to elucidate more specific issues in the production chain. We verified that currently, only three entrepreneurs commercialize seedlings of the species with a certain regularity, totaling the average production of 20.000 seedlings/year with sale price between R\$ 10.00 and R\$ 15.00. This market represents a promising business opportunity, which can be more successful if new production arrangements are established.

Keywords: forestry, Amazon, productive arrangement.

Introdução

O pau-rosa (*Aniba* spp.) é uma árvore da família Lauraceae que ocorre em toda a Amazônia Legal, incluindo o Brasil, Guiana Francesa, Suriname, Guiana, Venezuela, Peru, Colômbia e Equador (Kubtzki & Renner, 1982). Ela iniciou a ser explorada em 1882 na Guiana Francesa devido ao óleo essencial extraído da árvore, de característico odor doce e amadeirado, muito apreciado pela indústria de perfumaria (Vial-Debas, 1996). No Brasil, destacou-se pela importância econômica que assumiu principalmente entre 1940 e 1970, quando foi produzido em larga escala, chegando a ser considerado o terceiro principal produto na balança comercial do Amazonas (May & Barata, 2004).

Essa exploração, no entanto, foi extremamente insustentável, pois praticamente todas as árvores encontradas na floresta eram derrubadas para produção de óleo nas usinas de destilação. Estima-se que entre os anos de 1937 e 2002 foram derrubadas no mínimo 825 mil árvores de pau-rosa na Amazônia brasileira, sendo exportadas aproximadamente 13 mil toneladas de óleo essencial produzidos em mais de 50 destilarias que se instalaram em municípios do interior do Amazonas e Pará (Homma, 2016). Devido à intensa exploração, atualmente é considerada ameaçada de extinção (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, 2011; Brasil, 1992), sendo dificilmente encontrada em populações naturais.

Desde 2011, com a inclusão da espécie no Anexo II da Convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies da Flora e Fauna Selvagens em Perigo de Extinção (CITES), a quantidade de óleo exportada foi inferior a 225 toneladas, chegando ao valor médio de 2 toneladas ano⁻¹ (Brasil, 2018). Esta inclusão significa que a espécie passou a fazer parte de um acordo de combate ao comércio ilegal entre os países signatários do CITES, o que, somado às restrições impostas pela legislação, coibiu a extração predatória e irregular. Por outro lado, a demanda pelo produto se manteve

alta, o que levou ao aumento do preço de exportação do óleo essencial de USD 30.00 kg⁻¹ no início da década de 1990 a aproximadamente USD 320.00 kg⁻¹ em 2019 (Brasil, 2019).

A alta valorização do produto no mercado, somada ao incentivo promovido por Organizações Não Governamentais (ONGs) e pesquisadores, relacionado tanto à conservação quanto à possibilidade de geração de renda através da silvicultura, tem estimulado o estabelecimento de inúmeros plantios por empresários, agricultores, populações e povos tradicionais, principalmente nos Estados do Amazonas e Pará. Aliado a isto, tem sido observado que a sustentabilidade na produção pode ser alcançada através do manejo da copa em substituição ao corte raso da árvore para produção (Contim & Contim, 2018; Krainovic et al., 2017; Sampaio et al., 2005), sendo que o óleo obtido de folhas e galhos apresenta qualidade semelhante ao da madeira (Lara et al., 2018; May & Barata, 2004). Apesar deste contexto, são inúmeras as dificuldades encontradas pelos produtores que pretendem investir na produção deste recurso florestal, sendo a limitada disponibilidade de sementes e mudas um dos principais entraves atualmente no desenvolvimento desta cadeia produtiva.

A produção de sementes e mudas de espécies florestais é regulamentada no Brasil pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), através da Lei nº 10.711, de 5 de agosto de 2003, assim como Decretos e Instruções Normativas complementares. Esta legislação estabelece que os produtores devem se cadastrar no Sistema Nacional de Sementes e Mudas (SNSM), obtendo assim o seu Registro Nacional de Sementes e Mudas (RENASSEM). Apesar de apresentar inúmeras fragilidades desde sua implementação, a legislação é importante para que produtores rurais e empresas do setor, consumidores destes produtos, tenham maior segurança em relação à origem e qualidade dos produtos adquiridos.

Devido à importância econômica da espécie e a crescente valorização de seu óleo no mercado, esta pesquisa foi realizada com o objetivo de analisar o mercado de sementes e mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas, identificando o perfil dos produtores, os preços praticados, a produção e demanda atual, o perfil dos consumidores, a origem do material vegetativo e as principais dificuldades do setor.

Métodos

Identificação e caracterização dos produtores de sementes e mudas de pau-rosa

Apesar de a ocorrência da espécie no Brasil já ter sido registrada nos Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima (May & Barata, 2004; Santana et al., 1997), nesta pesquisa apenas o

Estado do Amazonas foi considerado, pois é onde se concentra a produção de óleo exportada pelo país atualmente (Brasil, 2019). Para o mapeamento dos produtores de sementes e mudas do Estado do Amazonas foi utilizado inicialmente o banco de dados do RENASEM, disponibilizado online pela Superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SFA) do MAPA¹. Com a análise dos dados disponíveis, foi possível estimar a quantidade e localização de cadastros no Estado do Amazonas, nas seguintes categorias: Comerciante, Produtor de Mudas e Produtor de Sementes. Os registros constantes com validade expirada foram desconsiderados nesta pesquisa.

Após a identificação dos cadastros, buscou-se o contato por telefone e/ou e-mail com todas as pessoas físicas e jurídicas identificadas, com o objetivo de verificar quais empreendimentos produzem atualmente a espécie alvo da pesquisa. Foi adicionada ao universo amostral uma empresa sem cadastro no RENASEM, identificada através de site de vendas da internet. Foi identificado o total de três empreendimentos que comercializavam mudas de pau-rosa com regularidade, constituindo o universo amostral desta pesquisa. Com estas informações, foi produzido mapa de distribuição dos empreendimentos utilizando o software QGIS 2.18.

Análise do mercado de sementes e mudas de pau-rosa no Amazonas²

Através do contato com os empreendedores, realizado por telefone e/ou pessoalmente, foram identificadas as seguintes questões:

Tema 1 – Produção e demanda: Qual sua produção média anual de sementes e mudas de pau-rosa (unidades)? Qual a sua produção disponível para comercialização neste momento? Qual a demanda média anual de sementes e mudas de pau-rosa que sua empresa recebe? Qual o custo de aquisição das sementes e de produção das mudas? Qual o preço de venda das mudas? A venda de pau-rosa corresponde a qual porcentagem do seu faturamento total com o negócio?

Tema 2 – Origem e perfil dos clientes: Os principais compradores são geralmente de qual município/Estado? Qual o perfil do cliente de sementes e mudas de pau-rosa (agricultores, ONGs, empresas, instituições de ensino/pesquisa, outros viveiros)? Como eles acessam seu produto? Qual a principal motivação da compra (revenda, plantio comercial, arborização, recuperação de áreas degradadas)?

¹ Acesso disponível no site: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/renasem/>. 2

² Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE): 09974519.7.0000.0006

Tema 3 – Origem e perfil dos fornecedores: Qual é a origem das sementes/mudas que você comercializa? Qual o perfil dos fornecedores (coletores independentes, empresas, coletadas por você ou sua empresa)? É realizada a identificação botânica das árvores? Caso seja, qual o método (exemplo: envio de ramos para herbários, checagem em livros, consulta a especialistas, funcionários do viveiro, pelo próprio coletor)?

Tema 4 – Entraves da produção: Quais são as principais dificuldades encontradas para a produção de sementes e mudas de pau-rosa?

Os dados obtidos com as entrevistas foram compilados em planilha Excel para geração dos gráficos, utilizando análises de estatística descritiva.

Resultados e Discussão

Identificação e caracterização dos produtores de sementes e mudas de pau-rosa

Foram identificados 18 registros no RENASEM em vigor no mês de outubro de 2018 para o Estado do Amazonas, sendo 14 destes na categoria Produtor de Mudas e apenas quatro para as categorias Produtor de Sementes (2) e Comerciantes (2). Dois destes empreendimentos possuem registro em duas categorias (Produtor de Sementes/Produtor de Mudas, Comerciante/Produtor de Mudas). Portanto, existem apenas 16 empreendimentos regulamentados atualmente no Estado junto ao MAPA, conforme a legislação específica desta atividade.

Destes, apenas três são registrados como pessoa física e dois correspondem a instituições públicas (Prefeitura Municipal e Universidade Federal), o restante (11) consiste em empresas privadas com fins lucrativos. Em relação à localização dos empreendimentos, aproximadamente 69% concentram-se em apenas dois municípios, sendo que a cidade de Maués conta com o número mais expressivo (6), seguido da capital Manaus (5). Os outros cinco municípios identificados (Apuí, Manicoré, Iranduba, Humaitá e Careiro da Várzea) possuem apenas um empreendimento regularizado no RENASEM. O baixo número de empreendimentos regularizados no Estado pode estar associado à dificuldade dos produtores de mudas, especialmente das espécies florestais nativas, em atender às regulamentações do MAPA, resultando na atual informalidade no setor. De acordo com Silva et al. (2015), o volume e complexidade dos documentos exigidos, o alto custo de regularização, a ausência de definição de parâmetros técnicos específicos para a maioria das espécies florestais, são alguns dos principais entraves com os quais os produtores se deparam para obter o registro do RENASEM.

Após a identificação dos empreendimentos regularizados, uma dificuldade encontrada foi a localização dos contatos dos empreendedores para avançar na coleta de dados da pesquisa. É importante ponderar que o sistema do RENASEM é bastante limitado em relação às informações disponibilizadas, que estão restritas ao período de vigência do registro e dados básicos do empreendimento (nome, localização geográfica, CPF/CNPJ). Neste sentido, a plataforma do MAPA poderia ser bastante otimizada, adicionando informações como o contato dos empreendimentos, capacidade de produção e espécies comercializadas, por exemplo.

Apenas dois empreendimentos possuem site ou rede social na internet, o que tornou necessário o esforço para localização dos telefones/emails dos produtores através do contato realizado com prefeituras, instituições de ensino e pesquisa e ONGs com atuação nos municípios de abrangência da pesquisa. Não foi possível identificar o contato de dois empreendimentos, ficando fora do universo amostral.

Dos 14 registros localizados em que o contato foi efetivado, apenas cinco têm produzido mudas de pau-rosa nos últimos anos. Nenhum destes é produtor de sementes, e dois possuem produção em pequena quantidade sem objetivos comerciais, atuando com a doação de mudas para produtores e comunidades interessadas no plantio no município de Maués. Outro empreendimento produz a espécie de forma esporádica, com produção igual ou inferior a 200 mudas ano⁻¹. Estes três casos foram excluídos da pesquisa de mercado, por não apresentarem as informações requeridas de acordo com o objetivo da pesquisa. Por outro lado, foi incluído um produtor que comercializa mudas da espécie em plataforma virtual de produtos agropecuários, com o objetivo de considerar os empreendimentos com maior relevância na produção e comércio de mudas de pau-rosa atualmente no Estado, independentemente de sua regularidade junto ao MAPA.

Os resultados apresentados na Figura 1 representam os únicos três empreendimentos identificados durante esta pesquisa que comercializam com regularidade mudas de pau-rosa no Amazonas atualmente. Eles estão localizados nos municípios de Manaus, Maués e Apuí, sendo representados como Empreendimentos A, B e C, respectivamente.

Empreendimentos de produção de mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas - 2018

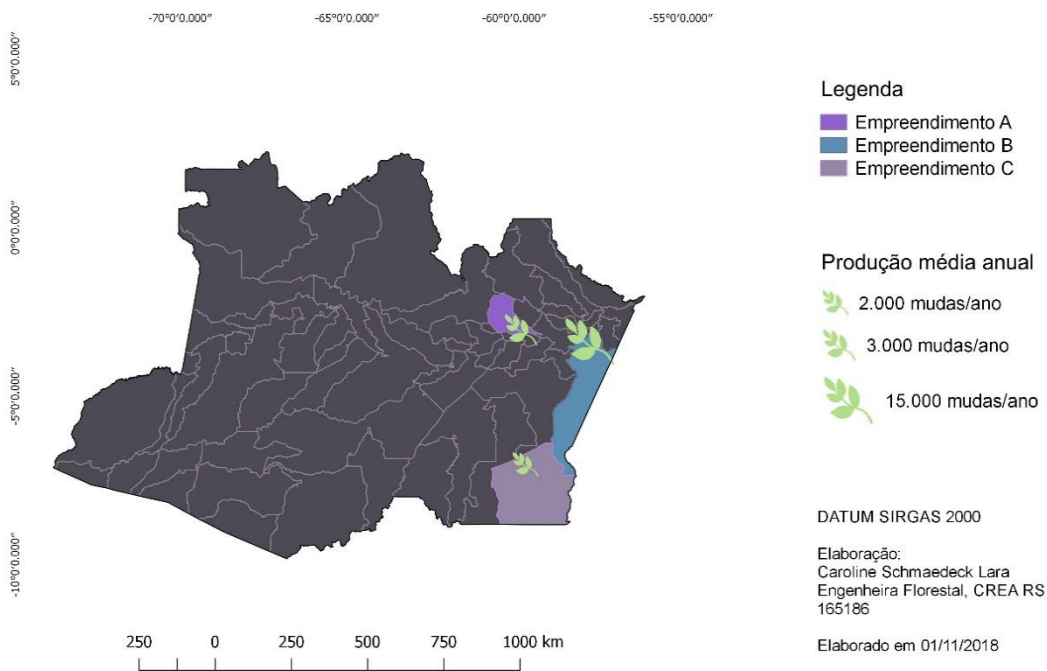


Figura 1. Localização dos empreendimentos que produzem e comercializam mudas de pau-rosa no Estado do Amazonas e produção média anual por município.

Análise do mercado de sementes e mudas de pau-rosa no Amazonas

O empreendimento B foi o que apresentou maior produção média de pau-rosa, equivalente a 15.000 mudas ano⁻¹, seguido dos empreendimentos A e C, com aproximadamente 3.000 e 2.000 mudas ano⁻¹, respectivamente. Isso totaliza produção média de 20.000 mudas ano⁻¹ para o Estado. A produção disponível para comercialização quando a pesquisa foi realizada era de 15.000, 1.000 e nenhuma muda da espécie nos empreendimentos B, A e C, respectivamente. Cabe ressaltar que a frutificação da espécie é plurianual³ (Sampaio et al., 2003) e no ano de 2018 não houve registros de produção de frutos de acordo com os entrevistados, o que restringiu o fornecimento de sementes e consequentemente a produção de mudas. A demanda média anual recebida pelos três empreendimentos foi de aproximadamente 32.000 mudas, 60% superior à produção total dos mesmos.

³ Frutificação plurianual significa que a espécie não produz frutos anualmente, seguindo um padrão irregular de reprodução.

O preço de venda praticado é igual nos empreendimentos A e B, equivalente a R\$ 10,00 unidade⁻¹, enquanto o empreendimento C comercializa pelo valor de R\$ 15,00 unidade⁻¹ (Figura 2).

Todos os empreendedores relataram que o preço de venda das mudas de pau-rosa é superior às demais espécies florestais nativas comercializadas por suas empresas. Esta informação corrobora o diagnóstico produzido em 2015, cujo preço médio de venda de mudas florestais verificado para a região Norte do Brasil foi equivalente a R\$ 3,34 unidade⁻¹ no varejo e R\$ 2,23 unidade⁻¹ no atacado (Silva et al., 2015). A valorização das mudas de pau-rosa está associada na relação oferta x demanda e na dificuldade de acesso às sementes da espécie, aumentando-se assim o custo da produção, de acordo com os produtores.

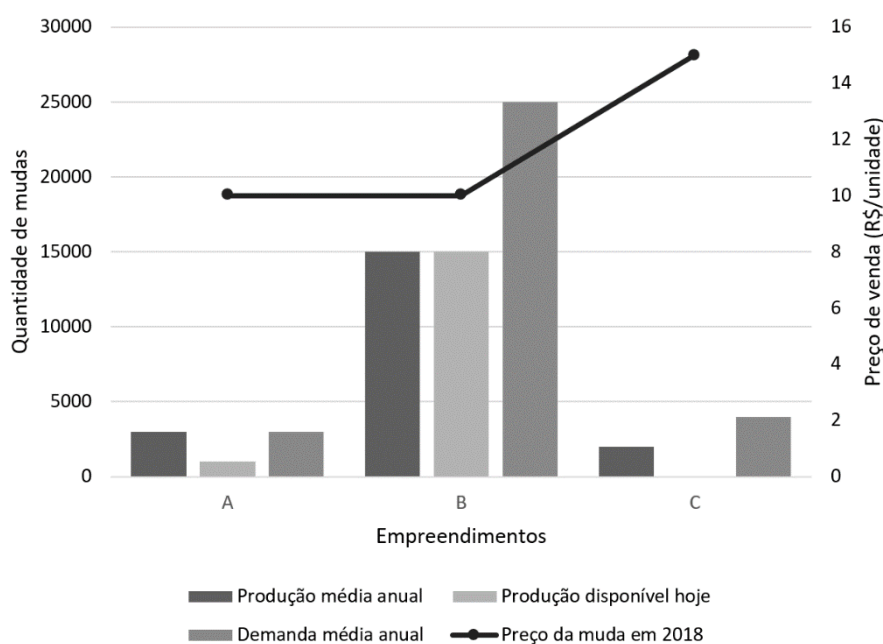


Figura 2. Informações da produção, demanda e preços de venda praticados na comercialização de mudas de pau-rosa pelos três empreendimentos.

Os três empreendimentos relataram que o faturamento relativo da venda de mudas de pau-rosa foi inferior a 10% do seu faturamento total anual. Considerando o tamanho do mercado, que de acordo com uma pesquisa de Silva et al. (2015) era de aproximadamente quatro milhões de mudas ano⁻¹ para a região Norte do Brasil, a produção de mudas de pau-rosa ocupa apenas 0,5% do total comercializado. Provavelmente se a oferta de mudas da espécie fosse superior à atual, a mesma ocuparia posição de destaque no setor devido à sua rentabilidade como produto florestal.

Em relação à origem dos clientes de mudas, foram relatados empreendedores e ONGs do Amazonas, Pará e São Paulo como os principais compradores. Com menor importância, foram citados o Estado do Espírito Santo e a região Sul do Brasil. Estes clientes adquirem as mudas com fins

principalmente comerciais, estabelecendo plantios para extração futura de óleo essencial ou para integrar projetos de recuperação de áreas degradadas.

Em relação ao perfil e motivação de compra, os clientes são principalmente empreendedores e produtores rurais para investimento no cultivo de plantas aromáticas, assim como instituições públicas e ONGs para fomento à produção florestal sustentável, geração de renda e recuperação de áreas degradadas. A maioria das sementes utilizadas para produção de mudas nos empreendimentos são fornecidas por coletores individuais de comunidades tradicionais e/ou indígenas, provenientes de plantios ou florestas localizadas na região dos empreendimentos. Cabe ressaltar que nenhum fornecedor de sementes de pau-rosa foi identificado durante a pesquisa, constatando que esta atividade é predominantemente realizada de forma informal. A identificação botânica das árvores utilizadas como porta-sementes é realizada na maior parte das vezes pelos próprios coletores e raramente auxiliada pela consulta a especialistas botânicos da academia.

As principais dificuldades citadas pelos produtores são a escassez de árvores matrizes na floresta nas proximidades de seus empreendimentos, a irregularidade na frutificação da espécie, além de problemas de sobrevivência das mudas devido às pragas florestais. Dessa forma, foi possível observar que o fornecimento de sementes é o principal fator limitante atualmente na cadeia produtiva estudada. Para superar esse problema, é indicado que seja fomentada a implementação de Áreas de Coletas de Sementes (ACSs) da espécie, nos municípios onde se sabe que há plantios ou árvores em populações naturais (Figura 3). O estabelecimento de rede colaborativa entre os diferentes atores envolvidos poderia ser determinante para o desenvolvimento da produção, além de promover a geração de renda para as pessoas que não possuem a intenção de investir na produzir mudas, mas têm árvores de pau-rosa em suas propriedades e que poderiam atuar na comercialização de sementes.

Municípios potenciais para implementação de Áreas de Coletas de Sementes de pau-rosa no Amazonas

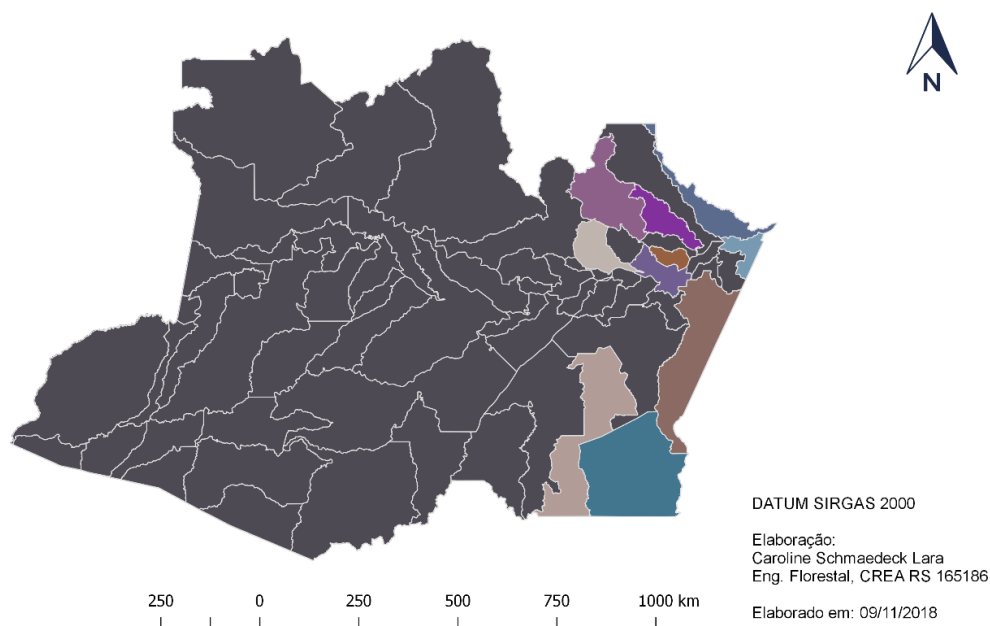


Figura 3. Municípios do Estado do Amazonas com potencial para coleta de sementes em plantios ou populações naturais de pau-rosa.

Considerações finais

O pau-rosa é espécie com potencial de geração de renda para empreendedores que desejam investir neste setor. Para viabilizar o desenvolvimento dos cultivos da espécie, é necessário superar inicialmente alguns entraves, com ações de implementação de Áreas de Coleta de Sementes para facilitar a produção de mudas; desenvolver estratégias para ampliar o apoio do poder público, universidades e ONGs para regularização dos produtores de sementes e mudas no RENASEM, além de avançar na profissionalização dos empreendimentos de produção de mudas em relação à divulgação dos produtos. Além disso, a criação de novos modelos de negócio, considerando a necessidade de estabelecimento de arranjos produtivos com a colaboração entre produtores interessados, poderá fortalecer os empreendimentos e facilitar a aquisição de mudas para implementação de plantios pelos clientes interessados.

Agradecimentos

Agradecemos aos empreendedores que participaram da pesquisa, disponibilizando as informações solicitadas.

Referências

Brasil. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente. (1992, abril 3). Portaria IBAMA nº 37-N, de 3 de abril de 1992. Reconhece como Lista Oficial de Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção a relação que se apresenta. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília.

Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. (2018). Acessado em 16 abril de 2018, de <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>.

Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. (2019). Acessado em 12 dezembro de 2019, de <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home/>

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora – CITES. (2011, april 18-21). IFRA Position on CITES rules for Guaiacwood and Rosewood. In 19^o meeting of the Plants Committee. Geneva: CITES.

Contim, L. A. S., & Contim, L. S. R. (2018). A tecnologia produtiva do pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) como aliada ao desenvolvimento sustentável da região amazônica. *Inclusão Social*, 12(1), 199-207.

Homma, A. K. O. (2016). Políticas para expansão do plantio de pau-rosa na Amazônia. In P. T. B. Sampaio & Z. R. C. Thomé (Eds.), *Uso e Conservação do Pau-Rosa* (1. ed., pp. 137-148). Manaus: EDUA.

Krainovic, P. M., Almeida, D. R. A., Desconci, D., Veiga-Júnior, V. F., & Sampaio, P. T. B. (2017). Sequential management of commercial rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) plantations in central Amazonia: Seeking sustainable models for Essential oil production. *Forests*, 8(12), 438. <http://dx.doi.org/10.3390/f8120438>

Kubitzki, K., & Renner, M. (1982). *Flora Neotropica 1982*, Monograph No. 31. New York: The New York Botanical Garden.

Lara, C. S., Barata, L. E. S., Sampaio, P. T. B., Eberlin, M. N., & Fidelis, C. H. V. (2018). Linalool enantiomeric distribution in rosewood-reminiscent populations in Central Amazon. *The Journal of Essential Oil Research*, 30(6), 464-469. <http://dx.doi.org/10.1080/10412905.2018.1492464>

May, P. H., & Barata, L. E. S. (2004). Rosewood Exploitation in the Brazilian Amazon: Options for Sustainable Production. *Economic Botany*, 58(2), 257-265. <http://dx.doi.org/10.1663/0013-0001>

- Sampaio, P. T. B., Barbosa, A. P., Vieira, G., Spironello, W. R., & Bruno, F. M. S. (2005). Biomassa da rebrota de copas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) em plantios sob sombra parcial em floresta primária. *Acta Amazonica*, 35(4), 491-494. <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672005000400014>
- Sampaio, P. T. B., Ferraz, I. D. K., & Camargo, J. L. C. (2003). Pau-rosa, *Aniba roseodora* Ducke. In I. D. K. Ferraz. *Manual de Sementes da Amazônia* (Vol. 3, 6 p.). Manaus: INPA.
- Santana, A., Ohashi, S., Rosa, L., & Green, C. L. (1997). Brazilian Rosewood Oil. *The International Journal of Aromatherapy*, 8(3), 16-20.
- Silva, A. P. M., Marques, H. R., Luciano, M. S. F., Santos, T. V. M. N., Teixeira, A. M. C., & Sambuichi, R. H. R. (2015). Gargalos da regulamentação da produção e comercialização de sementes e mudas florestais nativas no Brasil: contribuições para revisão da normativa. *Boletim Regional, Urbano, Ambiental*, 12, 71-80.
- Vial-Debas, C. (1996). Da tora ao linalol: uma interface economia-ecologia. In L. Emperaire. *A Floresta em jogo: o extrativismo na Amazônia Central* (pp. 183-190). São Paulo, UNESP.

Submetido: 16/abr/2019

Aceito: 15/out/2020

Classificação JEL: Q00, Q13, Q23.

Lara, C.S.; Barata, L.E.S; Minhós, L.M.; Lima Junior, M.J.V.; Santos, P.V.; Vianna, A.L.M; Sampaio, P.T.B. **The rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) value chain in the Brazilian Amazon.** Manuscrito em revisão na revista *Economic Botany*.

The rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) value chain in the Brazilian Amazon

Caroline Schmaedeck Lara^{*a}, Lauro Euclides Soares Barata^b, Liliane Martins Minhós^c, Manuel de Jesus Viera Lima Junior^d, Gloria Cecilia Macia Ruiz^a, Paulo Vinícius Santos^d, André Luiz Menezes Vianna^e, Paulo de Tarso Barbosa Sampaio^a

*Corresponding author: carol.slara@gmail.com, 55 92 991631841, ORCID 0000-0002-6352-5803

^aInstituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 69060-062, Brazil

^bUniversidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, 68040-255, Brazil

^cInstituto de Proteção Ambiental do Amazonas, Manaus, Amazonas, 69050-030, Brazil

^dUniversidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, 69080-900, Brazil

^eInstituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia, Manaus, Amazonas, 69058-250, Brazil

Abbreviated title: THE ROSEWOOD VALUE CHAIN IN BRAZIL

Number of words in the manuscript: 7.746

Abstract

Rosewood trees belong to the Lauraceae family, which occurs in the Amazon, and have been extensively exploited for the extraction of their essential oil. Currently, there is a strict control of trade due to the threat of extinction and, in Brazil, it is only possible to exploit planted trees. In recent years, we have monitored the production and trade of rosewood products that occurs in the state of Amazonas and identified priority problems and possible strategies for their resolution. We identified 12 seed suppliers, 24 seedling suppliers, 104 small producers with plantations totaling more than 9,500 trees. Two companies have the required license to export the extracted essential oil, with more than 42,000 trees planted. In the past decade, Brazil has exported on average two tons of essential oil year⁻¹, and the current export value is US\$ 331.56 kg⁻¹. Several biological, socioeconomic and institutional factors hinder the development of the chain, especially in the inclusion of small producers in productive arrangements. To overcome them, we recommend the implementation of interinstitutional programs that are focused on research and development, the qualification of producers, as well as the updating of specific public policies to promote production.

Keywords: *Aniba rosiodora*, Pau-rosa, Essential oil, Endangered species

Introduction

Rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) trees are recognized by their striking aroma, from which essential oil (EO) is extracted to be used in the formulation of perfumes. In Brazil, extractivism began in the state of Amapá and, in the 1920s, the first oil extraction plant was installed in Juruti Velho (Bastos 1943; Gottlieb 1957), in region of the lower Amazon. It is estimated that at least 825,000 trees were felled between 1937 and 2002 (Homma 2016), which gives an idea of the impact of the extractivism that has carried out in an extremely predatory way, and which has affected the conservation of natural populations. This situation led *A. rosiodora* to be considered an endangered species in Brazil as of 1992 (BRASIL 1992) and, since then, a series of laws have been sanctioned with the intention of regulating its exploitation. In 2010, the species was included in Annex II of the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Flora and Fauna (CITES 2010), reinforcing the fight against irregular trade within and outside the country. Currently, in Brazil, exploitation is only allowed when it involves plantations of rosewood trees and requires a license from the environmental agencies.

As a reflection of the restrictions regarding this resource and its scarcity, the production of EO has fallen sharply in recent decades. However, factors such as the high market value of the product and the incentivization by researchers to cultivate have stimulated the establishment of plantations in the Brazilian Amazon. Sustainable models of exploitation via the management of the tree's canopy have been consolidated in the academic environment and have been successfully put into practice by EO producers.

In the late 1950s, the chemist Otto Gottlieb observed the presence of EO in rosewood leaves and branches. In addition, numerous studies on the subject began to be conducted, demonstrating that the oil obtained from the leaves and branches has a quality comparable to that of wood (Fidelis et al. 2012; Lara et al. 2018; Zellner et al. 2006). In 2007, a project that indicated the feasibility of annual EO production from the leaves of young trees in agroforestry systems was featured in the Samuel Benchimol Award. Other scientific evidence has also demonstrated the potential of the canopy management system, which has a good regrowth capacity after successive prunings (Sampaio et al. 2005).

Despite the potential, this new phase of this production chain has not yet been consolidated. Some publications highlight the high incidence of predation of fruits and seeds by insects (Spironello et al. 2004) and the low supply of vegetative material in the market (Lara et al. 2021) as factors that

hinder the development of the activity. Although it corresponds to the initial link in the chain, seedling production is only part of a complex, dynamic, and multifactorial system, a characteristic that is little explored in academic works.

In the socioeconomic area, we can highlight a more relevant study that was published almost 20 years ago, in which the researchers revealed economic information on the exploitation of rosewood in Brazil (May and Barata 2004). The authors highlighted a series of problems, such as the confusion between exploited species, the chemical variations in the oils produced, the introduction of a synthetic linalool (linalool being the main constituent of rosewood EO) and ho oil (*Cinnamon camphora*) in the market, and the need to adopt sustainable management measures. Some of the information about this market was updated years later (Barata and Carvalho 2008), however, there is a gap in the scientific literature of international scope in regard to this approach, which motivated us to carry out this study and be able to provide up-to-date information on this value chain. Therefore, we present an analysis of the factors that hinder the development of the activity and proposals for intervention that help to overcome priority problems, based on the interaction with producers, traders and representatives of institutions that work with the rosewood chain.

Methods

Mapping of the value chain

To obtain our data, we monitored the supply and prices in the trade of different rosewood products between the years 2018 and 2023. The data were collected in conversations with local traders and producers, in addition to periodic verification of sales platforms and analysis of secondary data. The prices charged, in Brazilian currency (R\$), were converted to US dollars, considering the exchange rate on 07/18/2023, which was R\$ 1.00 = US\$ 0.21.

We conducted visits to producers in the municipalities of Itacoatiara, Maués, Nova Olinda do Norte, Parintins, São Sebastião do Uatumã, Silves and Urucará, in the state of Amazonas. Additional data was collected in interviews with technicians, researchers and extensionists from public and private agencies in the State of Amazonas. The Maués Integrated Management Center of the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (ICMBio), made available reports related to the rosewood value chain in the Paracuni River region, produced in the context of the Forest Management Project for Sustainable Production in the Amazon, from ICMBio/Brazilian Forest Service (SFB),

NIRAS-IP Consult/DETZEL Consortium. Publicly available data on the licensing of plantations and the EO industry was obtained through consultations of the Brazilian Open Data Portal of the National System for the Control of the Origin of Forest Products (Sinaflor), the Amazonas Environmental Protection Institute and the Superintendency of the Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources in the state of Amazonas. To assess the information obtained, we crossed the primary data collected and the official data that was made available by the government institutions.

Data collection was personalized according to the audience, either in the format of interviews or open conversations, which were carried out following a protocol approved by the Ethics Committee of the National Institute for Amazonian Research (ethical approval N°. 09974519.7.0000.0006). All information related to the identity of the participants was maintained in absolute secrecy.

To analyze the exportation of EO from Brazil, we analyzed the information available in the ComexStat database of the Brazilian Ministry of Industry, Foreign Trade and Services. From this, it was possible to observe the quantities and values generated by the exportation of the EO in the last 30 years. In addition, we identified and analyzed the policies that have directly and indirectly impacted the chain in recent decades. Subsequently, we consulted agencies responsible for environmental licensing to confirm the current norms that regulate the exploitation of forest plantations, which should be considered in the licensing of rosewood production.

Identification of factors, problems and proposals for intervention

The identification of the variables that influence the value chain began during the interview stage. Afterwards, we created an online form and shared it with actors from different sectors. This contained the following questions: (i) what factors do you consider the most important for explaining the downward trend in exports of rosewood EO from Brazil in recent decades, while the export value tends to increase every year? (ii) why do you plant or encourage the planting of rosewood? (iii) what are the main difficulties of producers and companies in terms of producing and marketing rosewood? (iv) what measures could facilitate the structuring and development of the production chain?

The form was answered by 30 people, which included producers, entrepreneurs, technicians, analysts of environmental agencies and researchers. We then systematized the answers obtained and identified factors that, according to the participants, positively and negatively affect the system. Subsequently, we unified the results observed in the different stages and added our own impressions.

Afterwards, we categorized the factors in relation to their nature and identified the main problems related to the different stages of the chain. Finally, we analyzed the suggested intervention proposals and related them to the identified problems.

Results and Discussion

Mapping of the value chain and associated issues

During the mapping of the value chain, we identified the trade in the following rosewood products in the domestic market: seeds, seedlings, biomass and essential oil, with the EO also being exported from Brazil. With the exception of the exported product, after recording the minimum and maximum prices observed in the last 5 years, we observed a wide variation in prices (Figure 1). There is a relationship of interdependence in the supply of products and the difficulty in producing one, compromises the functioning of the chain as a whole. Next, we present the systematization of the factors that impact the chain in the view of stakeholders (Table 1) and discuss the results of the mapping and priority problems in each productive stage.

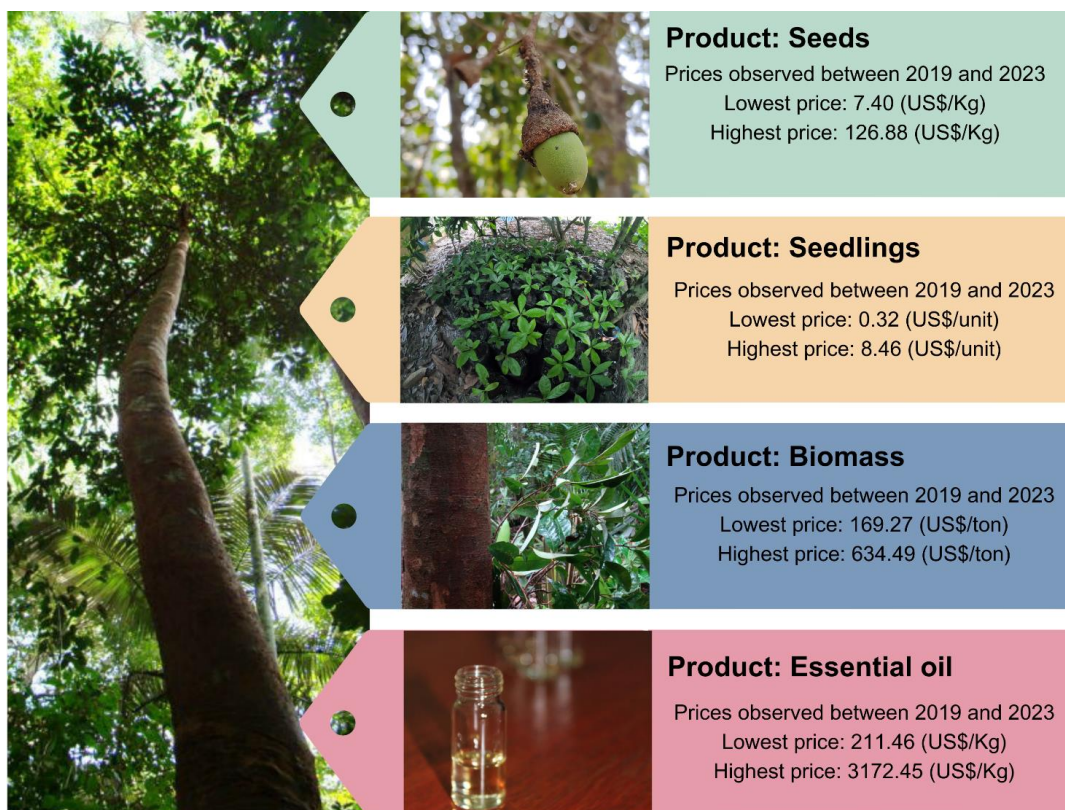


Figure 1. Rosewood products and respective minimum and maximum prices observed between 2019 and 2023.

Table 1. Compilation of the factors and associated problems that affect the rosewood production chain in Brazil.

| Factors | | Problems associated in the production stages | | |
|---------------------------------|---|--|--|---|
| Level | Description | Seeds and Seedlings | Plantations/Biomass | Essential oil (EO) |
| Biological | (i) Extractivism (ii) Quantity and quality of plantations (iii) Reproductive biology (iv) Pests and diseases | (i) Restriction of genetic variability (ii) Few seed collection areas (iii) Instability in seed production (iv) Low germination rate and seedling survival | (i) Resource scarcity in natural populations (ii) Low number of trees planted (iii) High mortality of planted trees (iv) Little biomass available for exploitation in plantations | (i) Production scale is limited by biomass availability (ii) Decrease in demand for EO due to the threat of extinction |
| Technical and Scientific | (i) Biological and chemical knowledge (ii) Productive knowledge (iii) Technological innovations | (i) Uncertainty in the identification of commercialized seeds and seedlings (ii) Lack of pest control protocols (iii) High mortality of seedlings (iv) Lack of genetic improvement programs | (i) Lack of definition of species cultivated as rosewood (ii) Low application of tree care (iii) Low increment in biomass (iv) Little systematic knowledge available regarding its silviculture (v) Few technologies available for optimization and management of plantations | (i) Low oil yield (ii) Instability in quality (iii) Disposal of potential by-products (hydrolate and biomass) (iv) Low number of technologies available specifically for EO processing |
| Social and economic | (i) Cost of activity (ii) Price of products (iii) Productive arrangements | (i) Seedlings with a value below the expectations of producers and above the expectations of buyers (ii) Difficulty in communication between producers and potential customers | (i) Financial constraints on small producers to start, expand and manage plantations (ii) Definition of biomass price (iii) Low articulation between producers for the sale of biomass | (i) Low number of EO processing plants (ii) Little organization among producers for processing of the EO (iii) Low EO supply |
| Institutional | (i) Land situation (ii) Environmental legislation (iii) Environmental licensing (iv) Government incentives | (i) Impossibility of access to financing for seedling production (ii) Low number of producers registered in the National Seed and Seedling Registry | (i) Impossibility of access to financing for expansion and management of plantations (ii) Definition of environmental licensing processes (iii) Inconsistencies in licensing systems for registration of the activity (iv) Difficulty in meeting the requirements of environmental agencies (v) Delay in obtaining exploitation permits (vi) Low number of licenses granted (vii) Lack of tax incentives (viii) Low access to technical assistance to facilitate the licensing of producers (ix) Demotivation and withdrawal from activity | (i) Legal uncertainty of companies interested in investing in the production chain (ii) Delays in obtaining licenses to produce and market the EO (iii) Instability in the supply of the EO (iv) Insecurity felt by companies in using the ingredient in their formulations (v) Irregular EO trade in the internal market (vi) Lack of tax incentives (vii) Difficulty in planning and consolidation of the chain |

Production and trade of seeds and seedlings

Since the depletion of the resource in natural populations and the mandatory extraction of raw materials from plantations, the production of seeds and seedlings has become a fundamental stage in the rosewood value chain. The supply of these products is quite limited, and the number of producers is still low, despite the growing demand. During the research period, we identified 12 seed suppliers and 24 seedling suppliers, respectively located in two and four municipalities of the state of Amazonas (Figure 2). The sale of seeds is sporadic and occurs mainly in the Paracuni River region, which is located on the border between the municipalities of Maués and Nova Olinda do Norte, where 11 producers from traditional communities reported trade of 8 to 150 kg per harvest, with sales values of between US\$ 7.4 and US\$ 37.8 kg⁻¹. We also observed the supply of seeds on an e-commerce platform, indicating the origin of the seeds as being Maués, with a significantly higher price than that practiced by local producers. In this advertisement, we note that there is no certainty regarding the provenance and botanical identification of the parent trees.

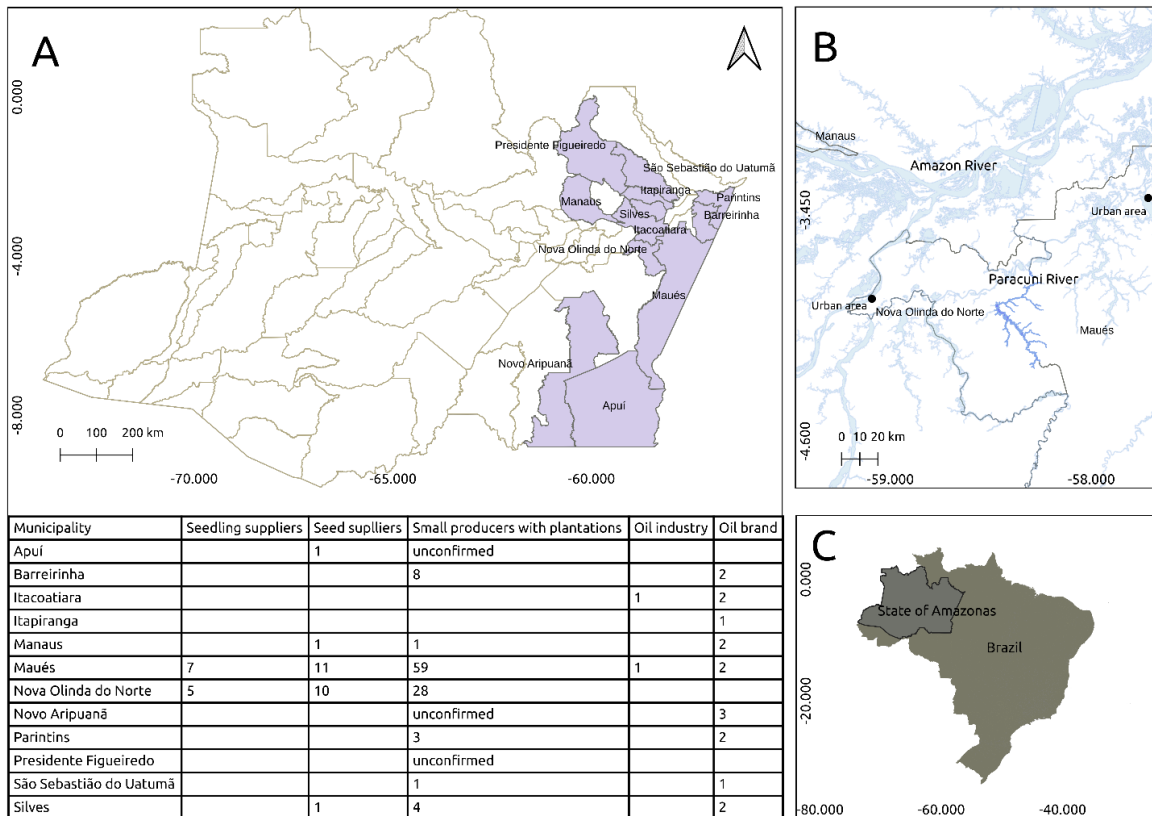


Figure 2. Mapping of the rosewood value chain, highlighting the cities where the productive activities were identified between 2019 and 2023 (A), the location of the Paracuni River, where the largest number of suppliers of seeds, seedlings and plantations by small producers is concentrated (B), and the location of the state of Amazonas in Brazil, where the research was carried out (C).

The highest concentration of seedling suppliers also corresponds to the region of the Paracuni River, where 19 individual producers are located and which have already marketed as many as 60,000 seedlings per crop. In 2018, we mapped three companies that marketed rosewood seedlings with some regularity, at prices ranging between US\$ 2.10 and US\$ 3.15 unit⁻¹ (Lara et al. 2021). In the last five years, we identified variations in the prices practiced by producers of between US\$ 0.32 and US\$ 2.10; while companies in Apuí and Manaus advertise products on e-commerce platforms for US\$ 5.25 and US\$ 8.46 unit⁻¹, respectively. With the exception of these companies, the values practiced are close to those observed for seedlings of other Amazonian species threatened with extinction and of economic interest such as the Brazil nut tree (*Bertholettia excelsa*) and mahogany (*Swietenia macrophylla*), with current average values of US\$ 1.68 and US\$ 2.86 unit⁻¹, respectively (SEPROR 2023).

The low availability of vegetative material, which is caused by the overexploitation of natural populations, is one of the main problems that affects production. The region of the Paracuni River is an exception in relation to the productive potential, because former extractivists began to plant rosewood in the backyards of their homes in the 1970s, and encouraged cultivation in local communities. Currently, small producers in this region have approximately 700 parent trees registered in the Forest Inventory, with a production potential of about 160,000 seedlings per harvest. However, they report low infrastructure for production and difficulties in accessing the market and in the licensing of the activity.

Considering current regulations, this activity does not depend on a license from the state environmental agency, but there is control at the federal level, since producers who sell more than 10,000 seedlings per year need to register their activity with the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply via the National Register of Seeds and Seedlings (BRASIL 2003, 2017, 2020). Among the producers in region of the Paracuni River, six have a productive capacity of more than 10,000 seedlings year⁻¹, but none of them have a title deed for their property, which is mandatory requirement for registration in system.

The supply of these products is also limited by the reproductive biology of the species, which presents a pattern of multiannual fruiting and recalcitrant seeds that lose their viability up to seven days after harvesting (Sampaio et al. 2003). This makes the supply of seeds from riverine communities more complicated. Additionally, the fruits have a high degree of predation by frugivores, which remove approximately 42% of the fruits, and by insects, which are responsible for loss of more than 50% of the seeds (Spironello et al. 2004).

Another common problem is related to the botanical identification of seedlings marketed as rosewood, which often do not have the characteristic aroma expected after initial development and are then called “louro-rosa” (*Aniba panurensis* sensu lato). Consumers commonly attribute the inconvenience to the dishonesty of the seller, but the problem is more complex, and is associated with the limitation of available biological knowledge about the plant. In general, the aroma exuded by the wood after a cut seems to be the main criterion for stating whether or not a tree is in fact the species *A. rosiodora*. However, it should be considered that aromatic characteristics are associated with the secondary metabolism of plants that produce essential oils, which are complex mixtures of volatile organic compounds consisting mainly of terpenes (Carson and Hammer 2011). Plants produce these metabolites as a protection and communication strategy (Maffei et al. 2011; Wink 2016; Yang et al. 2018). Thus, in addition to genetic variants, the composition of essential oils can be influenced by factors such as geographical origin, seasonality, ontogeny, plant organs, herbivory, and agricultural practices, among others (Figueiredo et al. 2008; Moghaddam and Mehdizadeh 2017; Yang et al. 2018).

A. rosiodora integrates the *A. panurensis* complex, with 11 other species of papillose leaves (Kubitzki and Renner 1982), with difficulties in classification even in the presence of fertile material. In a study on the morphological delimitation of the genus, researchers examined the morphology and spectra of 306 botanical samples of different species of *Aniba* and observed that only three corresponded to the descriptions of Kubitzki (Matta Barbosa 2015), which indicates the poor delimitation between species due to the scarcity of morphological characters of taxonomic utility. In addition, traditional extractivists recognize the existence of rosewood morphotypes (Maia et al. 2007, May and Barata 2004), raising doubts whether rosewood really corresponds to a single species. As such, there is a need for genomic research to be carried out in order to understand the delimitation of the species of the complex, and the relationship with morphological and chemical characteristics of plants that are marketed as rosewood.

Biomass available in the plantations of the small producers

During the research, the sale of biomass was reported by three producers from two locations. This biomass came from planted trees and the number of trees ranged from one to ten, which weighed between 500 and 800 kg tree⁻¹, or a few kilograms of branches and leaves. The amount paid by buyers ranged from US\$ 169.27 to US\$ 634.49 tons⁻¹ (or US\$ 0.17 to US\$ 0.63 kg⁻¹).

As the only companies with a license to produce essential oil have their own plantations, there are no current reference values for the formal market for rosewood biomass. For the structuring of a new phase in this chain that includes family producers in a fair-trade context, it is important to determine a minimum price for this product, as with other assets of sociobiodiversity in Brazil. Currently, the minimum price guarantee policy includes important products from the primary sector of the Amazon, such as açai (*Euterpe* spp.), Brazil nuts (*Berholletia excelsa*), murumuru (*Astrocaryum murumuru*) and andiroba seeds (*Carapa* spp.) (CONAB 2023).

Although the trade in rosewood biomass is practically non-existent, in seven municipalities of the state of Amazonas, we identified 104 small producers that have plantations with information recorded in forest inventories (Figure 2). There are more than 9,500 trees planted in these areas, totaling approximately 360 tons of estimated fresh biomass, considering only the individuals that had adequate size for the pruning system when the inventories were carried out (Table 2). During the survey, we identified plantations in three other municipalities, though we could not confirm information on production. In the region of the Paracuni River, producers report there are another 40 small producers and approximately 3,000 newly planted trees in non-inventoried areas.

Considering the weight ratio between the plant parts of 34.4% of the canopy (sum of the weights of branches and leaves) and 65.6% of the wood (BRASIL 2011), the estimate of fresh canopy biomass available in the mapped areas is 218 tons. If, hypothetically, one pruning is carried out every three years and the biomass value of branches and leaves corresponds to US\$ 0.42 kg⁻¹, the product obtained from successive pruning of the crown, could generate a market of US\$ 91,560 every three years. It should be taken into account that this estimate does not consider the biomass of the wood, the increase in biomass of the plantations over the years, the new plantations that may be implemented and areas not inventoried or whose data were not made available in the context of this research.

To estimate the potential for oil production in these areas, one should consider the need to carry out the drying of the branches and leaves, which is not necessary when obtaining oil from wood. Using allometric equations developed for the species (Krainovic et al. 2017) to estimate the dry and fresh biomass of different parts of the plant, we observed that the dry mass of the crown corresponds, on average, to 66% of the fresh mass of this part of the tree. The yield of essential oil from leaves and branches varies, though is usually between 1.1% and 1.7% (Krainovic et al. 2018, Lara et al. 2018). The yield reported in the specific legislation is 1.2% for thick branches and 1.9% for leaves and thin branches (BRASIL 2011), so we used the average of these values (1.55%) to estimate the productive capacity of the mapped areas. Thus, when considering the parameters described and the pruning cycle

of three years, the biomass currently available in the plantations of the family producers could generate 743 kg of essential oil per year. When considering the current export value, equivalent to US\$ 331.56 kg⁻¹, the estimated production could generate a gross turnover of US\$ 246,583 year⁻¹ for the family farming sector in the next three years alone.

Table 2. Production data for rosewood plantations owned by small producers in the state of Amazonas.

| Municipality/Location | Number of producers | Number of trees inventoried in plantations | Estimate of total fresh biomass available | Regularization status for exploitation |
|---|----------------------------|---|--|--|
| Barreirinha – Andirá River, Andirá-Marau indigenous lands | 8 | 541 | 4.5 tons | Permit issued by the federal environmental agency |
| Manaus – BR 174 | 1 | 220 | 2.0 tons | Under review by the state environmental agency |
| Maués – Marau River, Andirá-Marau indigenous lands | 25 | 766 | 5.2 tons | Permit issued by the federal environmental agency |
| Maués – Paracuni River, territories of Maués State Forest and Rosewood National Forest | 34 | 4,309 | 246.7 tons | In the phase of preparation of technical projects for submission to environmental agencies |
| Nova Olinda do Norte – private property in rural area | 2 | 281 | 5.8 tons | Under review by the state environmental agency |
| Nova Olinda do Norte – Paracuni River, territories of the Abacaxis II settlement project and private properties | 26 | 3,088 | 344.4 tons | In the phase of preparation of technical projects for submission to environmental agencies |
| Parintins – Uiacurapá River, Andirá-Marau indigenous lands | 3 | 64 | 18.1 tons | Permit issued by the federal environmental agency |
| São Sebastião do Uatumã – Uatumã Sustainable Development Reserve | 1 | 80 | 0.5 tons | Authorization issued by the state environmental agency |
| Silves – private properties in rural area | 4 | 158 | 6.8 tons | Two permits issued by the state environmental agency, Two cases rejected due to inconsistencies in documents |

Most of the plantations of the small producers are established in agroforestry backyards or areas of secondary vegetation. One of the main problems of these plantations is related to the absence of tree care, such as fertilization, strategic pruning, control of weeds and light management. There are other variables that also negatively influence the productivity of plantations, such as the limited resources for investment and the lack of expectations of a financial return from the activity due to the difficulties in obtaining environmental licensing for exploitation and uncertainty about the consolidation of the sale or processing of biomass. Among the small producers identified during this

research, only 36 have permits for exploitation, all of which were obtained in the last two years, and none of them have started the commercialization of biomass or EO processing.

Production of and trade in EO

Foreign market: regularized companies and export of rosewood oil by Brazil

Currently, in Brazil, only two private-sector enterprises have a license from the environmental agencies for the production of rosewood EO (Figure 2). Up until 2021, the only licensed company was located in the city of Maués. The processing plant, which initially belonged to the grandfather of the current owner, was the only venture that remained legal after the restrictions on rosewood exploitation that were established in the 1990s, and consolidates an extensive planted area in that region. Recently, another industry for processing essential oils, including rosewood, was installed in the city of Itacoatiara.

According to available public licensing data, the plantations of the two companies total 42,146 inventoried trees (Table 3). It is possible that the company in Maués has other younger trees planted, which have not yet been included in the exploitation projects filed with the environmental agency. The estimated average annual EO production of these companies is between 2 and 2.5 tons year⁻¹, as reported by the state environmental agency. Both enterprises are self-sufficient in biomass production and produce oil mostly from successive pruning of branches and leaves.

Table 3. Production data for rosewood plantations owned by licensed companies in the state of Amazonas.

| Municipality/ Location | Number of enterprises | Number of trees inventoried in plantations | Estimate of total fresh biomass available | Regularization status for exploitation |
|---------------------------|--------------------------|--|--|---|
| Itacoatiara | 1 | 27,750 | 24,498.85 kg | Authorization issued by the state environmental agency |
| Maués | 1 | 14,396 | 1,471,180.00 kg | Authorization issued by the state environmental agency |

Through analysis of the export data available in the ComexStat database (MDIC 2023a), we observed that the production of rosewood essential oil that was exported ranged from 78 tons year⁻¹ in 1989 to 2 kg year⁻¹ in 2022, while the minimum and maximum values achieved were equivalent to US\$ 23.95 kg⁻¹ in 1994 and US\$ 439.5 kg⁻¹ in 2022 (Figure 3). Between 1989 and 1992, Brazil exported an average of 72 tons year⁻¹ of rosewood essential oil, with an average annual value that was

equivalent to US\$ 28.45 kg⁻¹. After the inclusion of the species in the official list of Brazilian flora species threatened with extinction in 1992, the average annual production was always below 60 tons year⁻¹. The average annual quantity exported was equivalent to 55 tons year⁻¹ and 29 tonnes year⁻¹, in the 1990s and 2000s, respectively. In this period, the average annual export value ranged between US\$ 32.55 kg⁻¹ and 60.71 kg⁻¹, respectively. After the inclusion of rosewood in CITES in 2010 (CITES 2010), the annual quantity exported remained below 5 tons year⁻¹, with an average annual value equivalent to 2.2 and 0.9 tons year⁻¹ in the 2010s and early 2020s, respectively. Export values reached an annual average of US\$ 226 kg⁻¹ between 2010 and 2019, and have reached an average of US\$ 362 kg⁻¹ in the last three years.

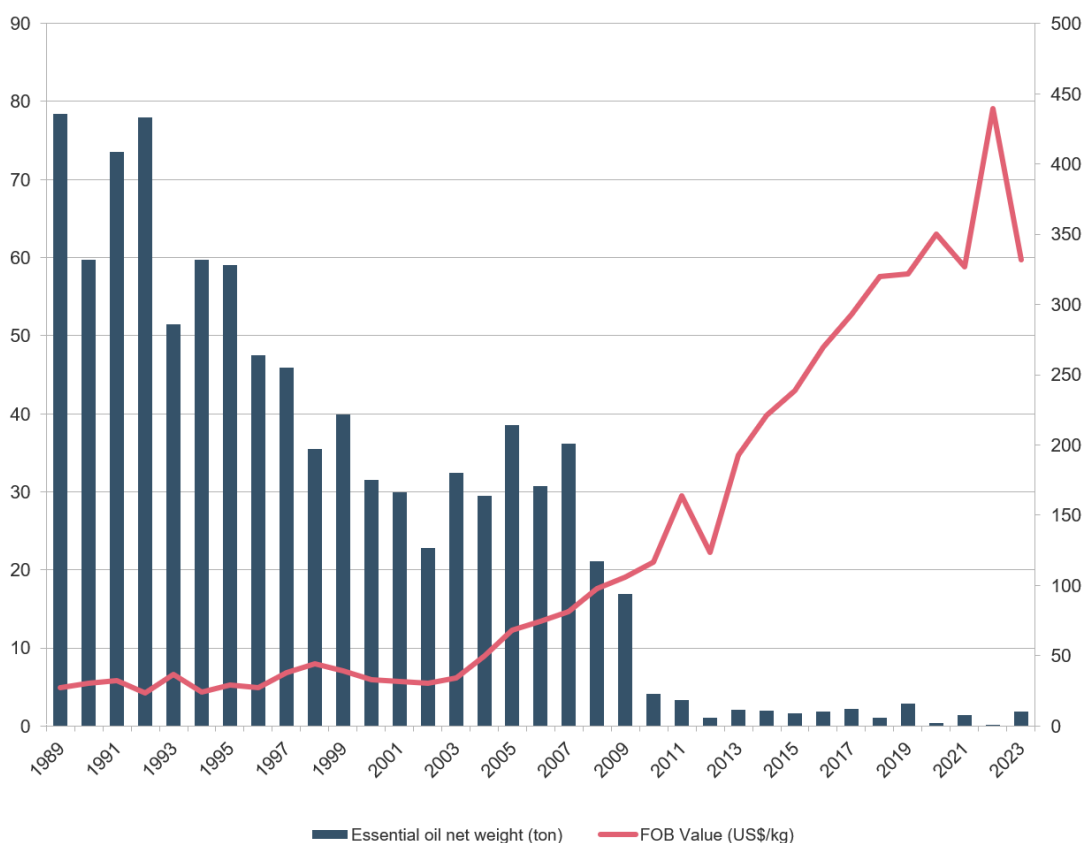


Figure 3. Historical series of the amount of rosewood essential oil exported by Brazil (main axis) and free on board (FOB) export values (secondary axis).

The price increase related to the decrease in product supply is an expected behavior of the world market for EOs (Widiaswanti et al. 2019) and has stimulated the increase of rosewood plantations in the Amazon. Another factor that is favorable for the cultivation of aromatic species corresponds to the growth of the market worldwide, which attracts new entrepreneurs and investors

to the sector. The global market for essential oils was estimated at US\$ 8.8 billion in 2022 and is projected to grow by 11.8% through 2027, equivalent to US\$ 15.3 billion (Markets and Markets 2023). In 2022, Brazil was the second biggest supplier of EOs in the world in relation to the amount exported and the fifth in relation to the value generated, with approximately 55,000 tons and US\$ 420 million invoiced with exports (ITC 2023). In the last decade, approximately 90% of Brazil's exports in this category has been of EO from oranges (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck and other species), a byproduct of the juice industry (Bizzo and Rezende 2022), followed by EO from limes (*Citrus* spp.) and eucalyptus (*Eucalyptus* spp.) (MDIC 2023b). Rosewood corresponds to a small portion of the amount of oil exported by Brazil, about 0.01% in relation to the quantity and 0.25% in relation to the total turnover generated in 2023 (up until September). However, rosewood stands out from the others in relation to the export value achieved, since the EO values of orange, lemon and eucalyptus are equivalent to US\$ 12, US\$ 21 and US\$ 13 kg⁻¹, respectively (MDIC 2023b).

Given this scenario, the potential for income generation from the production of rosewood EO by producers in the Brazilian Amazon is remarkable. However, the difficulty in scaling up production and the instability in supply that is mainly associated with bureaucracy and delays in granting licenses for exploitation and commercialization affect legal certainty and the interest of companies regarding the use of the ingredient.

Domestic market: informal trade in rosewood EO

There are no official data available regarding the quantities of oil traded on the domestic market, mainly due to the fact that it involves informal trade. During this research, we observed different situations in relation to the irregular trade of rosewood oil. The first concerns its sale in small quantities in markets or by small stores that sell regional products, at which various aromatic products are offered as part of the Amazonian aromatherapy culture, which uses plants in the forms of aromatic baths, vapor inhalations, balms and incense (Barata 2012). Essential oils identified as rosewood are routinely sold in small bottles (usually between 5 and 100 mL) in the state of Amazonas and other regions of the country, mainly in regional markets or via e-commerce platforms. In a recent study conducted with the aim of developing a simple method of identifying commercial essential oil reported to be rosewood, the researchers were able to acquire 59 independent samples in 13 different locations in the Brazilian Amazon and another nine samples purchased on the internet that included brands from the southern, southeastern and midwestern regions of Brazil (Pastore et al. 2022). During

the collection of samples, the researchers identified 20 brands of essential oil marketed as rosewood that came from nine municipalities in the state of Amazonas (Figure 2), nine brands from three municipalities in Pará and two brands from one municipality in Amapá (Pastore et al. 2022). When relating the availability of these oils in local stores to the fact that licensed oil-processing plants do not market their products in the domestic market, we observe that the practice of irregular exploitation of the species persists, despite the legal restrictions.

Another situation involves the exploitation and processing of raw materials without a license, with attempts to sell oil on a larger scale. In recent years, for example, we have identified the production and supply of four drums of essential oil (approximately 180 kg drum⁻¹) in the regions of Novo Aripuanã and Maués. To produce this amount, approximately 72 tons of biomass are needed, which is equivalent, on average, to 125 trees with a DBH of 25 cm. In addition to the impact on the conservation of the resource, another consequence of irregular activity corresponds to the absence of quality control of the marketed product, which can often be adulterated or not in fact be oil extracted from rosewood.

Proposals for intervention

Considering the mapping and analysis of the value chain, in addition to the statements of the stakeholders, we observed that the current problems with the greatest impact on the development of economic activities with rosewood in Brazil could be mitigated from three main focuses of intervention, these being research and development, socioeconomic measures and environmental licensing (Table 4).

Table 4. Compilation of proposals for interventions that overcome priority problems related to the rosewood value chain in Brazil.

| Focus of intervention | Priority problems | Measures indicated | Institutional strategies |
|------------------------------|--|---|--|
| Research & Development | (i) Conservation of the resource (ii) Seed and seedling production (iii) Genetic variability (iv) Species identification (v) Plantation quality and productivity (vi) Optimization of EO processing | (i) Mapping of remaining natural populations and implementation of new areas for seed collection (ii) Expansion of genomic studies in natural populations and plantations, focusing on the delimitation of species, and understanding the genetic and chemical variability of trees (iii) Selection of best genotypes for seedling production (iv) Expansion of studies on natural | (i) Preparation of a national action plan for the conservation of endangered species specifically for rosewood (ii) Implementation of a research & development program, with the participation of producers, institutions via research and extension, environmental agencies, the business sector and research support agencies |

| Focus of intervention | Priority problems | Measures indicated | Institutional strategies |
|------------------------------|--|--|--|
| | (vii) EO quality (viii) Technical assistance | control of pests and diseases (v) Systematization and popularization of available technical-scientific knowledge (vi) Validation of management techniques to increase tree productivity, including diversification using other agricultural and forest species of economic and environmental interest (vii) Integration between researchers, producers and companies for the development of research applied to the sector (viii) Development of specific low-cost technologies for EO processing (ix) Qualification of producers and technicians | |
| Socioeconomics | (i) Lack of strong investment (ii) Productive arrangements (iii) Access to the market by small producers (iv) Pricing of products | (i) Offering tax and financial incentives to small producers and companies in the sector (ii) Fostering collaborative networking based on fair-trade (iii) Development of digital technologies to facilitate communication between the actors in the chain and the commercialization of products (iv) Evaluation of the economic viability of the activities and definition of minimum prices for the different rosewood products (v) Government financial support for small producers to participate in annual aromatherapy fairs and similar events, seeking inclusion in the market | (i) Implementation of a program to promote the planting and production of rosewood and other aromatic species, considering the economic subsidy of small producers (ii) Interinstitutional support for the creation of new business models with the species, which include and value small producers, as well as the prospecting and opening of new markets for the product (iii) Inclusion of rosewood products in the minimum price guarantee policy |
| Environmental licensing | (i) Granting of environmental permits for the exploitation of plantations (ii) Granting of environmental licenses for processing and marketing of EO (iii) Control systems | (i) Review and update of species-specific legislation (ii) Simplification of the processes for licensing plantations, processing and marketing of EO (iii) Systematization and dissemination of the process for licensing the activity (iv) Adaptation of control systems to the specificities of the production chain | (i) Implementation of a policy to encourage sustainable rosewood production (ii) Qualification of producers and technicians in the processes of licensing of productive activities |

Conclusion

The decline in the production of rosewood oil in Brazil is a reflection of the predatory exploitation that was carried out previously, in addition to the strict regulations created with the aim of protecting the species from extinction. As a result, there was a retraction of the international market for this product, which consolidated a scenario that is difficult to reverse. Thus, for the formation of new productive arrangements and development of the sector, the prospection and opening of new markets for rosewood oil, such as aromatherapy or medicinal use, are actions of utmost importance.

Certainly, national and international control was important to reduce the impact on natural populations and encourage the conservation of the resource through the establishment of plantations. However, irregular trade still continues, even if on a smaller scale than decades ago. A paradoxical situation observed is that producers who seek the licensing of their activities find great difficulties in obtaining permission for the sustainable exploitation of their plantations.

Brazilian environmental control systems, even if generated with the good intention of protecting natural resources, have resulted in small producers not having access to environmental licensing of their productive activities. In addition to the simplification of licensing processes for this group and the need to provide greater technical support, it is essential to overcome the problems of land regularization so as to ensure the legal and territorial security of cultivated areas.

The absence of a license to exploit the resource in a sustainable manner compromises not only the supply of EO in the market, but also the conservation of a plant threatened with extinction, since it discourages planting. For these reasons, we understand that a paradigm shift is important in relation to rosewood producers, considering the transition from predatory extractivism to sustainable cultivation and exploitation of the resource by successive pruning systems. Such management should be considered to be the provision of an environmental service by producers, with policies to encourage and facilitate the activity.

Funding

This research received financial support from the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

Acknowledgments

We would like to thank all the institutions, producers, researchers and traders who provided the information required to carry out this research.

References

- Araujo, V.C., G.S. Correa, J.G.S. Maia, M.L. Silva, O.R. Gottlieb, M.C. Marx, et al. 1971. Óleos essenciais da Amazonia contendo linalol. *Acta Amazonica* 1(3): 45–47. <https://doi.org/10.1590/1809-43921971013045>.
- Barata, L.E.S. 2012. A economia verde: Amazônia. *Ciência e Cultura* 64(3): 31–35. <https://doi.org/10.21800/s0009-67252012000300011>.
- Barata, L.E.S., and R.Q.D. Carvalho. 2008. Amazon Scents: Replacing Rosewood in Perfumery? Part II*. *Perfumer & Flavorist*. <https://www.perfumerflavorist.com/fragrance/ingredients/news/21870169/amazon-scents-replacing-rosewood-in-perfumery-part-ii> (9 February 2023).
- Bastos, A. de M. 1943. Os pau-rosa da indústria da essência. *Rodriguésia* 7(16): 45–54.
- Bizzo, H.R., and C.M. Rezende. 2022. O mercado de óleos essenciais no Brasil e no mundo na última década. *Quimica Nova* 45(8): 949–958. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170889>.
- Bourgaud, F., A. Gravot, S. Milesi, and E. Gontier. 2001. Production of plant secondary metabolites a historical perspective. *Plant Science* 161: 839–851. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00490-3).
- BRASIL. 1992. Portaria No 37, de 03 de abril de 1992, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).
- BRASIL. 2003. Lei No 10.711, de 5 de agosto de 2003.
- BRASIL. 2011. Instrução Normativa No 09, de 25 de agosto de 2011, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).
- BRASIL. 2017. Instrução Normativa No 17, de 26 de abril de 2017, do Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 43.
- BRASIL. 2020. Decreto No 10.586, de 18 de dezembro de 2020. 1–35.
- Carson, C.F., and K.A. Hammer. 2011. Chemistry and Bioactivity of Essential Oils. In: *Lipids and Essential Oils as Antimicrobial Agents*, p.204–223.
- CITES. 2010. Fifteenth meeting of the Conference of the Parties. <https://cites.org/eng/cop/15/ins/index.php> (8 august 2023).

- CONAB. 2023. Política de Garantia de Preços Mínimos para os Produtos da Sociobiodiversidade (PGPM-Bio). <https://www.conab.gov.br/precos-minimos/pgpm-bio> (8 August 2023).
- Ferraz, J.B. L.E. Barata, P. de T. Sampaio, and G. Guimarães. 2009. Perfumes da floresta Amazônica: em busca de uma alternativa sustentável. *Ciência e Cultura* 61(3): 40–43.
- Fidelis, C.H.V.; F. Augusto, P. de T. Sampaio, P.M. Krainovic, and L.E.S. Barata. 2012. Chemical characterization of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) leaf essential oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with quadrupole mass spectrometry. *Journal of Essential Oil Research* 24(3): 245–251. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.676770>.
- Figueiredo, A.C., J.G. Barroso, L.G. Pedro, and J.J.C. Scheffer. 2008. Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal* 23: 213–226. <https://doi.org/10.1002/ffj>.
- Gottlieb, O. R. 1957. Pau-rosa, Potencial de Riqueza. *Revista de Química Industrial*, 15–18.
- Homma, A.K. O. 2016. Políticas para expansão do plantio de pau-rosa na Amazônia. In *Uso e Conservação do Pau-Rosa*. 137–148.
- ITC. 2023. List of exporters for the selected product in 2022, ITC Trade Map. https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7C%7C%7C%7C%7C3301%7C%7C%7C4%7C1%7C1%7C2%7C1%7C%7C2%7C1%7C%7C1 (9 August 2023).
- Krainovic, P., D. Almeida, D. Desconci, V. Veiga-Júnior, and P. Sampaio. 2017. Sequential management of commercial rosewood (*Aniba rosaeodora* ducke) plantations in central Amazonia: Seeking sustainable models for Essential oil production. *Forests*, 8(12): 438. <https://doi.org/10.3390/f8120438>.
- Krainovic, P., D. Almeida, and P. de T. Sampaio. 2017. New allometric equations to support sustainable plantation management of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) in the central Amazon. *Forests*, 8(9): 1–28. <https://doi.org/10.3390/f8090327>.
- Krainovic, P. M., D. R. A. de Almeida, V. F. da Veiga Junior, and P de T Sampaio. 2018. Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 429:143–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.015>.
- Kubitzki, K., and S. Renner. 1982. Lauraceae I (*Aniba* and *Aiouea*). In *Flora Neotropica* 31:1–124. <https://doi.org/10.2307/4393703>.
- Lara, C.S., C. R. Costa, and P. de T. Sampaio. 2021. O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba* spp.) no Estado do Amazonas. In *Revista de Economia e Sociologia Rural* 59(3):1–8.

<https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.221035>.

Lara, C.S., L. E. S. Barata, P. de T. Sampaio, M. N. Eberlin, and C. de V. Fidelis. 2018. Linalool enantiomeric distribution in rosewood-reminiscent populations in Central Amazon. *Journal of Essential Oil Research*, 30(6): 464–469. <https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1492464>.

Maffei, M. E., J. Gertsch, and G. Appendino. 2011. Plant volatiles: Production, function and pharmacology. *Natural Product Reports*, 28(8): 1359–1380. <https://doi.org/10.1039/c1np00021g>.

Maia, J. G. S., E. H. A. Andrade, H. A. R. Couto, A. Carla, M. Silva, F. Marx, and C. Henke. 2007. Plant sources of amazon rosewood oil. *Química Nova*, 30(8): 1906–1910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800021>.

Markets and Markets. 2023. Essential Oils Market Global Forecast to 2027. 37. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/essential-oil-market-119674487.html> (9 January 2023).

Matta Barbosa, A. S. da. 2015. Testando delimitação de espécies em monografias – um estudo de caso em Aniba Aubl. (Lauraceae). In Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia.

May, P. H., and L. E. S. Barata. 2004. Rosewood Exploitation in the Brazilian Amazon: Options for Sustainable Production. *Economic Botany*, 58(2): 257–265. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0257:reitba\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0257:reitba]2.0.co;2)

MDIC. 2023a. Exportação e Importação Geral: óleo essencial de Pau-rosa. Portal ComexStat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/87778> (8 August 2023).

MDIC. 2023b. Exportação e Importação Geral: óleos essenciais. Portal ComexStat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/92245> (8 August 2023).

Moghaddam, M., and L. Mehdizadeh. 2017. Chemistry of Essential Oils and Factors Influencing Their Constituents. In *Soft Chemistry and Food Fermentation*, 379–419. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811412-4/00013-8>.

Ohashi, S. T., L. S. R. Santana, and C. L. Green. 1997. Brazilian Rosewood Oil: Sustainable Production and Oil Quality Management. *Perfumer & Flavorist*, 8(3):16–20. [https://doi.org/10.1016/s0962-4562\(97\)80005-7](https://doi.org/10.1016/s0962-4562(97)80005-7).

Pastore, T. C. M., L. R. Braga, D. C. G. Daniele, L. F. Soares, F. Pastore, A. C. Alessandro, P. V. dos Anjos, C. S. Lara, V. T. R. Coradin, and W. B. Braga. 2022. A green and direct method for authentication of rosewood essential oil by handheld near infrared spectrometer and one-class

- classification modeling. *Microchemical Journal*, 182(May), 107916. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107916>.
- Sampaio, P. de T., A. P. Barbosa, G. Vieira, W. R. Spiroloello, and F. M. S. Bruno. 2005. Biomassa da rebrota de copas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) em plantios sob sombra parcial em floresta primária. *Acta Amazonica*, 35(4):491–494.
- Sampaio, P. T. B., I. D. K. Ferraz, and J. L. C. Camargo. 2003. Pau-rosa, *Aniba roseodora* Ducke. In *Manual de Sementes da Amazônia* 3:6.
- SEPROR. 2023. Cotação de preços de produtos agropecuários e florestais – SEAPAF / SEPROR - fevereiro de 2023, Secretaria de Produção Rural. <http://www.sepror.am.gov.br/wp-content/uploads/2023/02/FEVEREIRO-DE-2023-COTACAO-DE-PRECOES.pdf> (10 August 2023).
- Spiroloello, W. R., P. de T. Sampaio, and B. Ronchi-Teles. 2004. Produção e predação de frutos em *Aniba rosaeodora* Ducke var. *Amazonica ducke* (Lauraceae) em sistema de plantio sob floresta de terra firme na Amazônia central. *Acta Botanica Brasilica*, 18(4):801–807. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000400010>.
- Torrez, A. A. A., A. M. Imakawa, A. D. Blind, and P. de T. Sampaio. 2022. Seed predation of *Aniba rosaeodora* Ducke by image analysis. *Ciencia Florestal*, 32(2):1061–1077. <https://doi.org/10.5902/1980509848117>.
- Widiaswanti, E., P. Pratikto, C. Cahyani, and I. P. Tama. 2019. A Conceptual Framework for Essential Oils Marketing: A Systems Approach. *International Journal on Food System Dynamics*, 10(4):386–395. <https://doi.org/10.18461/IJFSD.V10I4.26>.
- Wink, M. 2016. Secondary Metabolites, the Role in Plant Diversification of. *Encyclopedia of Evolutionary Biology*, 4:1–9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800049-6.00263-8>.
- Yang, L., K. S. Wen, X. Ruan, Y. X. Zhao, F. Wei, and Q. Wang. 2018. Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules*, 23(762):1–26. <https://doi.org/10.3390/molecules23040762>.
- Zellner, B. D. A., M., Lo Presti, L. E. S. Barata, P. Dugo, G. Dugo, and L. Mondello. 2006. Evaluation of leaf-derived extracts as an environmentally sustainable source of essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry and enantioselective gas chromatography-olfactometry. *Analytical Chemistry*, 78(3):883–890. <https://doi.org/10.1021/ac051337s>.

Figure Captions

Figure 1. Rosewood products and respective minimum and maximum prices observed between 2019 and 2023.

Figure 2. Mapping of the rosewood value chain, highlighting the cities where the productive activities were identified between 2019 and 2023 (A), the location of the Paracuni River, where the largest number of suppliers of seeds, seedlings and plantations by small producers is concentrated (B), and the location of the state of Amazonas in Brazil, where the research was carried out (C).

Figure 3. Historical series of the amount of rosewood essential oil exported by Brazil (main axis) and free on board (FOB) export values (secondary axis).

Lara, C.S.; Barata, L.E.S; Junior, S.D.; Ritter, C.D.; Falcão, L.S.; Ruiz, G.C.M. Sampaio, P.T.B. **Rapid analysis of variations in volatile organic composition in rosewood trees (*Aniba* spp., Lauraceae) cultivated in the Amazon.** Manuscrito em preparação para a revista *Industrial Crops and Product*.

Rapid analysis of variations in volatile organic composition in rosewood trees (*Aniba* spp., Lauraceae) cultivated in the Amazon

Caroline Schmaedeck Lara*^a, Lauro Euclides Soares Barata^b, Sergio Duvoisin Junior^c, Camila Duarte Ritter^{a, c}, Lucas de Souza Falcão^c, Gloria Cecilia Macia Ruiz^a, Paulo de Tarso Barbosa Sampaio^{a, d}

*corresponding author: carol.slara@gmail.com

^aInstituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, Brazil

^bUniversidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, Brazil

^cInstituto Juruá, Manaus, Amazonas, Brazil

^dUniversidade do Estado do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brazil

Abstract

The cultivation of rosewood in the Brazilian Amazon has expanded due to the increasing interest in the essential oil extracted from this plant, which reached an export value of USD 331.56 kg⁻¹ in the last year. Understanding the factors that affect the production of the substances that compose the essential oil is essential in order to optimize the production of oils with the characteristics required by the perfumery industry. However, there is a paucity of information on the relationship between silvicultural strategies and the chemical composition of the volatiles of these plants. Here, we innovatively use the headspace technique in conjunction with gas chromatography coupled to a mass detector (HS-GC-MS) to identify the volatile organic compounds present in fresh and dry leaves and branches of the species recognized as rosewood. Our objective was to compare the efficacy of HS-GC-MS with the traditional analysis using gas chromatography coupled to a mass detector (GC-MS) of essential oils obtained by hydrodistillation. Additionally, we analyzed the influence of the type of plant material on the samples' volatile composition, as well as the age of the plant, which included 5, 15, 27 and 35-year-old trees grown in the main rosewood oil producing region. We observed that headspace analysis of the plant material is: 1. effective in predicting the presence of the main compounds of interest, although it presents differences in the relative proportions of volatile organic compounds when compared to hydrodistillation; 2. The composition of the volatiles does not differ between leaves and branches, but varies significantly according to age, with a greater presence of linalool oxides in older plants and a higher content of linalool in leaves and branches of younger

trees. In this study, we were able to validate the potential of the HS-GC-MS technique in research on rosewood and provide a faster, more accurate and economical expansion of knowledge about the chemical characteristics of the plant and its relationships with biological factors.

Keywords: *Aniba rosiodora* Ducke., essential oil, headspace analysis, linalool, linalool oxide, tree age

Highlights

1. Headspace of plant matter predicts the presence of major volatiles in essential oils.
2. Proportions of the volatiles vary between fresh and dry matter and the essential oil.
3. 5- and 15-year-old trees differ from 27- and 35-year-old trees in their composition of volatiles.
4. Young plants have a higher linalool content in oils from leaves and branches.
5. Branches and leaves do not differ in their composition of volatiles and linalool content.

Introduction

Rosewood trees belong to the *Lauraceae* family and occur in several regions of the Amazon (Kubitzki and Renner 1982). Generally identified as *Aniba rosiodora* Ducke, this species is considered endangered in Brazil and protected against illegal trade in countries that have signed the Convention on International Trade in Species of Wild Flora and Fauna in Danger of Extinction (CITES) (BRASIL 1992; CITES 2010). These plants have been exploited for more than 100 years for the production of essential oil (EO), which is used mainly as an ingredient in high quality perfumes (Santana et al. 1997; May and Barata 2004). The aroma of the EOs obtained from the wood and leaves is described as floral, sweet and fragrant, although the sweet and woody aroma is more accentuated in the EO of the wood, while citrus and green notes are typical of the leaves (Zellner et al. 2006).

Brazil, which produced approximately 13,000 tons of this EO between 1937 and 2002 (Homma 2016), exported on average only two tons per year in the last decade, at values that reached USD 331.56 kg⁻¹ in 2023 (MDIC 2023). The high value of the product in the market has stimulated the production of seedlings and the establishment of plantations in the Brazilian Amazon, with sustainable extraction of EO from branches and leaves via successive pruning to substitute the use of the wood for extraction purposes (May and Barata 2004; Sampaio et al. 2005; Barata and Carvalho 2008; Krainovic et al. 2017; Lara et al. 2021).

The main characteristic of rosewood EO is the major presence of linalool, a compound widely used as an ingredient in fragrances, with uses in products such as perfumes, shampoos and soaps (Letizia et al. 2003; Mączka et al. 2022). Linalool is an open-chain tertiary alcoholic monoterpene with chiral properties, and can occur in the form of two enantiomers with different olfactory characteristics: (3S)-(+)-linalool and (3R)-(-)-linalool (Raguso and Pichersky 1999; Sugawara 2000; Aprotosoai et al. 2014). This duality is evidenced in the essential oils extracted from rosewood (Zellner et al. 2006; Lara et al. 2018). Compounds derived from the oxidation of linalool, in addition to terpenes such as alpha-pinene, beta-pinene, eucalyptol, and spathulenol, are commonly reported in chemical studies of rosewood (Fidelis et al. 2012, 2013).

The characteristic aroma of this EO is the result of the combination of volatile organic compounds (VOCs) produced in its parenchymal cells. Understanding the factors that influence the composition of the aroma in rosewood is fundamental for the definition of appropriate management and production methods, which contribute to the development of the silviculture of the species. Research conducted on rosewood suggests that its volatile composition may be affected by climatic factors (Maia et al. 2007; Pimentel et al. 2018), geographical location (Krainovic et al. 2018; Amazonas et al. 2020), plant organ (Ohashi et al. 1997; Chantraine et al. 2009; Souza et al. 2011; Lara et al. 2018; da Trindade et al. 2021) or cutting cycle (Krainovic et al. 2018), among others. However, several other factors hinder the production of robust inferences about the chemical variability in rosewood EO and these are mainly related to the quantity and geographical distribution of the samples considered in the research. Among the limitations of the fieldwork, the following stand out: the scarcity of the biological resource that implies greater distances from natural populations and rosewood plantations in relation to the main urban centers of the Brazilian Amazon, generally accessed only by river; the need to collect relatively a high amount of biomass for EO extraction, usually between 2 to 3 kg per tree, due to the oil content of the aerial parts being approximately 1.6% (Maia et al. 2007; Lara et al. 2018; Pimentel et al. 2018); the difficulty in collecting the aerial part of the tallest trees in the forest or in plantations and the transport of large volumes of biomass when many samples are collected. In addition, the logistical complexities hinder the standardization of the transport and drying process of the material, which can influence the volatile composition of the EOs (Sellami et al. 2011; Osae et al. 2021; Wang et al. 2021; Vilnius et al. 2022), and lead to errors in the interpretation of the results observed in the research.

In the EO extraction step, other limitations occur, such as the fact that in most studies the extraction is performed via hydrodistillation using small laboratory equipment, different from the

steam drag extraction process, with tanks of between 500-1,500 L, that is used in production plants. Hydrodistillation requires considerable time, on average between 2 and 3 hours (Lara et al. 2018; Pimentel et al. 2018; Silva et al. 2020), and the daily yield is limited by the amount of equipment available, which implies that some samples remain stored, sometimes in inappropriate conditions, for longer periods than the others before the extraction of the EOs. In addition, analyses of the quality of these oils are usually performed with techniques that require a long sample preparation time and analysis time, have a high cost and are restricted to specialized laboratories (Pastore et al. 2022). Near-infrared spectroscopy (NIRS) has been tested since it is a faster and less expensive methodology for the prediction of rosewood EO yield (Amusant et al. 2016) and to evaluate its authenticity (Pastore et al. 2022). Despite the advantages, NIRS is a limited method in relation to the identification of the chemical compounds present in the samples.

Methods of analysis of the volatile organic compounds of aromatic plants that do not require one to extract the EO can be very useful for understanding the chemical characteristics of species and their relationships with environmental and evolutionary factors, since they are faster, more accurate and have a lower cost. The use of the headspace technique combined with gas chromatography (HS-GC) has been applied in the study of aromatic plants, essential oils and fragrances (Rzepa et al. 2012; Desmedt et al. 2015; Virgiliou et al. 2021; Yu et al. 2022). The technique allows fast, clean and non-invasive analysis to identify VOCs from the plant matter of plants used for EO extraction, as already demonstrated for species of the genus such as *Chamaecyparis* (Chen et al. 2015), *Ocimum basilicum* L. (Gurkan and Hayaloglu 2023) and *Juniperus communis* (Chatzopoulou and Katsiotis 2006).

In this study, we used the HS-GC-MS technique to identify and analyze the variability in the composition of volatile organic compounds of rosewood leaves and branches in different states and then compared the results with the analysis using GC-MS of the essential oils obtained by hydrodistillation. Additionally, we analyzed the influence of the type of plant material and the age of the plant on the volatile organic compounds of the samples and on the concentration of linalool in the essential oils. As such, we sought to optimize the methodologies for the identification of crop management strategies and production of EO with characteristics that are more desirable for the perfumery industry.

Materials and Methods

Plant material

The collection of the material was carried out in May 2023 in the plantation of a rosewood essential oil company, located in the municipality of Maués, state of Amazonas, Brazil (-3.40584 S, -57.70700 W). On this property, there are about 14,000 rosewood trees, which have been divided into plots according to the year of planting. The climate in this region is of the humid tropical type, with an average temperature of 26.2 °C, annual precipitation of approximately 2,654 mm (ClimateData 2023), and the soil in the planting area is classified as Xanthic Hapludox (Krainovic et al. 2020).

We collected approximately 2 kg of thin branches and leaves from 40 trees of four distinct ages: 35, 27, 15 and 5 years (10 trees per age). At the time of collection, 2 grams of fresh matter from the leaves and branches of each plant were separately stored in 20 mL headspace vials, sealed with a metal cap with a silicone septum. On the same day of collection, the vials containing the fresh matter were stored in a freezer at -5 °C. The rest of the samples were dried in the shade at room temperature for 4 days, which is a similar period to what is used by the industry for extraction of essential oil. After this period, the leaves and branches were processed separately in a forest biomass crusher and then stored in polyethylene plastic bags, which were placed in a freezer until the moment the material was used for extraction of the essential oil. Before extraction, 2 grams of the dried material, both leaves and branches, were placed in new headspace vials and again stored in a freezer at -5 °C, for later analysis of the VOCs.

HS-GC-MS analysis of volatile organic compounds extracted from fresh and dried leaves and branches

The VOCs present in the solid material of the leaves and branches, in the fresh and dry states, were collected by headspace (AOC-6000 plus). When collecting volatiles, the conditions used in the injection were: incubation temperature of 80°C for 20 min, with agitation at 250 rpm, with a syringe temperature of 80°C. The injection flow rate was 100 mL/min, with a post purge time of 60 sec and analysis time of 30 min.

The headspace was connected to a gas chromatograph (Nexis GC-2030, Shimadzu) coupled to a mass spectrometer (GCMS-TQ8050 NX, Shimadzu). A 30 m x 0.25 mm x 0.25 µm column (Shimadzu SH-5SIL MS) was used with helium as the drag gas at a column flow of 1.88 mL/min. The device was equipped with automatic injector in split mode (100:1) with inlet pressure of 100 kPa and constant linear speed of 49.1 cm/sec. The temperature of the injector was 250 °C and the following oven temperature schedule was performed: 30 °C for 1 min, increasing to 250 °C at a ramp rate of 8

°C/min, which was then maintained for 1.5 minutes. The mass range used for the mass selective detector was 45-500 m/z in the scan mode.

Extraction of volatile organic compounds from the essential oils of leaves and branches

We obtained the essential oils via hydrodistillation in Clevenger apparatus (Clevenger 1928), which was coupled to a 2,000 mL flask with a heating blanket. Hydrodistillation was carried out for 1 hour after the initial boiling using 50 grams of dry and chopped material and 500 mL of distilled water. The VOCs present in the essential oils were analyzed in a gas chromatograph (Nexis GC-2030, Shimadzu) coupled to a mass spectrometer (GCMS-TQ8050 NX, Shimadzu). A 30 m x 0.25 mm x 0.25 μ m column (Shimadzu SH-5sil MS) was used with helium as the drag gas at a column flow of 1.50 mL/min. The device was equipped with an automatic injector in split mode (100:1) with inlet pressure of 83.5 kPa and constant linear speed of 44.2 cm/sec. The temperature of the injector was 250 °C and the following oven temperature schedule was performed: 40 °C for 1 min, with an increase to 200°C at a ramp rate of 5 °C/min, which was then maintained at 200 °C for 2 minutes. The mass range used for the mass selective detector was 20-600 m/z in the scan mode.

Identification of volatile organic compounds and quantification of linalool

The VOCs were identified by comparing their mass spectra to those of the NIST20R, NIST20M1 and NIST20M2 libraries. Compounds with similarity greater than 90% to library data and relative content greater than 0.1% were considered in the statistical analyses. Linalool, the major compound of the samples, was quantified using the external standard method. The pure standard of racemic linalool (97%, Sigma Aldrich) diluted in hexane was used, and this solution was analyzed at five different concentrations in the GC-MS. A calibration curve was constructed considering the different concentrations used and the respective peak areas of the standard (Fig. S1). The concentration of linalool was therefore calculated considering the area of the compound observed in the chromatogram of each sample in relation to the standard analytical curve.

Statistical analysis

To verify the dissimilarities between VOCs of the samples in the different states (fresh, dry or essential oil), different types of plant material (leaves or branches) and different ages of the plants (35, 27, 15 or 5 years), non-metric multidimensional scaling analysis (NMDS) with Aitchison's distance was used due to its suitability for compositional data, invariance to linear transformations, preservation of the geometry of the data, using the *vegan* package v.2.6.4 (Oksanen et al. 2022). The difference in dissimilarity structures between the groups, defined by the variables state of the material, type of plant material and age of the plant, was evaluated using permutation multivariate analysis of variance (PERMANOVA), with a high number of permutations (9,999) to test the null hypothesis that there is no significant difference between the groups, also with the use of the *vegan* package. To test which specific groups of each variable were significantly different from the others, we used the "pairwise adonis" function with the *ranacapa* v.0.1.0 package (Kandlikar 2021), with Bonferroni correction. Additionally, a heat map was produced to represent the presence and absence of VOCs identified in the fresh and dry samples and in the form of essential oil, both from the leaves and from the branches using the *tidyverse* v.2.0.0 package (Wickham et al. 2019).

To verify the influence of the variables age and plant material on the concentration of linalool observed in each sample, a two-way analysis of variance (two-way ANOVA) was performed with the *vegan* package. The Tukey test was used to make comparisons between the means of the different categories of variables. Normality (Shapiro-Wilk) and homogeneity of variances (Levene) tests were conducted with the *car* v.3.1.2 package. The patterns observed in the concentrations of linalool in the EOs of samples from different aged trees and different types of plant material were presented in boxplots. All statistical analyses were performed in the software R v.4.3.0 (R Core Team 2023).

Results and Discussion

Effect of the state of the material and composition of volatile organic compounds

By analyzing the relative composition of the VOCs from fresh and dry leaves and branches, and of the essential oils of both types of plant material, we observed distinct patterns in the samples in the different states (PERMANOVA: $F = 33.040209$, $p < 0.001$, Table S1). Via the NMDS, we observed that the dry samples exhibited greater dissimilarity in relation to the others, while the fresh samples and the EOs presented less evident distinctions (Fig. 1A). However, the analysis of the

specific groups indicated statistically significant difference in the relative composition of VOCs (Table S2).

The difference in the composition of volatiles between the plant materials analyzed in different states was also observed in similar studies conducted with other aromatic species. Research on *Ocimum basilicum* L. shows that different parts of the plant have distinct volatiles, and the drying process significantly affects their concentrations in the plant and its essential oil (Gurkan and Hayaloglu 2023). In *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.), Buchbauer et al. (1994) showed quantitative and qualitative differences in the volatile compounds of leaves and branches when obtained by headspace, distillation of essential oil or ether extraction. The variation between the composition of volatiles by headspace compared to the extraction by hydrodistillation of the essential oil was also observed for cones of *Juniperus communis* L. cultivated in Greece (Chatzopoulou and Katsiotis 2006). These analyses highlight the importance of considering different methods for a more comprehensive understanding of the composition of volatiles in aromatic plants.

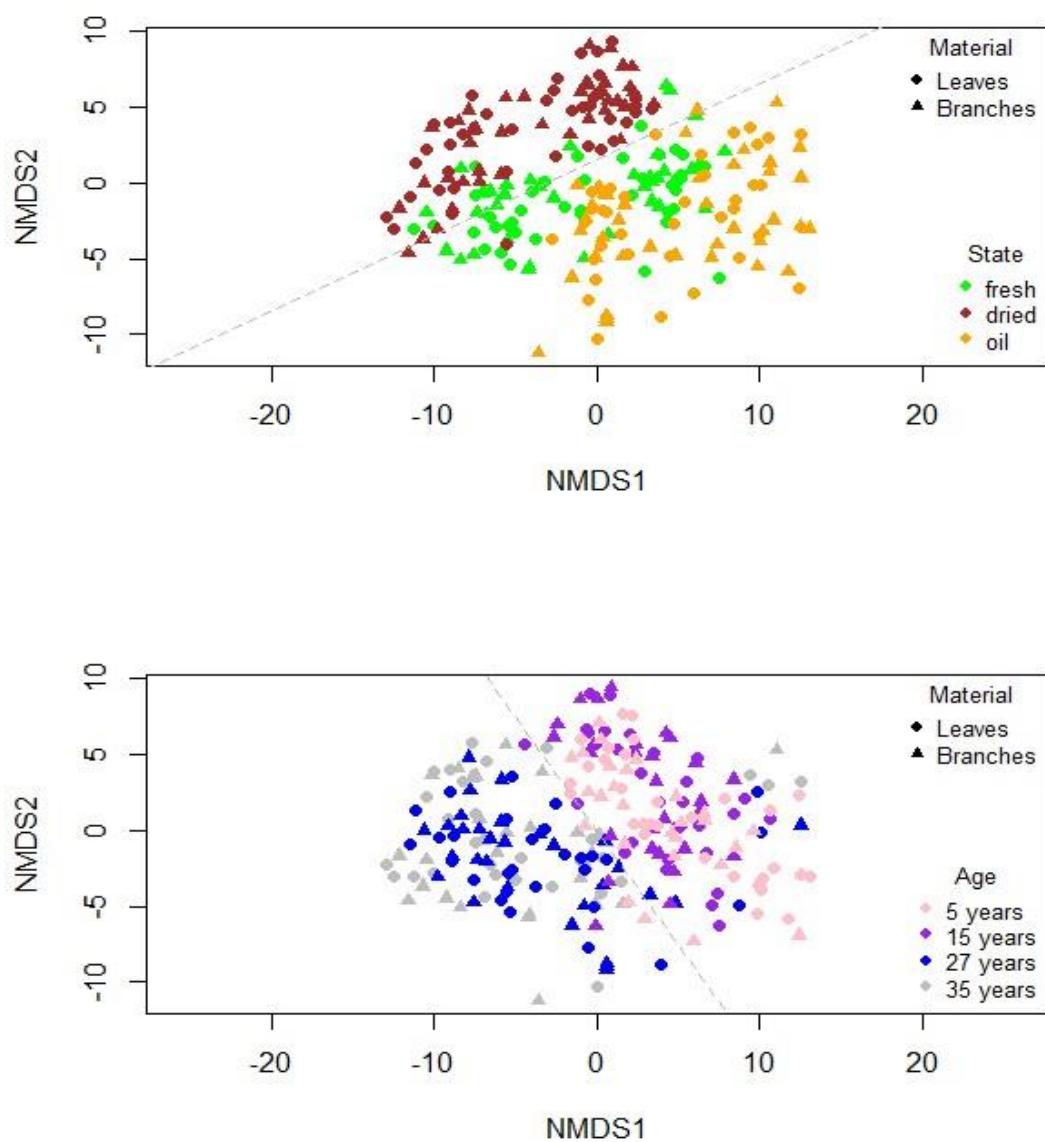


Fig. 1. NMDS representing the dissimilarities between the volatile organic compounds from the samples of fresh and dry branches and leaves and essential oil (A), and between the samples of branches and leaves of trees of different ages (B).

Regarding the total number of compounds identified in the analyses of the materials in different states, we observed few discrepancies between the groups (Table 1). In the samples from the branches, 28 VOCs were identified in the fresh material, 28 in the dry material and 24 in the EOs. In the leaves, these values corresponded to 24 in the fresh material, 27 in the dry material and 24 in the extracted EOs. Linalool (3,7-dimethyl-1,6-octadien-3-ol) was the majority compound observed in all the samples analyzed, with mean relative area in the branches of 90.65%, 84.22% and 93.02%, and

in the leaves of 90.65%, 84.88% and 93.74%, considering fresh material, dry material and essential oil, respectively.

The sesquiterpene spathulenol was the compound with the second highest relative proportion in the EOs from branches and leaves (average of approximately 3%); while, in the solid materials, it was detected in a lower proportion (average of less than 1%, both in fresh and dry materials), indicating that the hydrodistillation process influences the relative composition of this VOC in the sample. Spathulenol is described as a colorless, viscous compound with an earthy aromatic smell and a bitter, pungent taste (Juell et al. 1976), and its presence has already been reported in the essential oil of leaves or branches of several species of the Lauraceae family besides *A. rosaeodora*, such as *Cinnamomum osmophloeum*, *Licaria martiniana*, *A. parviflora*, *A. terminalis* and *Nectandra cuspidata* (Chao et al. 2005; Alcântara et al. 2010; Da Silva et al. 2017; Xavier et al. 2021).

The monoterpene alpha-pinene was observed in greater proportions in branches and leaves analyzed using headspace when compared to the EOs of these same materials. This compound has an intense and characteristic odor reminiscent of pine and turpentine (Vespermann et al. 2017) and is of great interest for medical use. It also plays an important role in the fragrance and aroma industry (Allenspach and Steuer 2021). Other monoterpenes, such as beta-pinene and d-limonene, along with linalool oxides, were observed in higher proportions in the branch and leaf profiles analyzed using headspace compared to the volatile organic compounds of the essential oils (Table 1). The tendency towards detecting higher concentrations of more volatile monoterpene hydrocarbons in headspace analyses, while distilled oils have higher amounts of less volatile sesquiterpenes, was also observed in similar studies involving other aromatic species (Buchbauer et al. 1994; Baranauskiene et al. 2003; Chatzopoulou and Katsiotis 2006).

Table 1. Identification of volatile organic compounds in samples of branches and leaves of rosewood in the fresh and dry states and in the essential oil. The values represent the mean relative composition (%) of the VOCs in the respective sample groups. M = monoterpene, S = sesquiterpene, O = other, DB = dry branches, DL = dry leaves, FB = fresh branches, FL = fresh leaves, EOB = essential oil from branches, EOL = essential oil from leaves, RT* = mean retention time of solid samples in HS-GC-MS, RT** = mean retention time of essential oil samples in GC-MS, nd = compound not detected in the sample. *** abbreviation of the name of the compound: 4a,8-dimethyl-2-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydronaphthalene.

| VOC | Family | RT (min)* | DB | DL | FB | FL | RT (min)** | EOB | EOL |
|---------------------------------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|
| alpha-Pinene | M | 7.337 | 2.49 | 1.92 | 1.56 | 1.21 | 7.723 | 0.82 | 0.60 |
| Camphene | M | 7.695 | 0.15 | 0.15 | 0.12 | 0.14 | - | nd | nd |
| Benzaldehyde | O | 7.943 | 0.27 | 0.23 | nd | nd | - | nd | nd |
| beta-Pinene | M | 8.309 | 1.36 | 1.06 | 1.02 | 0.84 | 9.047 | 0.50 | 0.39 |
| 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | O | 8.436 | 1.27 | 1.13 | nd | nd | 9.379 | 1.09 | 1.39 |
| beta-Myrcene | M | 8.563 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | - | nd | nd |
| 5-Hepten-2-ol, 6-methyl- | O | 8.634 | 0.31 | 0.32 | nd | nd | 9.556 | 0.15 | 0.23 |
| D-Limonene | M | 9.432 | 0.30 | 0.33 | 0.30 | 0.38 | 10.621 | 0.17 | 0.18 |
| Eucalyptol | M | 9.494 | 0.21 | 0.16 | 0.16 | 0.19 | 10.767 | 0.17 | 0.17 |
| cis-Linalool oxide | M | 10.311 | 2.37 | 2.46 | 1.67 | 1.54 | 11.983 | 1.28 | 1.06 |
| trans-Linalool oxide (furanoid) | M | 10.644 | 2.38 | 2.62 | 1.46 | 1.37 | 12.453 | 1.07 | 0.94 |
| Linalool | M | 10.932 | 84.22 | 84.88 | 90.65 | 91.80 | 12.925 | 93.02 | 93.74 |
| trans-Linalool oxide (pyranoid) | M | 12.445 | 0.35 | 0.37 | 0.23 | 0.20 | 15.223 | 0.15 | 0.14 |
| alpha-Terpineol | M | 12.872 | 0.17 | 0.15 | 0.20 | 0.21 | 15.867 | 0.16 | 0.18 |
| alpha-Cubebene | S | 15.761 | 0.29 | 0.25 | 0.20 | 0.17 | - | nd | nd |
| Cyclosativene | S | 16.208 | 0.17 | 0.22 | 0.13 | 0.12 | - | nd | nd |
| Copaene | S | 16.300 | 1.39 | 1.64 | 0.67 | 0.81 | 21.188 | 0.22 | 0.25 |
| beta-Elemene | S | 16.517 | 0.34 | 0.31 | 0.20 | 0.27 | 21.562 | 0.10 | nd |
| alpha-Gurjunene | S | 16.872 | 0.39 | 0.36 | 0.31 | 0.23 | 22.073 | nd | 0.14 |
| Caryophyllene | S | 17.094 | 0.42 | 0.40 | 0.28 | 0.31 | 22.402 | 0.15 | 0.17 |
| alpha-Guaiene | S | 17.321 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | nd | - | nd | nd |
| Alloaromadendrene | S | 17.717 | 0.21 | 0.18 | 0.21 | 0.12 | 27.192 | 0.10 | 0.31 |
| 4a,8-Dimethyl-2*** | S | 17.979 | 0.30 | 0.26 | 0.28 | 0.19 | 23.817 | 0.13 | 0.13 |
| beta-Selinene | S | 18.271 | 1.53 | 1.41 | 0.90 | 0.71 | 24.152 | 0.62 | 0.54 |
| alpha-Selinene | S | 18.382 | 1.38 | 1.28 | 0.82 | 0.68 | 24.321 | 0.55 | 0.46 |
| delta-Guaiene | S | 18.454 | 0.12 | 0.14 | nd | nd | - | nd | nd |
| beta-Cadinene | S | 18.700 | 0.43 | 0.44 | 0.20 | 0.28 | - | nd | nd |
| Spathulenol | S | 19.692 | 0.23 | nd | 0.71 | 0.62 | 26.253 | 2.98 | 2.87 |
| Caryophyllene oxide | S | 19.800 | Nd | nd | 0.82 | 0.24 | 26.605 | 0.95 | 0.92 |
| 14-Hydroxycaryophyllene | S | - | Nd | nd | nd | nd | 26.631 | 0.84 | 0.46 |
| Guaiol | S | 19.975 | Nd | nd | 0.14 | nd | 26.943 | 0.23 | 0.20 |
| Humulene epoxide II | S | 20.234 | Nd | nd | 0.14 | nd | 27.286 | 0.18 | 0.15 |
| Neointermedeol | S | 20.651 | Nd | nd | 0.24 | nd | 28.237 | 0.51 | 0.70 |

By observing the heat map that represents the frequency at which each VOC was detected in the composition of the analyzed samples, it is possible to spot similar chemical profiles between groups of different states and plant materials (Fig. 2). In addition to the linalool that was identified in all samples, minority compounds such as monoterpenes alpha-pinene, beta-pinene, cis-linalool oxide, trans-linalool oxide (furanoid) and sesquiterpene beta-selinene, were identified in more than 95% of the samples analyzed, regardless of the state of the material and type of plant material analyzed. These compounds have been reported in other studies that address chemical characteristics of essential oils obtained from rosewood leaves or branches (Zellner et al. 2006; Maia et al. 2007; Fidelis et al. 2012; Sampaio et al. 2012; Pimentel et al. 2018; Xavier et al. 2021), among other monoterpenes and sesquiterpenes that constitute the minority fractions of these EOs. Thus, it is evident that the HS-GC-MS technique, especially for fresh material, is efficient in predicting the main compounds present in the EOs, thus providing a quick and economical analysis of chemical variability in rosewood.

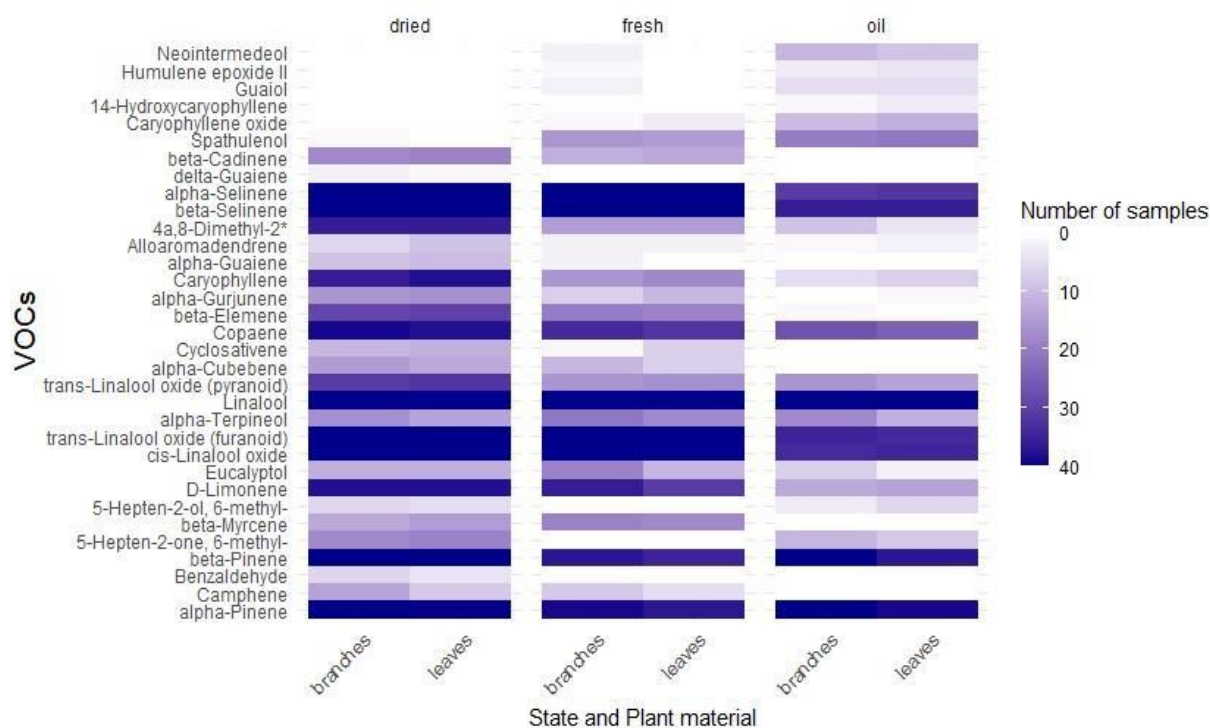


Fig. 2. Heat map representing the number of samples in which each VOC was identified, considering the total of 40 trees, two types of material (branches and leaves) and three states of material (fresh, dry and essential oil).

Only one compound present in the EOs was not detected in the solid material, 14-hydroxycaryophyllene, a sesquiterpene identified in only one sample of EO extracted from the

branches and in three samples extracted from the leaves, in all cases with a relative composition of less than 1% of the total VOCs. In some samples of fresh and dry matter, the presence of six VOCs was observed, which were not identified in the EOs, the sesquiterpenes alpha-cubebene, alpha-guaiene, beta-cadinene and cyclosativene, and the monoterpenes beta-myrcene and camphene, indicating that the concentration of these compounds is reduced by the distillation process. These VOCs had a relative composition equal to or less than 1% in the fresh materials in which they were detected. In addition, in some dry samples, the presence of benzaldehyde was detected, which is absent in both fresh matter and essential oils. When establishing comparisons between the detection of HS-CG and traditional analysis of EO by gas chromatography, the absence of some compounds can be explained by their volatility or insufficient concentration (Caron et al. 2013).

The international standard that specifies characteristics of rosewood oil of the Brazilian type (indicated in the document as EO of the species *Aniba rosaeodora* Ducke or *Aniba parviflora* (Meisn.) Mez.), which was created in order to facilitate the evaluation of its quality, corresponds to ISO 3761:2005. According to this standard, the following components are representative and characteristic of these EOs when analyzed by gas chromatography: alpha-pinene (traces at 1%), 1,8-cineole (synonym of eucalyptol, 0.3 to 3%), cis-linalool oxide (furanoid) (0.5 to 2%), trans-linalool oxide (furanoid) (0.5 to 2%), linalool (70 to 90%), alpha-terpineol (2 to 7%), geraniol (0.5 to 2.5%), alpha-copaene (traces to 3%) and benzyl benzoate (0.2 to 1.6%) (ISO 2005). Of these, geraniol and benzyl benzoate were not identified in any of the samples analyzed in this research, while all the others were observed in both the essential oils and the fresh and dry material. It should be noted that ISO 3761:2005 was elaborated for the process using industrial tanks and based on essential oil obtained by steam distillation of wood and not branches or leaves, under different conditions of extraction and analysis using gas chromatography, which may justify the differences and the detection of minority volatile compounds.

Relationship between plant material and composition of volatile organic compounds

The differences in compositions of the volatiles in the leaves and branches of the studied trees are not significant (PERMANOVA: $F = 1.262801$, $p > 0.001$, Table S1), and thus result in a limited influence on the distinction of patterns in the samples (Fig. 1). In contrast, Krainovic et al. (2018) observed lower dissimilarities between EOs extracted from branches, wood and a mixture of branches and leaves, compared to EO obtained only from leaves, which were considered a distinct group from

the others. These authors highlighted a higher proportion of spathulenol in the EO obtained from leaves in relation to the others, which diverges from the results of the present study. Zellner et al. (2006) compared the composition of EOs of different organs of this plant and identified higher proportions of cis and trans-linalool oxide and lower proportions of linalool in the EOs obtained from wood in relation to leaves. A similar result was reported by Ohashi et al. (1997), with a higher proportion of linalool in oils from wood and branches compared to leaves, and little variation in the minority compounds.

It is important to highlight that Brazilian companies that export essential oil from rosewood predominantly employ the mixture of chopped branches and leaves from successive prunings. The results of this research suggest that this strategy is effective since these plant organs have a similarity in their volatile composition. However, it must be considered that essential oils from rosewood branches and leaves have differences in the enantiomeric distribution of linalool, which potentially can affect the aroma (Lara et al. 2018), although this aspect was not evaluated in this research.

Relationship between plant age and composition of volatile organic compounds

When analyzing the composition of VOCs among plants of different ages, similar profiles were observed regarding the presence or absence of VOCs, with few unidentified minority compounds in some ages (Table 2). Compounds such as benzaldehyde, alpha-cubebene, cyclosativene and alpha-guaiene were unique to 5- and 15-year-old plants, while delta-guaiene was observed only in the 5-year-old plants. All of these presented a relative composition that was less than or equal to 0.3%, which possibly implies a low impact on the aroma of the samples.

Regarding the age of the plants, it was found that the dissimilarities between the VOCs of the plants aged 5 and 15 years differ from those between the plants aged 27 and 35 years (Fig. 1B), indicating the distinction in volatile organic composition between younger and older plants. In contrast, the comparison of the relative composition of VOCs revealed distinct patterns between stages of maturity. The main distinctions were observed in the higher proportions of linalool oxides in the branches and leaves of older trees, compared to younger trees (Table 2). cis-Linalool oxide showed relative averages of 1.27% and 1.09%, 1.18% and 1.02%, 2.26% and 2.26%, 2.26% and 2.31% in branches and leaves of trees aged 5, 15, 27 and 35 years, respectively. trans-Linalool oxide (furanoid) showed relative averages equivalent to 1.07% and 1.03%, 1.13% and 0.94%, 2.09% and 2.42%, 2.27% and 2.19% in branches and leaves of trees of 5, 15, 27 and 35 years, respectively.

The partial results of Maia et al. (2007) indicate an expectation of a higher percentages of linalool oxides, alpha-terpineol and terpinen-4-ol in older leaves, corroborating part of the results of this research. cis and trans-Linalool oxide can be obtained by synthetic processes or from the oxidation of linalool, with the action of fungi being one of the main factors associated with these biotransformation processes (Demyttenaere and Willemen 1998; Raguso and Pichersky 1999; Mirata et al. 2008). Both isomers have a refreshing, woody citrus odor with nuances of camphor and lemon (Mosciano 2002), which may contribute to aromatic differences between older and younger plants. In addition, the sesquiterpene spathulenol shows a higher relative proportion in the branches and a lower proportion in the leaves of younger plants compared to older ones.

Table 2. Identification of volatile organic compounds in samples of rosewood branches and leaves from trees planted 5, 15, 27 and 35 years ago. The values represent the mean relative composition (%) of the VOCs in the respective sample groups. The acronyms of the columns refer to the age of the tree (5, 15, 27 or 35), while the letters represent the plant material (branches or leaves). *abbreviation of the name of the compound: 4a,8-dimethyl-2-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydronaphthalene.

| VOC | 5B | 5L | 15B | 15L | 27B | 27L | 35B | 35L |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| alpha-Pinene | 1.89 | 1.65 | 1.62 | 1.42 | 1.63 | 0.91 | 1.36 | 0.97 |
| Camphene | 0.14 | 0.15 | 0.12 | 0.14 | 0.18 | nd | 0.13 | 0.12 |
| Benzaldehyde | 0.30 | 0.14 | 0.27 | 0.31 | nd | nd | nd | nd |
| beta-Pinene | 1.18 | 1.01 | 1.01 | 0.92 | 0.91 | 0.55 | 0.73 | 0.53 |
| 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 1.58 | 2.47 | 1.28 | 0.84 | 1.58 | 1.23 | 0.32 | 0.73 |
| beta-Myrcene | 0.14 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.13 | nd |
| 5-Hepten-2-ol, 6-methyl- | 0.30 | 0.45 | nd | nd | 0.28 | 0.24 | 0.14 | 0.28 |
| D-Limonene | 0.32 | 0.41 | 0.36 | 0.35 | 0.21 | 0.27 | 0.20 | 0.20 |
| Eucalyptol | 0.24 | 0.19 | 0.16 | 0.17 | 0.15 | 0.12 | 0.12 | nd |
| cis-Linalool oxide | 1.27 | 1.09 | 1.18 | 1.02 | 2.26 | 2.36 | 2.36 | 2.31 |
| trans-Linalool oxide (furanoid) | 1.07 | 1.03 | 1.13 | 0.94 | 2.09 | 2.42 | 2.27 | 2.19 |
| alpha-Terpineol | 0.20 | 0.19 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.16 | 0.13 | 0.17 |
| Linalool | 88.96 | 90.57 | 91.08 | 91.72 | 87.88 | 89.38 | 89.27 | 88.89 |
| trans-Linalool oxide (pyranoid) | 0.18 | 0.14 | 0.17 | 0.16 | 0.30 | 0.35 | 0.32 | 0.31 |
| alpha-Cubebene | 0.27 | 0.24 | 0.23 | 0.20 | nd | nd | nd | nd |
| Cyclosativene | 0.17 | 0.18 | 0.17 | 0.19 | nd | nd | nd | nd |
| Copaene | 1.19 | 1.23 | 1.09 | 1.52 | 0.48 | 0.54 | 0.41 | 0.56 |
| beta-Elementene | 0.37 | 0.31 | 0.26 | 0.37 | 0.16 | 0.17 | 0.14 | 0.17 |
| alpha-Gurjunene | 0.43 | 0.37 | 0.26 | 0.21 | nd | 0.12 | nd | nd |
| Caryophyllene | 0.52 | 0.43 | 0.32 | 0.36 | 0.25 | 0.26 | 0.19 | 0.28 |
| alpha-Guaiene | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | nd | nd | nd | nd |
| Alloaromadendrene | 0.18 | 0.18 | nd | 0.13 | 0.26 | 0.45 | nd | nd |
| 4a,8-Dimethyl-2-(prop-1-en-2-yl)* | 0.30 | 0.28 | 0.21 | 0.23 | 0.29 | 0.24 | 0.25 | 0.20 |
| beta-Selinene | 1.04 | 0.69 | 0.62 | 0.78 | 1.40 | 0.97 | 1.03 | 1.14 |
| alpha-Selinene | 1.00 | 0.65 | 0.60 | 0.73 | 1.25 | 0.92 | 0.89 | 1.02 |
| delta-Guaiene | 0.12 | 0.14 | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| beta-Cadinene | 0.41 | 0.47 | 0.24 | 0.29 | nd | 0.13 | nd | nd |
| Spathulenol | 3.33 | 1.35 | 4.61 | 0.55 | 1.38 | 2.39 | 1.66 | 1.86 |
| Caryophyllene oxide | 1.28 | Nd | 1.03 | 0.55 | 0.82 | 0.21 | 0.63 | 0.98 |
| 14-Hydroxycaryophyllene | 0.84 | 0.55 | nd | nd | nd | 0.27 | nd | nd |
| Guaiol | 0.43 | Nd | 0.29 | nd | 0.14 | 0.21 | 0.14 | 0.20 |
| Humulene epoxide II | 0.17 | Nd | nd | 0.13 | 0.14 | nd | 0.19 | 0.18 |
| Neointermedeol | nd | Nd | 0.17 | 0.13 | 0.23 | nd | 0.63 | 0.77 |

The specific analysis comparing the age groups reinforces that the VOCs of the EOs do not differ significantly between trees aged 35 and 27, nor between those aged 15 and 5. However, all other comparisons between age groups reveal statistically significant differences (Table S3). This

trend contrasts with another study that compared EOs of rosewood trees aged 4, 10 and 20 years, which presents very similar profiles between samples of different ages, including little variation in the relative composition of both linalool and spathulenol oxides (Fidelis et al. 2013). However, despite being the same area where material was collected for this research, the fact that the authors did not consider repetitions for different ages, in addition to having performed extraction using steam drag of a mixture of branches and leaves, makes it difficult to compare the results observed.

On the other hand, in research related to other forest species, tree maturity has been associated with variations in the composition of VOCs. In a study conducted in *Eucalyptus globulus* forests in Portugal, it was observed that leaves of young trees (2 years old) produce higher amounts of monoterpenes, such as alpha-pinene, limonene and 1,8-cineole, than leaves of older trees (6-7 years old) (Nunes and Pio 2001). Shiferaw et al. (2019) also investigated the variations in essential oil (EO) from the leaves of *E. globulus* trees of different ages (3, 5, 8, 12, 20, 35 and 100 years) cultivated in Ethiopia and highlighted the greater amount of eucalyptol in plants of 100 years of age, while alpha-pinene and d-limonene were detected in the EO of the youngest plants. In addition, the variations observed in the main constituent, cineole, reinforced the influence of age on the characteristics of the essential oil. These observations highlight the importance of expanding these investigations to rosewood, increasing the sampling intensity and the age groups considered. These efforts will contribute to the development of sustainable and long-term silvicultural practices for this plant.

Variations in linalool concentrations in essential oils

Regarding the concentration of linalool in the EOs, calculated by means of a calibration curve using the external standard method (Fig. S1), patterns similar to those of the relative composition of VOCs were observed. The ANOVA results indicate that the age of the plant has a significant statistical impact on the variation in linalool concentration ($p < 0.001$), while the type of material has no significant influence on this variation ($p = 0.581$) (Table S4).

When comparing the specific age groups of the trees, there was a tendency to reduce the concentration of linalool in the EOs extracted from both leaves and branches with the increase in maturity (Fig. 3). Five-year-old trees have a significantly higher concentration of linalool in the EOs when compared to trees of other ages. However, there was no significant difference between the other age groups (Table S5). Normality of the data was validated using the Shapiro-Wilk test ($W = 0.97382$, $p\text{-value} = 0.09954$) and the Levene test ($F \text{ value} = 0.9801$, $\text{Pr}(>F) = 0.4525$).

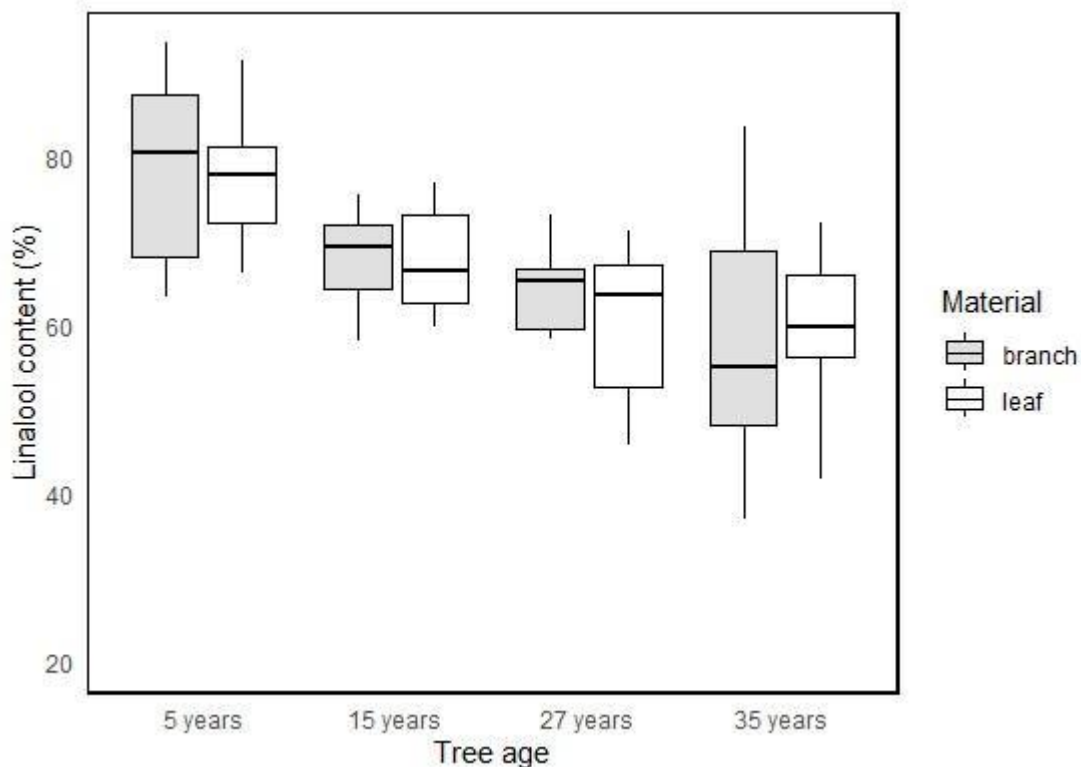


Fig. 3. Boxplot representing the mean of and variance in linalool concentrations in essential oils (EOs) extracted from branches and leaves of rosewood trees of different ages.

These results contrast with a survey of rosewood populations in French Guiana, where no relationships were found between linalool content and tree maturity, despite the younger ones presenting higher yields in the extraction of EO (Chantraine et al. 2009). In a commercial plantation in Amazonas state, Fidelis et al. (2013) observed that the leaves and branches of 10-year-old trees had a higher linalool content than trees of 4 and 20 years. Other authors who investigated seasonal variations in the EO of rosewood trees in the state of Pará reported variations in the linalool content according to the age of the leaves, noting that the younger they were, the richer they were in linalool (Maia et al. 2007). These discrepancies underscore the complexity of interactions between tree age and chemical composition in rosewood EOs, indicating the need for additional research to gain a deeper understanding.

Conclusions

Our study represented an advance by validating the HS-GC-MS technique for the analysis of volatile organic compounds (VOCs) in rosewood. This method, especially effective in predicting the

main compounds of essential oils (EOs), showed promise for evaluations in minute samples of fresh leaves and branches. The implementation of this methodology in future research may substantially heighten the understanding of chemical variability in rosewood plantations. The simplification of the steps of collection, transport and analysis of the material saves time and resources, and facilitates studies with large samples and, consequently, enables a more comprehensive understanding of the composition of the volatiles. The technique applied to the analysis of fresh material is especially advantageous since it excludes the variations associated with the difficulty in standardizing processes of drying the raw material and the extraction of essential oils. For this reason, in addition to giving greater robustness to the conclusions reached, the approach is important for example in studies that seek to relate the composition of volatiles in species of *Anibas* to ecological and evolutionary factors.

The results achieved in this work were also positive in that, by analyzing the effect of plant age and plant material on the composition of volatiles in branches and leaves, they advance the knowledge about rosewood silviculture. The results highlighted the significant impact of tree age on VOC production, especially on the relative composition of linalool oxides and linalool content, which greatly impact the aroma of the oil used in the fine perfumery industry. One relevant observation is that the practice of successive pruning can have a limited span, since the production of monoterpenes of interest tends to decrease as the plantations mature. Although this study did not specifically examine the ideal cycle for the replacement of managed plantations, we proposed that strategies such as cutting wood for essential oil extraction (EO) after the first decades of exploitation of leaves and branches should be considered. These conclusions highlight the importance of taking into account the age of the plants when analyzing the composition of the volatiles. In addition, the findings indicate promising directions in future research that will more deeply explore the influence of maturity on the chemical properties of this species, thus contributing to a more effective and sustainable management of this valuable resource of Amazonian biodiversity.

References

- Alcântara JM, De Lima Yamaguchi KK, Da Veiga VF, Lima ES (2010) Composição química de óleos essenciais de espécies de *Aniba* e *Licaria* e suas atividades antioxidante e antiagregante plaquetária. *Quim Nova* 33:141–145
- Allenspach M, Steuer C (2021) α -Pinene: A never-ending story. *Phytochemistry* 190:112857. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112857>

- Amazonas DR, Oliveira C, Barata LES, et al (2020) Chemical and Genotypic Variations in *Aniba rosiodora* from the Brazilian Amazon Forest. *Molecules* 26:1–13. <https://doi.org/10.3390/molecules26010069>
- Amusant N, Beauchène J, Digeon A, Chaix G (2016) Essential oil yield in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke): Initial application of rapid prediction by near infrared spectroscopy based on wood spectra. *J Near Infrared Spectrosc* 24:507–515. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1241>
- Aprotosoiaie AC, Hâncianu M, Costache II, Miron A (2014) Linalool: A review on a key odorant molecule with valuable biological properties. *Flavour Fragr J* 29:193–219. <https://doi.org/10.1002/ffj.3197>
- Barata LES, Carvalho RQD (2008) Scents of the Amazon: Replacing Rosewood in Perfumery? Part I *. In: *Perfum. Flavorist*. <https://www.perfumerflavorist.com/fragrance/ingredients/news/21870145/scents-of-the-amazon-replacing-rosewood-in-perfumery-part-i>. Accessed 9 Feb 2023
- BRASIL (1992) Portaria No 37, de 03 de abril de 1992, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)
- Buchbauer G, Jirovetz L, Wasicky M, Nikiforov A (1994) Comparative Investigation of Douglas Fir Headspace Samples, Essential Oils, and Extracts (Needles and Twigs) Using GC-FID and GC-FTIR-MS. *J Agric Food Chem* 42:2852–2854. <https://doi.org/10.1021/jf00048a037>
- Caron L, Deslauriers A, Mshvildadze V, Pichette A (2013) Volatile compounds in the foliage of balsam fir analyzed by static headspace gas chromatography (HS-GC): An example of the spruce budworm defoliation effect in the boreal forest of Quebec, Canada. *Microchem J* 110:587–590. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.07.003>
- Chantraine JM, Dhénin JM, Moretti C (2009) Chemical variability of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in French Guiana. *J Essent Oil Res* 21:486–495. <https://doi.org/10.1080/10412905.2009.9700225>
- Chao LK, Hua KF, Hsu HY, et al (2005) Study on the Antiinflammatory activity of essential oil from leaves of *Cinnamomum osmophloeum*. *J Agric Food Chem* 53:7274–7278. <https://doi.org/10.1021/jf051151u>
- Chatzopoulou PS, Katsiotis ST (2006) Headspace analysis of the volatile constituents from *Juniperus communis* L. “berries” (cones) grown wild in Greece. *Flavour Fragr J* 21:492–496. <https://doi.org/10.1002/ffj.1615>
- Chen YJ, Lin CY, Cheng SS, Chang ST (2015) Rapid discrimination and feature extraction of three

- Chamaecyparis species by static-HS/GC-MS. *J Agric Food Chem* 63:810–820. <https://doi.org/10.1021/jf505587w>
- CITES (2010) Fifteenth meeting of the Conference of the Parties. <https://cites.org/eng/cop/15/ins/index.php>. Accessed 8 Aug 2023
- Clevenger JF (1928) American pharmaceutical association 345 apparatus for the determination of volatile oil.*. *J Pharm Sci* 17:345–349
- ClimateData (2023) Dados climáticos para cidades: Maués, AM, Brasil. <https://pt.climate-data.org/search/?q=maués>
- Da Silva JKR, Andrade EHA, Mourão RH V., et al (2017) Chemical profile and in vitro biological activities of essential oils of *Nectandra puberula* and *N. cuspidata* from the Amazon. *Nat Prod Commun* 12:131–134. <https://doi.org/10.1177/1934578x1701200137>
- da Trindade RCS, Xavier JKAM, Setzer WN, et al (2021) Chemical diversity and therapeutic effects of essential oils of aniba species from the amazon: A review. *Plants* 10:1–46. <https://doi.org/10.3390/plants10091854>
- Demyttenaere JCR, Willemen HM (1998) Biotransformation of linalool to furanoid and pyranoid linalool oxides by *Aspergillus niger*. *Phytochemistry* 47:1029–1036. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(98\)80066-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(98)80066-6)
- Desmedt B, Canfyn M, Pype M, et al (2015) HS-GC-MS method for the analysis of fragrance allergens in complex cosmetic matrices. *Talanta* 131:444–451. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.08.006>
- Đurović S, Micić D, Pezo L, et al (2022) Influence of the mowing and drying on the quality of the peppermint (*Mentha x piperita* L.) essential oil: Chemical profile, thermal properties, and biological activity. *Ind Crops Prod* 177:.. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114492>
- Fidelis CHV, Augusto F, Sampaio PTB, et al (2012) Chemical characterization of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) leaf essential oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with quadrupole mass spectrometry. *J Essent Oil Res* 24:245–251. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.676770>
- Fidelis CH V, Sampaio PTB, Krainovic PM, et al (2013) Correlation between maturity of tree and GC × GC – qMS chemical profiles of essential oil from leaves of *Aniba rosaeodora* Ducke. *Microchem J* 109:73–77. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.034>
- Gurkan H, Hayaloglu AA (2023) Changes in volatiles and essential oil composition of three organs (leaf, stem and flower) of purple basil (*Ocimum basilicum* L.) by GC–MS combined with

- multivariate statistical approach. *Food Chem Adv* 2:100292. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100292>
- Homma AKO (2016) Políticas para expansão do plantio de pau-rosa na Amazônia. In: *Uso e Conservação do Pau-Rosa*. pp 137–148
- ISO (2005) ISO 3761: Oil of rosewood, Brazilian type [*Aniba rosaeodora* Ducke or *Aniba parviflora* (Meisn.) Mez.]. 2005:7
- Juell S, Hansen R, Jork H (1976) Spathulenol, ein azulenogener Sesquiterpenalkohol. *Arch Pharm (Weinheim)* 309:458–466.
- Kandlikar GS, Gold ZJ, Cowen MC, et al. (2018). Ranacapa: An R package and shiny web app to explore environmental DNA data with exploratory statistics and interactive visualizations. *F1000Research* 7, 1–18. <https://doi.org/10.12688/f1000research.16680.1>
- Krainovic P, Almeida D, Desconci D, et al (2017) Sequential management of commercial rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) plantations in central Amazonia: Seeking sustainable models for Essential oil production. *Forests* 8. <https://doi.org/10.3390/f8120438>
- Krainovic PM, Almeida DRA de, Veiga Junior VF da, Sampaio P de TB (2018) Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *For Ecol Manage* 429:143–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.015>
- Krainovic PM, Bastos RP, Almeida DR de, et al (2020) Effect of rosewood plantation chronosequence on soil attributes in Central Amazonia. *Geoderma* 357:113952. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113952>
- Kubitzki K, Renner S (1982) Lauraceae I (Aniba and Aiouea). In: *Flora Neotropica*. pp 1–124
- Lara CS, Barata LES, Sampaio P de TB, et al (2018) Linalool enantiomeric distribution in rosewood-reminiscent populations in Central Amazon. *J Essent Oil Res* 30:464–469. <https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1492464>
- Lara CS, Costa CR, Sampaio PTB (2021) O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba* spp.) no Estado do Amazonas. *Rev. Econ. e Sociol. Rural* 59:1–8
- Letizia CS, Cocchiara J, Lalko J, Api AM (2003) Fragrance material review on linalool. *Food Chem Toxicol* 41:943–964. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(03\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(03)00015-2)
- Mączka W, Duda-Madej A, Grabarczyk M, Wińska K (2022) Natural Compounds in the Battle against Microorganisms—Linalool. *Molecules* 27:. <https://doi.org/10.3390/molecules27206928>
- Maia JGS, Andrade EHA, Couto HAR, et al (2007) Plant Sources of Amazon Rosewood Oil. *Quim*

Nova 30:1906–1910

- May PH, Barata LES (2004) Rosewood Exploitation in the Brazilian Amazon: Options for Sustainable Production. *Econ Bot* 58:257–265. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0257:reitba\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0257:reitba]2.0.co;2)
- MDIC (2023) Exportação e Importação Geral: óleos essenciais. Portal ComexStat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/92245>. Accessed 9 Aug 2023
- Mirata MA, Wüst M, Mosandl A, Schrader J (2008) Fungal biotransformation of (±)-linalool. *J Agric Food Chem* 56:3287–3296. <https://doi.org/10.1021/jf800099h>
- Mosciano G (2002) Organoleptic Characteristics of Flavor Materials. *Perfum Flavorist* 27:67–69
- Nunes T V., Pio CA (2001) Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests. *Chemosph - Glob Chang Sci* 3:239–248. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(01\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(01)00007-1)
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F., et al (2022) vegan: Community Ecology Package. <https://cran.r-project.org/package=vegan>
- Ohashi ST., Santana LSR., Green CL (1997) Brazilian Rosewood Oil: Sustainable Production and Oil Quality Management. *Perfum Flavorist* 8:16–20. [https://doi.org/10.1016/s0962-4562\(97\)80005-7](https://doi.org/10.1016/s0962-4562(97)80005-7)
- Osae R, Apaliya MT, Kwaw E, et al (2021) Drying techniques affect the quality and essential oil composition of Ghanaian ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Ind Crops Prod* 172:114048. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114048>
- Pastore TCM, Braga LR, Daniele DCG, et al (2022) A green and direct method for authentication of rosewood essential oil by handheld near infrared spectrometer and one-class classification modeling. *Microchem J* 182:107916. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107916>
- Pimentel RBQ, Souza DP, Albuquerque PM, et al (2018) Variability and antifungal activity of volatile compounds from *Aniba rosaeodora* Ducke, harvested from Central Amazonia in two different seasons. *Ind Crops Prod* 123:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.055>
- Raguso RA, Pichersky E (1999) A day in the life of a linalool molecule: Chemical communication in a plant-pollinator system. Part 1: Linalool biosynthesis in flowering plants. *Plant Species Biol* 14:95–120
- Rzepa J, Sajewicz M, Baj T, et al (2012) A Comparison of Methodical Approaches to Fingerprinting of the Volatile Fraction from Winter Savory (*Satureja montana*). *Chromatogr Res Int* 2012:1–8.

<https://doi.org/10.1155/2012/596807>

- Sampaio LDFS, Maia JGS, De Parijós AM, et al (2012) Linalool from rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) oil inhibits adenylate cyclase in the retina, contributing to understanding its biological activity. *Phyther Res* 26:73–77. <https://doi.org/10.1002/ptr.3518>
- Sampaio P de TB, Barbosa AP, Vieira G, et al (2005) Biomassa da rebrota de copas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) em plantios sob sombra parcial em floresta primária. *Acta Amaz* 35:491–494. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672005000400014>
- Santana A, Ohashi S, de Rosa L, Green CL (1997) Brazilian Rosewood Oil. *Int J Aromather* 8:16–20
- Sellami IH, Wannes WA, Bettaieb I, et al (2011) Qualitative and quantitative changes in the essential oil of *Laurus nobilis* L. leaves as affected by different drying methods. *Food Chem* 126:691–697. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.022>
- Shiferaw Y, Kassahun A, Tedla A, et al (2019) Investigation of Essential Oil Composition Variation with Age of *Eucalyptus globulus* Growing in Ethiopia. *Nat Prod Chem Res* 07:1–5. <https://doi.org/10.35248/2329-6836.19.7.360>
- Souza RCZ, Eiras MM, Cabral EC, et al (2011) The famous Amazonian rosewood essential oil: Characterization and adulteration monitoring by electrospray ionization mass spectrometry fingerprinting. *Anal Lett* 44:2417–2422. <https://doi.org/10.1080/00032719.2011.551852>
- Sugawara Y (2000) Odor Distinctiveness between Enantiomers of Linalool: Difference in Perception and Responses Elicited by Sensory Test and Forehead Surface Potential Wave Measurement. *Chem Senses* 25:77–84. <https://doi.org/10.1093/chemse/25.1.77>
- Team RC (2023) R: A language and environment for statistical computing.
- Vespermann KAC, Paulino BN, Barcelos MCS, et al (2017) Biotransformation of α - and β -pinene into flavor compounds. *Appl Microbiol Biotechnol* 101:1805–1817. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-8066-7>
- Virgiliou C, Zisi C, Kontogiannopoulos KN, et al (2021) Headspace gas chromatography-mass spectrometry in the analysis of lavender's essential oil: Optimization by response surface methodology. *J Chromatogr B Anal Technol Biomed Life Sci* 1179:122852. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2021.122852>
- Wang J, Li Y, Lu Q, et al (2021) Drying temperature affects essential oil yield and composition of black cardamom (*Amomum tsao-ko*). *Ind Crops Prod* 168:. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113580>
- Wickham H, Averick M, Bryan J, et al (2019) Welcome to the Tidyverse. *J Open Source Softw*

4:1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

Xavier JKAM, Maia L, Figueiredo PLB, et al (2021) Essential Oil Composition and DNA Barcode and Identification of Aniba species (Lauraceae) Growing in the Amazon Region. *Molecules* 26:1–19. <https://doi.org/10.3390/molecules26071914>

Yu D-X, Guo S, Wang J-M, et al (2022) Comparison of Different Drying Methods on the Volatile. *Foods* 11:. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods11111611>

Zellner BDA, Lo Presti M, Barata LES, et al (2006) Evaluation of leaf-derived extracts as an environmentally sustainable source of essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry and enantioselective gas chromatography-olfactometry. *Anal Chem* 78:883–890. <https://doi.org/10.1021/ac051337s>

List of Supplementary Material

Fig. S1. Analytical curve obtained via the external standard method, with different concentrations of standard linalool, for the determination of linalool concentrations in essential oil samples from leaves and branches.

Table S1. Result of PERMANOVA considering the influence of the variables state and type of material on the relative composition of volatile organic compounds (VOCs). df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*).

Table S2. Paired comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between fresh and dry samples analyzed using HS-GC-MS, and essential oils analyzed using GC-MS. df: degrees of freedom, SumsOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F. Model: F-statistic, p.value: p-value of F-statistic, p.adjusted: p-value adjusted by Bonferroni method. df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*).

Table S3. Pairwise comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between different age groups. df: degrees of freedom, SumsOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F.model: F-statistic, p.value: p-value of F-statistic, p.adjusted: p-value adjusted by Bonferroni method. df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*), significant differences are highlighted in bold.

Table S4. Results of the ANOVA used to assess the impact of tree age and type of plant material on linalool concentration in essential oils (EOs). Parameters include degrees of freedom (df), sum of squares (SumOfSqs), mean of squares (MeanSq), F-statistic (F), p-value of F-statistic (p.value). Statistical significance is represented by asterisks (*).

Table S5. Result of Tukey test for comparison of linalool concentration in essential oils (EOs) between different age groups. **diff**: mean difference between the compared groups, **lwr**: lower limit of the confidence interval for the mean difference, **upr**: upper limit of the confidence interval for the mean difference, **p adj**: adjusted p-value for correction of multiple comparisons. Statistical significance is represented by asterisks (*).

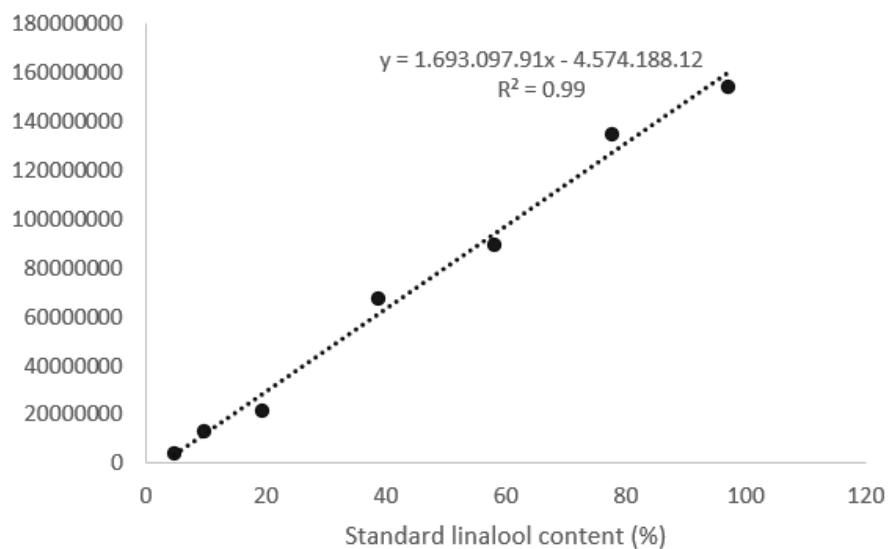


Fig. S1. Analytical curve obtained using the external standard method, with different concentrations of standard linalool, for the determination of linalool concentrations in essential oil samples from leaves and branches.

Table S1. Result of PERMANOVA considering the influence of variables state and type of material on the relative composition of volatile organic compounds (VOCs). df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R^2 : coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*).

| Variable | df | SumOfSqs | R^2 | F | Pr(>F) |
|----------|-----|-------------|-------------|-----------|---------|
| State | 2 | 4973.62929 | 0.183044063 | 33.040209 | 0.0001* |
| Material | 1 | 95.04635 | 0.003497983 | 1.262801 | 0.2230 |
| Age | 3 | 4566.03332 | 0.168043343 | 20.221678 | 0.0001* |
| Residual | 233 | 17537.05064 | 0.645414610 | NA | NA |
| Total | 239 | 27171.75960 | 1.000000000 | NA | NA |

Table S2. Paired comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between fresh and dry samples analyzed using HS-GC-MS, and essential oils analyzed using GC-MS. df: degrees of freedom, SumsOfSqs: sum of squares, R²: coefficient of determination, F.Model: F-statistic, p.value: p-value of F-statistic, p.adjusted: p-value adjusted by Bonferroni method. df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R²: coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*).

| Pairs | df | SumOfSqs | F.Model | R ² | p.value | p.adjusted |
|-------------|----|----------|----------|----------------|---------|------------|
| Fresh x dry | 1 | 1574.897 | 17.00017 | 0.09714372 | 0.001 | 0.003* |
| Fresh x oil | 1 | 1715.171 | 18.32504 | 0.10392761 | 0.001 | 0.003* |
| Dry x oil | 1 | 4170.376 | 44.01370 | 0.21787483 | 0.001 | 0.003* |

Table S3. Pairwise comparison of the relative composition of volatile organic compounds (VOCs) between different age groups. df: degrees of freedom, SumsOfSqs: sum of squares, R²: coefficient of determination, F.model: F-statistic, p.value: p-value of F-statistic, p.adjusted: p-value adjusted by Bonferroni method. df: degrees of freedom, SumOfSqs: sum of squares, R²: coefficient of determination, F value: F statistic, Pr (>F): p-value of the statistic. Statistical significance is represented by asterisks (*), significant differences were highlighted in bold.

| pairs | df | SumOfSqs | F.Model | R ² | p.value | p.adjusted |
|-----------------------|----------|------------------|------------------|-------------------|--------------|---------------|
| 35 vs 27 years | 1 | 159.0869 | 1.546248 | 0.01293431 | 0.109 | 0.654 |
| 35 vs 15 years | 1 | 2101.1530 | 21.794578 | 0.15479700 | 0.001 | 0.006* |
| 35 vs 5 years | 1 | 2456.1269 | 25.136194 | 0.17684583 | 0.001 | 0.006* |
| 27 vs 15 years | 1 | 1983.6501 | 21.121667 | 0.15073805 | 0.001 | 0.006* |
| 27 vs 5 years | 1 | 2174.1944 | 22.843351 | 0.16334957 | 0.001 | 0.006* |
| 15 vs 5 years | 1 | 257.1990 | 2.899314 | 0.02398123 | 0.010 | 0.060 |

Table S4. Results of the ANOVA used to assess the impact of tree age and type of plant material on linalool concentration of the essential oils (EOs). Parameters include degrees of freedom (df), sum of squares (SumOfSqs), mean of squares (MeanSq), F-statistic (F), p-value of F-statistic (p.value). Statistical significance is represented by asterisks (*).

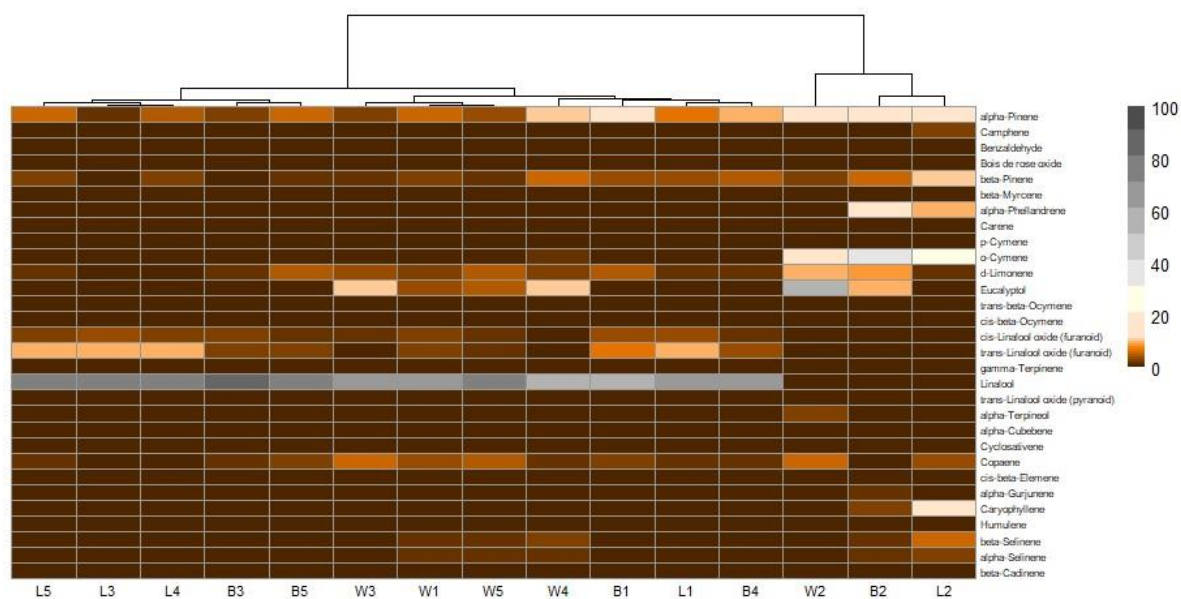
| Variable | df | SumOfSqs | MeanSq | F value | p.value |
|----------------|----|-------------|-------------|-------------|------------|
| Tree age | 3 | 425.623.884 | 141.874.628 | 110.111.438 | 0.0000005* |
| Plant material | 1 | 3.959.298 | 3.959.298 | 0.3072882 | 0.5810668 |
| Age: material | 3 | 11.137.085 | 3.712.362 | 0.288123 | 0.8338291 |
| Residuals | 72 | 927.694.108 | 12.884.640 | NA | NA |

Table S5. Result of the Tukey test for the comparison of linalool concentrations in essential oils (EOs) in different age groups. **diff**: mean difference between the compared groups, **lwr**: lower limit of the confidence interval for the mean difference, **upr**: upper limit of the confidence interval for the mean difference, **p adj**: adjusted p-value for correction of multiple comparisons. Statistical significance is represented by asterisks (*).

| Pairs | diff | Lwr | Upr | p adj |
|-----------------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| 35 vs 27 years | -23.805 | -11.821.153 | 7.060.153 | 0.9105370 |
| 35 vs 15 years | -66.845 | -16.125.153 | 2.756.153 | 0.2534532 |
| 35 vs 5 years | 189.320 | 9.491.347 | 28.372.653 | 0.0000079* |
| 27 vs 15 years | -43.040 | -13.744.653 | 5.136.653 | 0.6294413 |
| 27 vs 5 years | 165.515 | 7.110.847 | 25.992.153 | 0.0000984* |
| 15 vs 5 years | 122.475 | 2.806.847 | 21.688.153 | 0.0057280* |

Lara, C.S.; Barata, L.E.S; Junior, S.D.; Sampaio, P.T.B. **Variabilidade na composição volátil em plantas reconhecidas como pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae) em populações da Amazônia Central.** Manuscrito em preparação para a revista *Química Nova*.

Graphical Abstract



L = leaves B = branches W = wood
 1 = Pau-rosa embaúba1; 2 = Pau-rosa embaúba2; 3 = Pau-rosa itaúba; 4 = Pau-rosa jutai; 5 = Pau-rosa preciosa

Variabilidade na composição volátil em plantas reconhecidas como Pau-rosa (*Aniba* spp., Lauraceae) em populações da Amazônia Central

Caroline Schmaedeck Lara^{a*}, Sergio Duvoisin Junior^b, Lauro Euclides Soares Barata^c, Paulo de Tarso Barbosa Sampaio^{a,c}

^a Laboratório de Silvicultura e Tecnologias Digitais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, R. Condição Cruzeiro do Sul s.n., Aleixo, Manaus, Amazonas, Brasil, 69055-010

^b Central de Análises Químicas, Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1.200, Parque Dez de Novembro, Manaus, Amazonas, Brasil, 69050-020

^c Instituto de Biodiversidade e Floresta, Universidade Federal do Oeste do Pará, R. Vera Paz s/n, Santarém, Pará, Brasil, 68035-110

*e-mail: carol.slara@gmail.com

VARIABILITY OF VOLATILE COMPOSITION IN PLANTS RECOGNIZED AS ROSEWOOD (*Aniba* spp., LAURACEAE) IN POPULATIONS FROM THE CENTRAL AMAZON

Abstract

The growing value of rosewood essential oil drives its planting in the Brazilian Amazon, making it essential to study the chemical composition of the parent trees to guarantee the production of high-quality vegetative material and essential oil. In this research, we investigated the volatile composition of the wood, leaves, and branches of five rosewood morphotypes in six populations from the Central Amazon, using the headspace technique in conjunction with gas chromatography coupled to a mass detector. We observed significant distinctions in volatile compounds when comparing populations and morphotypes. Furthermore, we found differences in the volatile composition between leaves, branches and wood of the trees studied. These results highlight the complexity of chemical variability in rosewood and reinforce the importance of integrated approaches for its sustainable management and conservation, which could contribute to the development of effective strategies to produce high-quality essential oil and conservation of this Amazonian biodiversity resource.

Keywords: • Phytochemistry • Headspace • *Aniba rosiodora* Ducke • Linalool • Volatile organic compounds

Introdução

Pau-rosa é o nome popular de árvores geralmente identificadas como *Aniba rosiodora* Ducke., da família Lauraceae, com registros de ocorrência no Brasil, Guiana Francesa, Suriname, Guiana, Venezuela, Peru, Colômbia e Equador (Kubitzki and Renner 1982). Exploradas há cerca de cem anos para produção de óleo essencial aromático, essas plantas são consideradas ameaçadas de extinção no Brasil (BRASIL 1992). Por outro lado, a crescente valorização do óleo essencial de pau-rosa no mercado internacional tem ampliado a demanda por material vegetativo para estabelecimento de novos plantios na Amazônia brasileira. Um dos fatores limitantes, no entanto, corresponde à baixa qualificação dos cultivos, caracterizados pela ausência de seleção de material genético e químico de melhor qualidade (Lara et al. 2021, 2024a).

Outro problema comum a esta cadeia de valor, corresponde às incertezas na identificação botânica de sementes e mudas comercializadas como pau-rosa, associado à limitação de conhecimento biológico sobre a planta, e sua relação com as características químicas de interesse à indústria (Lara et al. 2024a). Na revisão taxonômica do gênero, *A. rosiodora* integra o subgrupo *A. panurensis* com outras 11 espécies de folhas papilhosas (Kubitzki and Renner 1982). A classificação dentro do complexo é de difícil aplicação mesmo na presença de material fértil, o que indica a má delimitação entre espécies devido à escassez de caracteres morfológicos de utilidade taxonômica (Matta Barbosa 2015). Somado a isto, antigos extrativistas reconhecem a existência de variedades, como pau-rosa *itaúba*, *tachi*, *embaúba* e *preciosa* (Maia et al. 2007), e as diferenciam pela densidade da madeira, formato e tamanho de folhas.

Um reflexo da fragilidade da delimitação entre as espécies do complexo, corresponde ao fato que o aroma exalado pela madeira ou folhas, parece ser o critério principal para os produtores determinarem se uma planta corresponde ou não à pau-rosa (Lara et al. 2024a). Este aroma é resultado da combinação de compostos voláteis produzidos em suas células parenquimáticas, principalmente monoterpenos e sesquiterpenos, sendo o linalol o composto majoritário (Chantraine et al. 2009, Fidelis et al. 2012, Sampaio et al. 2012, Pimentel et al. 2018). Dados químicos, considerando não apenas o grupo dos terpenos, foram utilizados em estudos sistemáticos de Aniba (Mors and Gottlieb 1959, Gottlieb and Kubitzki 1981a, b). No entanto, este critério para determinação de espécies é questionável, pois muitas vezes é insuficientemente informativo e pode gerar enganos ao desconsiderar que a distribuição de metabólitos secundários nas plantas pode ser irregular devido a

convergências evolutivas, ação de fungos endofíticos ou transferência gênica horizontal por bactérias (Wink 2016).

Alguns pesquisadores têm buscado integrar dados genéticos e químicos para diferenciar *A. rosiodora* de outras espécies do gênero (Xavier et al. 2021) e analisar a variabilidade entre populações de árvores reconhecidas como pau-rosa (Amazonas et al. 2020), representando avanços no entendimento dessas variações. Em outras pesquisas realizadas com pau-rosa, é demonstrado que sua composição volátil pode ser afetada por fatores climáticos (Maia et al. 2007, Pimentel et al. 2018), localização geográfica (Krainovic et al. 2018a, Amazonas et al. 2020), órgão da planta (Ohashi et al. 1997, Chantraine et al. 2009, Souza et al. 2011, Krainovic et al. 2018a, Lara et al. 2018) ou ciclo de corte (Krainovic et al. 2018a). Em relação aos morfotipos de pau-rosa, Maia *et al.* (Maia et al. 2007) verificaram diferentes rendimentos de extração e teor de linalol entre quatro variedades coletadas ao norte da Amazônia Central. Porém, esses autores utilizaram um baixo número de repetições coletadas em um mesmo local, o que dificulta a extrapolação dos resultados. Com isso, muitas questões relacionadas às variações químicas e suas relações com fatores genéticos e ambientais, permanecem pouco claras na literatura.

A compreensão sobre a distribuição das variações químicas entre as plantas que são reconhecidas como pau-rosa, é importante para a seleção de material propagativo, manejo das áreas de cultivo e planejamento da exploração para produção de óleo essencial. Por isso, nessa pesquisa investigamos a variação na composição volátil de diferentes morfotipos de pau-rosa reconhecidos localmente em seis populações da Amazônia Central, considerando três diferentes partes da planta: folhas, galhos ou madeira.

Parte Experimental

Coleta de dados

Neste estudo foram consideradas 40 árvores de pau-rosa, relacionadas à cinco diferentes morfotipos reconhecidos por produtores locais, abrangendo seis diferentes populações localizadas na região central da Amazônia brasileira (Figura 1). Produtores rurais de cada localidade, que trabalham ou já trabalharam com exploração de pau-rosa, indicaram a localização das árvores que coletamos, assim como a identificação do morfotipo correspondente. Foi coletada a seguinte quantidade de

espécimes por morfotipo de pau-rosa: 15 “embaúba1”, 2 “embaúba2”, 11 “itaúba”, 5 “jutaí” e 5 “preciosa”.

Todas as árvores foram georreferenciadas e descritas em uma ficha contendo medidas dendrométricas, fenologia, tipo morfológico, entre outras características. As coletas foram realizadas entre os meses de setembro de 2019 e março de 2020, período relacionado à estação chuvosa nessa região. Dados de temperatura e umidade relativa do ar foram registrados em campo utilizando um termo-higrômetro portátil. Durante as coletas, a temperatura variou entre 25.7 e 36.0 °C, e a umidade relativa do ar entre 59.0 e 90.4%.

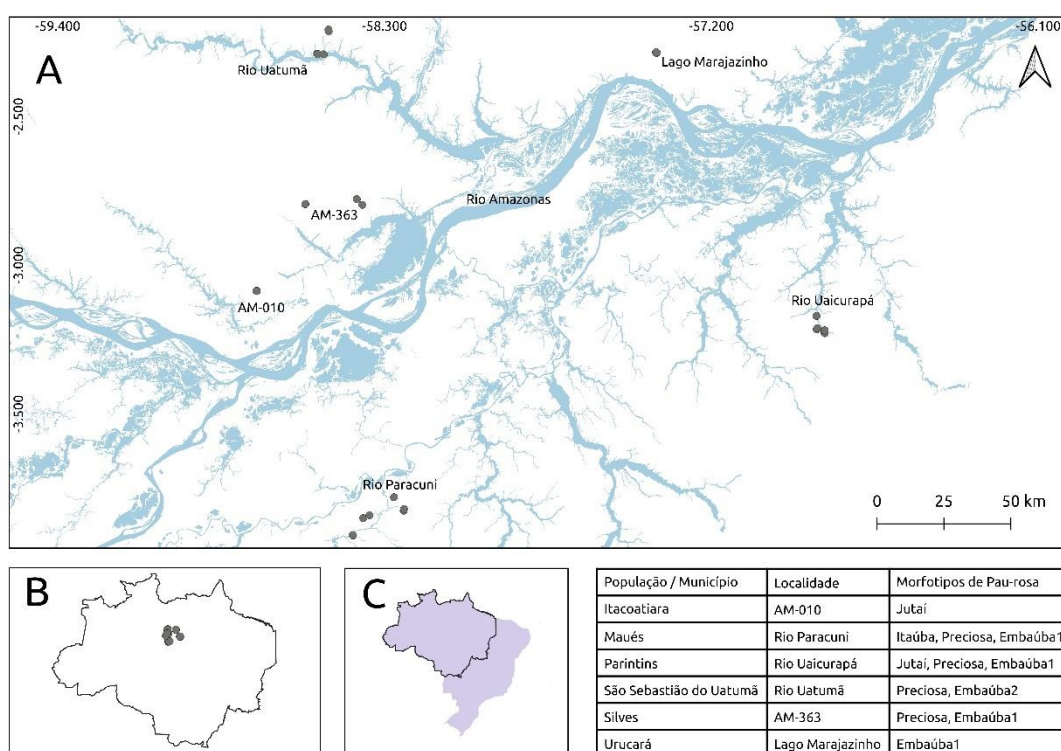


Figura: 1. Área de estudo, considerando as árvores coletadas em cada localidade (A), com a localização da região em relação à Amazônia Legal (B) e o Brasil (C).

De cada árvore, coletamos materiais botânicos para herborização e pequenas amostras de folha, galho e madeira. Para a coleta de madeira, utilizamos trado de incremento (200 mm x 5 mm), retirando amostras de 5 cm após a casca. No momento da coleta, armazenamos separadamente 2 gramas de folha, galho e madeira fresca de cada planta em *vials de headspace* de 20 mL, vedados com tampa de metal e septo de silicone. Posteriormente, armazenamos os *vials* em freezer portátil, a temperatura de -5 °C.

Análise dos compostos orgânicos voláteis

Os VOCs presentes nas amostras de folhas, galhos e madeiras foram analisados pelo método de *headspace* em conjunto com a cromatografia gasosa acoplada a um detector de massas (HS-GC-MS), em um cromatógrafo gasoso, modelo Nexis GC-2030 da Shimadzu, acoplado a um espectrômetro de massas, modelo GCMS-TQ8050 NX da Shimadzu. Foi utilizada uma coluna Shimadzu SH-5Sil MS (30 m x 0.25 mm x 0.25 µm) e Hélio como gás de arraste, com fluxo de coluna de 1.88 mL/min. O aparelho foi equipado com injetor automático em modo split (100:1) com pressão de entrada de 100.0 kPa e velocidade linear constante de 49.1 cm/sec. A temperatura do injetor foi de 250 °C e foi realizada a seguinte programação de temperatura do forno: 30°C por 1 min, com aumento para temperatura de 250 °C em uma taxa de aquecimento de 8°C/min, mantendo-se assim durante 1.5 minutos. A faixa de massa usada para o detector seletivo de massa foi 45–500 m/z no modo scan. Os VOCs foram identificados com a comparação aos respectivos espectros de massa aos das bibliotecas NIST20R, NIST20M1 e NIST20M2. Compostos com similaridade superior a 90% aos dados das bibliotecas e conteúdo relativo superior a 0.1 % foram considerados nas análises estatísticas.

Análises estatísticas

Para a composição do *Graphical abstract*, produzimos um mapa de calor com dendrograma, representando a proporção relativa dos 30 principais compostos identificados nas amostras, considerando os valores médios observados para as diferentes partes da planta em cada morfotipo, utilizando o pacote *heatmap* v 1.0.12 (Kolde 2022).

Avaliamos a diferença nas estruturas de dissimilaridade entre os grupos definidos pelas variáveis morfotipo, população e parte da planta, com uma Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA), com um número elevado de permutações (9999) para testar a hipótese nula de que não há diferença significativa entre os grupos, utilizando o pacote *vegan* v.2.6.4 (Oksanen J et al. 2022). Para testar quais grupos específicos de cada variável eram significativamente diferentes dos outros, usamos o pacote *pairwiseadonis* (Martinez 2017), com correção de Bonferroni.

Realizamos uma Análise de Componentes Principais (PCA) para verificar a variabilidade química volátil entre morfotipos e populações, com objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados produzidos. Com isso, observamos os componentes principais que melhor explicam a variação dos

dados. Para verificar as dissimilaridades entre a composição volátil de folhas, galhos e madeira, utilizamos a Análise de Escalonamento Multidimensional Não-Métrica (NMDS) com a métrica de distância de Aitchison devido à sua adequação para dados composicionais, invariância às transformações lineares e preservação da geometria dos dados. Tanto a PCA quanto a NMDS foram realizadas utilizando o pacote *vegan* v.2.6.4 (Oksanen J et al. 2022). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R v.4.3.0 (Team 2023).

Resultados e Discussão

Variabilidade química entre morfotipos e populações de pau-rosa

Através da análise por HS-CG-MS, identificamos um total de 46 compostos voláteis nas amostras analisadas, abrangendo 21 monoterpenos, 15 sesquiterpenos e 10 compostos minoritários de outras classes (Tabela 1). Observamos diferenças significativas na composição volátil das árvores entre morfotipos (PERMANOVA: $F = 2.654445$, $p < 0.001$, Tabela S1), sendo o morfotipo pau-rosa embaúba2, identificado exclusivamente na população do Uatumã, o único a apresentar diferença significativa na composição volátil em relação aos demais (Tabela S2). Destacamos que produtores do Uatumã afirmam que esse tipo de pau-rosa foi amplamente explorado na região para produção de óleo essencial décadas atrás. Além disso, as árvores consideradas neste estudo foram determinadas como *A. rosiodora* Ducke em Inventário Florestal que embasou um Plano de Manejo Florestal daquela população.

Tabela: 2. Composição relativa média dos compostos orgânicos voláteis em galhos (G), folhas (F) e madeira (M), nos diferentes morfotipos de pau-rosa identificados em seis populações da Amazônia Central.

| Morfotipos de Pau-rosa | Embaúba1 | | | Embaúba2 | | | Itaúba | | | Jutaí | | | Preciosa | | |
|--------------------------|----------|-----|-----|----------|------|------|--------|-----|-----|-------|-----|------|----------|-----|-----|
| | G | F | M | G | F | M | G | F | M | G | F | M | G | F | M |
| Compostos voláteis | | | | | | | | | | | | | | | |
| alpha-Pinene | 12.5 | 6.6 | 5.2 | 13.9 | 18.3 | 12.3 | 2.4 | 2.0 | 2.3 | 9.4 | 4.1 | 10.3 | 5.1 | 5.3 | 3.8 |
| alpha-Fenchene | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| beta-Citronellene | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Camphene | 0.6 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 2.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 1.0 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
| Benzaldehyde | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.2 | 0.8 |
| Bois de rose oxide | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.5 |
| beta-Pinene | 3.8 | 3.9 | 2.5 | 5.6 | 10.2 | 2.7 | 0.8 | 1.0 | 1.3 | 4.2 | 2.4 | 5.1 | 1.6 | 2.7 | 1.8 |
| Hepten-2-one, 6-methyl- | 1.3 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 6.3 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.7 | 0.0 |
| beta-Myrcene | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.0 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 |
| (2R,5R)-2-Methyl-5* | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| 5-Hepten-2-ol, 6-methyl- | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| (2R,5S)-2-Methyl-5* | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| alpha-Phellandrene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.1 | 9.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Carene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| (+)-4-Carene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| p-Cymene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| o-Cymene | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 38.1 | 30.3 | 14.7 | 0.1 | 0.0 | 0.7 | 0.1 | 0.0 | 1.3 | 0.1 | 0.1 | 0.5 |
| D-Limonene | 4.3 | 1.4 | 2.7 | 8.5 | 1.1 | 9.1 | 1.7 | 0.7 | 3.7 | 1.2 | 0.7 | 2.8 | 5.0 | 1.3 | 4.0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Eucalyptol | 0.6 | 0.2 | 3.8 | 9.9 | 0.9 | 53.7 | 0.1 | 0.0 | 10.1 | 0.3 | 0.1 | 10.4 | 0.2 | 0.1 | 4.2 |
| trans-beta-Ocimene | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.2 |
| cis-beta-Ocimene | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.2 |
| cis-Linalool oxide* | 3.3 | 4.0 | 2.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.2 | 3.1 | 1.1 | 1.9 | 2.8 | 1.0 | 1.7 | 2.5 | 2.0 |
| trans-Linalool oxide* | 6.3 | 9.4 | 2.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 | 9.6 | 0.9 | 3.1 | 9.5 | 0.5 | 2.5 | 9.7 | 1.3 |
| gamma-Terpinene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| Linalool | 57.5 | 64.3 | 68.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 84.7 | 79.9 | 69.2 | 68.6 | 77.8 | 58.7 | 76.5 | 72.2 | 71.4 |
| 2H-Pyran-3(4H)-one* | 1.1 | 2.5 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.9 | 0.0 | 0.1 | 1.3 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 0.0 |
| trans-Linalool oxide* | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.8 | 0.0 | 0.1 | 0.6 | 0.0 | 0.2 | 0.5 | 0.0 |
| Terpinen-4-ol | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| alpha-Terpineol | 0.1 | 0.0 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 2.2 | 0.1 | 0.0 | 0.3 | 0.1 | 0.0 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.4 |
| alpha-Cubebene | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 0.5 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 |
| Cyclosativene | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.5 |
| Copaene | 2.4 | 1.8 | 3.5 | 0.3 | 3.5 | 5.2 | 1.6 | 0.4 | 5.3 | 1.1 | 0.0 | 1.5 | 2.6 | 1.4 | 4.1 |
| delta-Elemene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| cis-beta-Elemene | 0.5 | 0.1 | 0.4 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.4 | 0.2 | 0.0 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.5 |
| alpha-Gurjunene | 0.6 | 0.0 | 0.4 | 1.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.1 |
| Caryophyllene | 0.7 | 0.9 | 0.3 | 2.6 | 12.5 | 0.0 | 0.5 | 0.2 | 0.0 | 0.7 | 0.1 | 0.0 | 0.6 | 0.3 | 0.0 |
| alpha-Guaiene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| Humulene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Alloaromadendrene | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4a,8-Dimethyl-2* | 0.1 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.7 | 0.1 | 0.1 | 0.4 |
| beta-Copaene | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| beta-Selinene | 0.6 | 0.7 | 1.4 | 1.6 | 5.4 | 0.0 | 0.5 | 0.4 | 0.9 | 0.4 | 0.2 | 2.0 | 0.5 | 0.5 | 1.4 |
| alpha-Selinene | 0.6 | 0.7 | 1.2 | 1.1 | 2.3 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 1.7 | 0.5 | 0.4 | 1.0 |
| gamma-Cadinene | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| beta-Cadinene | 0.2 | 0.0 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Benzyl Benzoate | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

O reconhecimento de morfotipos de pau-rosa é reportado em algumas publicações sobre a espécie (Coppen 1995, May and Barata 2004), mas trabalhos desenvolvidos com objetivo de elucidar as variações morfológicas, moleculares ou químicas dessas plantas são escassos na literatura científica. Uma exceção corresponde à pesquisa de Maia *et al.* (Maia et al. 2007), em que os autores avaliaram diferenças na composição volátil do OE de madeira e de folhas entre os morfotipos identificados como pau-rosa “preciosa”, “tachi”, “itaúba” e “imbaúba”, coletados na região do Rio Jatapu, na Amazônia Central. Estes pesquisadores observaram variações no rendimento da extração de OE, além de pequenas discrepâncias em relação ao teor de linalol, que variou em até 4% entre os

morfotipos. No entanto, os autores reportaram que o perfil volátil foi bastante similar entre as diferentes amostras, tanto para os OEs obtidos da madeira quanto das folhas.

Além das variações químicas entre morfotipos, nesta pesquisa também observamos diferenças significativas na composição volátil entre populações (PERMANOVA: $F = 4.310462$, $p < 0.001$, Tabela S1). Considerando a localização geográfica, verificamos que a população de árvores do Uatumã diferenciou-se de todas demais, e a população de Silves também apresentou distinções significativas em relação às populações de Maués e Itacoatiara (Tabela S3). Esses resultados indicam uma interação complexa entre as variáveis consideradas neste estudo, o que pode estar relacionada à má delimitação entre as plantas reconhecidas e exploradas como pau-rosa nos diferentes locais estudados, ou a variações intraespecíficas determinadas por outros fatores.

Diferenças na composição volátil entre diferentes populações naturais ou cultivadas de pau-rosa foram reportadas em outras pesquisas com óleo essencial (OE) dessa planta. Krainovic *et al.* (Krainovic et al. 2018a) observaram uma clara distinção entre árvores de dois cultivos comerciais, localizados nas regiões central e sul da Amazônia brasileira, ao avaliar a presença e ausência de compostos voláteis de OEs extraídos de folhas, galhos e madeira. Estes autores destacaram a ausência de eucalyptol em galhos e folhas das árvores de uma das populações, mas atribuíram esta distinção à idade relativa do material vegetal, e não a fatores edáficos ou climáticos da região.

Em outra pesquisa, Amazonas *et al.* (Amazonas et al. 2020) verificaram diferenças significativas no perfil de compostos voláteis de OE de folhas e galhos entre duas populações naturais de pau-rosa da Amazônia brasileira, localizadas em Unidades de Conservação do Rio Tapajós. As principais distinções observadas por estes pesquisadores, corresponderam a maior composição relativa de alpha-Phellandrene (22.8%) e menor de linalool (39.6%) em uma das populações, enquanto os OEs da segunda apresentaram composição majoritária de linalool (83.7%) (Amazonas et al. 2020). Nós também observamos proporções relativamente altas de alpha-Phellandrene nas folhas (14.1%) e galhos (9.4%) do morfotipo embaúba2 (Tabela 1). Maiores proporções desse composto, que possui odor de terebintina (Hu et al. 2019), também foram observadas em óleo essencial extraído de *A. parviflora*, tanto de alpha-Phellandrene (7.98%), quanto beta-Phellandrene (15.12%) (Mattoso et al. 2022).

Em cultivos da Guiana Francesa, Chantraine *et al.* (Chantraine et al. 2009) correlacionaram variações na produção de óleo essencial com vários parâmetros, como idade da árvore, estação do ano, estado fenológico e origem geográfica. Como conclusões principais, os autores destacaram que uma das populações apresentou distinções mais evidentes às demais, relacionadas ao menor

rendimento de OE, menor teor de linalol e presença de alpha-terpineol (18.8%), nerol (1.7%) e geraniol (6.4%) nesta população (Chantraine et al. 2009). Além disso, Chantraine *et al.* (Chantraine et al. 2009) verificaram uniformidade na distribuição dos enantiômeros de linalool nas diferentes localidades, tendência também observada para OEs de folhas e galhos de pau-rosa em populações naturais da Amazônia Central (Lara et al. 2018).

Os padrões que verificamos nesta pesquisa, relacionados às variações dos compostos voláteis entre morfotipos e populações, foram corroborados com os resultados da Análise dos Componentes Principais (Figura 2). Com a análise gráfica, observamos claramente a distinção de pau-rosa embaúba2 do Uatumã em relação às demais, enquanto algumas árvores de pau-rosa embaúba1, principalmente da população de Silves, também apresentam maior dissimilaridade em relação ao restante. Por outro lado, observamos uma tendência de agrupamento entre a maior parte das amostras analisadas. Esse padrão reforça nossa percepção de que o aroma, resultante da combinação entre os compostos orgânicos voláteis, corresponde ao critério principal utilizados pelos produtores para reconhecer as árvores como pau-rosa.

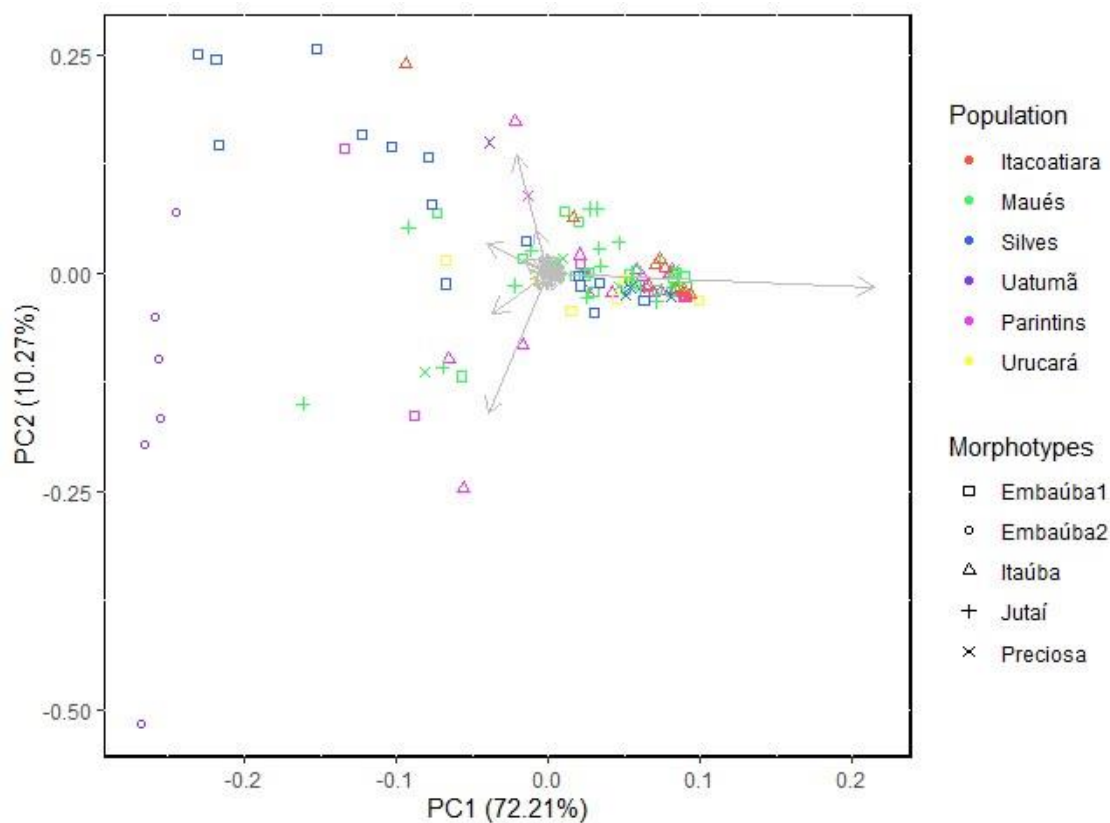


Figura: 2. Análise dos Componentes Principais representando as dissimilaridades na composição volátil de folhas, galhos e madeira de cinco morfotipos de pau-rosa, distribuídos em seis populações da Amazônia Central.

Os dois primeiros eixos principais da PCA explicaram 82.47% da variação total nos dados. O Componente Principal 1 (PC1) representou 72.2%, enquanto o Componente Principal 2 (PC2) representou 10.27% da variação (Tabela S4). Os principais compostos voláteis que contribuíram para o PC1 foram o linalol (49.47%), o alpha-pinene (9.39%), o eucalyptol (9.18%) e o o-cymene (8.52%), enquanto para o PC2 foram o eucalyptol (28.48%), o trans-linalool oxide (furanoid) (23.93%), o cis-linalool oxide (furanoid) (8.68%) e o o-cymene (8.26%) (Tabela S5).

O linalol (3,7-dimetil-1,6-octadien-3-ol) foi o composto majoritário em todas as amostras analisadas, exceto as do morfotipo embaúba2 (Tabela 1). Observamos maiores proporções desse composto nas amostras dos morfotipos itaúba (entre 69.2% e 84.7%) e preciosa (de 71.4% a 76.5%), o que sugere que esses quimiotipos são mais interessantes para a produção de óleo essencial. O linalol é um monoterpene alcoólico terciário de cadeia aberta, com propriedades quirais, utilizado principalmente na formulação de perfumes e cosméticos (Raguso and Pichersky 1999, Sugawara 2000, Letizia et al. 2003, Aprotosoai et al. 2014, Mączka et al. 2022). Sua presença é frequentemente relatada em estudos com óleos essenciais de pau-rosa obtidos de diferentes partes da planta (Zellner et al. 2006, Fidelis et al. 2012, Lara et al. 2018, Pastore et al. 2022), e descrita para outras espécies do gênero, como *A. canelilla*, *A. parviflora*, *A. terminalis* (Andrade et al. 2003, Souza et al. 2020, da Trindade et al. 2021).

Outra variação acentuada correspondeu ao monoterpene alpha-Pinene, com maiores concentrações observadas nas amostras de embaúba2 (12.3 a 18.3%), e menores em itaúba (2.0 a 2.4%) (Tabela 1). Esta variabilidade pode afetar o aroma dos óleos essenciais obtidos, pois esse composto possui odor intenso e característico que remete a pinho e terebentina (Vespermann et al. 2017). Apesar de ser um composto de interesse para a indústria de fragrâncias e aromas (Allenspach and Steuer 2021), seria importante investigar como diferentes proporções impactam o *bouquet* esperado para o óleo essencial de pau-rosa.

O eucalyptol também apresentou ampla variação, com maiores proporções na madeira e galho do morfotipo embaúba2 (53.7 e 9.9%, respectivamente), e na madeira de pau-rosa jutaí (10.4%) e itaúba (10.1%). Esse monoterpene tem aplicação na medicina e indústria de cosméticos, com odor descrito como medicinal-canforoso (Clark 2000), e é o principal componente de óleos essenciais extraídos de espécies do gênero *Eucalyptus* (Barton et al. 1989, Iqbal et al. 2011, Shiferaw et al. 2019). Além disso, é amplamente encontrado na natureza (Clark 2000) e está presente em menores

proporções em outras plantas aromáticas de relevância econômica e medicinal, como nos gêneros *Lavandula* (Virgiliou et al. 2021), *Cinnamomum* (Damasceno et al. 2019) e *Aniba* (Fidelis et al. 2012, Souza et al. 2020).

O monoterpeno o-cymene foi o composto majoritário observado no morfotipo embaúba2, diferente dos demais em que foi detectado em proporções inferiores a 1.5%. Sua presença em espécies aromáticas já foi identificada em óleos essenciais de *Eucalyptus camaldulensis* (Rehman et al. 2023) e *Rosmarinus officinalis* L. (Elghobashy et al. 2023), e em menores proporções em *A. rosiodora* (Fidelis et al. 2012) e *Lavandula marei* (Ousaid et al. 2024). Além disso, a ausência dos isômeros cis e trans-Linalool oxide em embaúba2, explicou parte da variação dos dados. Ambos os isômeros apresentam odor refrescante, amadeirado cítrico com nuances de cânfora e limão (Mosciano 2002), e estão relacionados ao processo de oxidação do linalool (Raguso and Pichersky 1999), o que pode explicar o fato de não terem sido detectados nas árvores que não apresentaram esse composto.

Variabilidade química entre as partes da planta

Ao analisar a composição relativa das substâncias voláteis de folhas, galhos e madeira das árvores de pau-rosa, verificamos padrões distintos entre as diferentes partes da árvore (PERMANOVA: $F = 18.4815$, $p < 0.001$, Tabela S1). Com a análise NMDS, observamos que amostras de galhos e madeiras apresentaram menor dissimilaridade em relação às folhas (Figura 3). No entanto, análises específicas indicaram diferenças estatísticas significativas na composição volátil entre todos os grupos (Tabela S5).

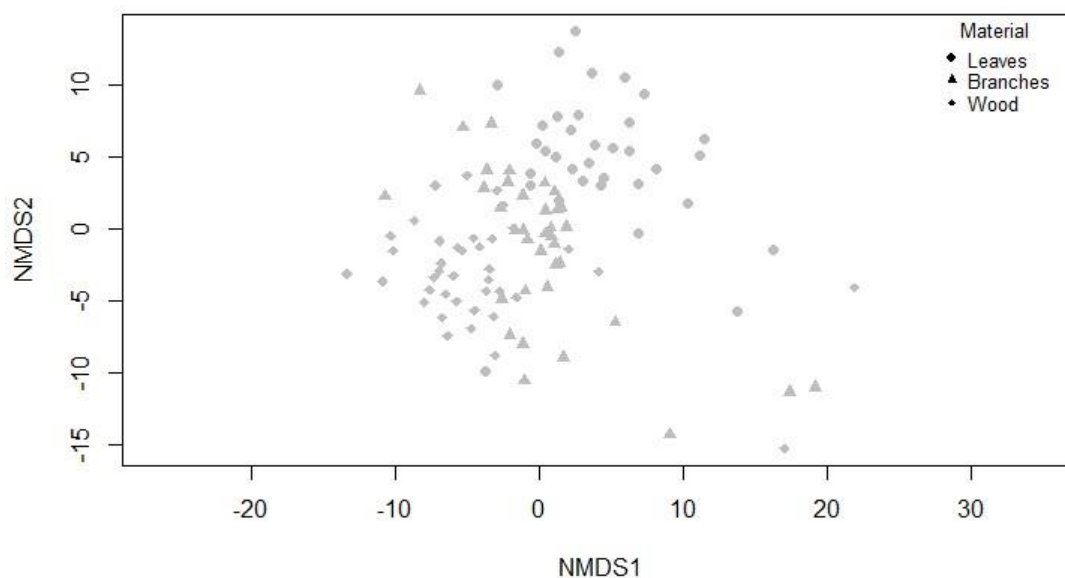


Figura: 3. NMDS representando as dissimilaridades entre os compostos orgânicos voláteis das amostras de galhos, folhas e madeiras das árvores reconhecidas como pau-rosa.

Os resultados que observamos em relação a esta variável corroboram com as tendências observadas em óleos essenciais de pau-rosa por Krainovic *et al.* (Krainovic et al. 2018b), que verificaram menores dissimilaridades entre óleos extraídos de galhos e madeira em comparação àqueles extraídos de folhas. No entanto, estes autores relacionaram essas distinções a uma maior proporção de spathulenol nos óleos de folhas em relação aos demais, composto que não detectamos nas amostras analisadas nessa pesquisa.

As distinções mais evidentes na composição volátil que observamos, correspondem às maiores proporções de óxidos de linalol nas folhas em comparação aos galhos e madeira (Tabela 1). Esses resultados são opostos aos observados por Zellner *et al.* (Zellner et al. 2006), que identificaram maiores proporções de cis e trans-Linalool oxide e menores de linalool em óleos essenciais obtidos da madeira em relação às folhas de pau-rosa. A tendência que identificamos na presente pesquisa pode estar relacionada à alta presença de fungos nas folhas de pau-rosa que observamos na maioria dos materiais coletados, já que a ação desses microrganismos corresponde a um dos principais fatores associados à biotransformação de linalol nos isômeros cis e trans-Linalool oxide (Demyttenaere and Willemen 1998, Raguso and Pichersky 1999).

Por outro lado, observamos maiores proporções dos compostos d-Limonene e copaene em galhos e madeiras, do que nas folhas. d-Limonene corresponde a um dos enantiômeros do

monoterpeno limonene, com odor agradável que remete ao cítrico de laranja e limão, e é uma das fragrâncias mais utilizadas na formulação de cosméticos (Soulimani et al. 2019). Já copaene corresponde a um sesquiterpeno de odor amadeirado e picante (Hu et al. 2019), geralmente é identificado em proporções inferiores a 1.5 % no óleo essencial de pau-rosa (Zellner et al. 2006, Maia et al. 2007, Fidelis et al. 2012), e em média 7.5% em *A. panurensis* (Alcântara et al. 2010). As proporções mais altas que reportamos (1.5 a 5.3 %, Tabela 1) podem estar relacionadas ao fato de analisarmos os voláteis de matérias sólidas e não de óleos essenciais. Isto porque os processos de secagem e destilação parecem afetar a composição relativa desse terpeno, conforme observado para pau-rosa (Lara et al. 2024b) e manjerição (Gurkan and Hayaloglu 2023).

Já em relação ao linalool, não observamos uma tendência uniforme ao comparar a composição relativa entre galhos, folhas e madeira nos diferentes morfotipos de pau-rosa. Os tipos itaúba e preciosa apresentaram maiores médias de linalol nos galhos, seguida das folhas e madeira. Já pau-rosa jutaí, apresentou maior proporção nas folhas e menor na madeira, enquanto em pau-rosa embaúba a tendência foi oposta (Tabela 1). Maia *et al.* (Maia et al. 2007), também observaram discrepâncias nos padrões de linalol de quatro morfotipos de pau-rosa, identificados no trabalho como “tachi”, “itaúba”, “imbaúba” e “preciosa”. Esses autores identificaram maiores proporções de linalool em óleos obtidos de madeira do que de folhas nos tipos tachi e imbaúba, e tendência inversa para os tipos itaúba e preciosa (Maia et al. 2007).

Zellner *et al.* (Zellner et al. 2006), apesar de não terem objetivo de relacionar a composição química às variações morfológicas, observaram maiores proporções de linalool em óleos essenciais de madeira em relação aos óleos das folhas de pau-rosa, diferente dos principais resultados que observamos para a matéria sólida dessas partes da planta (Tabela 1). Considerando essas discrepâncias, evidenciamos a importância de ampliar estudos sobre a composição volátil em pau-rosa, integrando variáveis diversas, como morfológicas, ambientais e genéticas, com objetivo de aumentar a compreensão sobre as interrelações relacionadas às variações químicas.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, identificamos que a variabilidade química em morfotipos e populações de pau-rosa na Amazônia Central resulta de interações complexas entre os fatores observados. A maioria das plantas reconhecidas como pau-rosa por produtores das diferentes regiões possui composição volátil similar, mas há discrepâncias claras entre árvores do

morfotipo embaúba e as demais. Com essas descobertas, ressaltamos a importância de considerar a diversidade morfológica integrada à composição química das árvores matrizes, para a propagação e estabelecimento de cultivos de maior qualidade e produtividade.

Ao investigar a variabilidade química entre as diferentes partes da planta, observamos padrões distintos na composição volátil de folhas, galhos e madeira. Ressaltamos que a maior parte da produção de óleo essencial de pau-rosa no Brasil atualmente, provém da poda das árvores, com a mistura dos galhos e folhas e, eventualmente, da madeira desbastada. Considerando as diferenças na composição volátil entre essas partes, destacamos a importância de novas pesquisas que elucidem o impacto olfativo dessas misturas nos óleos essenciais produzidos. Compreender essas nuances é crucial para aprimorar o conhecimento sobre a biologia, ecologia e silvicultura de pau-rosa, bem como otimizar os métodos de extração e utilização de seu óleo essencial.

Por fim, destacamos a necessidade de estudos futuros que integrem variáveis morfológicas, genéticas, ambientais e químicas para uma compreensão mais abrangente das inter-relações relacionadas à variabilidade química em pau-rosa. Essa abordagem é essencial para orientar estratégias de conservação eficazes, promover o manejo sustentável e explorar plenamente o potencial econômico e medicinal dessa planta, que representa atualmente um dos recursos florestais com maior valor agregado na Amazônia brasileira.

Agradecimentos

Agradecemos às agências financiadoras desta pesquisa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM). Às instituições onde a pesquisa foi desenvolvida: Central de Análises Químicas da Universidade Estadual do Amazonas (UEA) e Laboratório de Silvicultura e Tecnologias Digitais (LASTED) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), e ao Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais (CFT) do INPA. Às instituições que prestaram apoio para o desenvolvimento do trabalho de campo: Núcleo de Gestão Integrada do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – Maués (NGI ICMBio-Maués) (no Rio Paracuni, em Maués), e Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia (IDESAM) (no Rio Uatumã, em São Sebastião do Uatumã), e todos os produtores que nos acompanharam durante as coletas em cada região.

Referências bibliográficas

- Alcântara, J.M.; De Lima Yamaguchi, K.K.; Da Veiga, V.F.; Lima, E.S. 2010. Composição química de óleos essenciais de espécies de Aniba e Licaria e suas atividades antioxidante e antiagregante plaquetária. *Quimica Nova* 33: 141–145.
- Allenspach, M.; Steuer, C. 2021. α -Pinene: A never-ending story. *Phytochemistry* 190: 112857.
- Amazonas, D.R.; Oliveira, C.; Barata, L.E.S.; Tepe, E.J.; Kato, M.J.; Mourão, R.H.V.; et al. 2020. Chemical and Genotypic Variations in Aniba rosiodora from the Brazilian Amazon Forest. *Molecules (Basel, Switzerland)* 26: 1–13.
- Andrade, E.H.A.; Zoghbi, M.D.G.B.; Maia, J.G.S. 2003. Volatiles from aniba terminalis Ducke. *Journal of Essential Oil Research* 15: 81–82.
- Aprotosoiaie, A.C.; Hăncianu, M.; Costache, I.I.; Miron, A. 2014. Linalool: A review on a key odorant molecule with valuable biological properties. *Flavour and Fragrance Journal* 29: 193–219.
- de Area Leão Pereira, E.J.; de Santana Ribeiro, L.C.; da Silva Freitas, L.F.; de Barros Pereira, H.B. 2020. Brazilian policy and agribusiness damage the Amazon rainforest. *Land Use Policy* 92: 104491.
- de Area Leão Pereira, E.J.; Silveira Ferreira, P.J.; de Santana Ribeiro, L.C.; Sabadini Carvalho, T.; de Barros Pereira, H.B. 2019. Policy in Brazil (2016–2019) threaten conservation of the Amazon rainforest. *Environmental Science and Policy* 100: 8–12.
- Barata, L.E.S. 2007. Pesquisa & Desenvolvimento do óleo essencial das folhas de pau-rosa. Prêmio Samuel Benchimol de Tecnologia, MDIC, MCT, Banco da Amazonia. .
- Barata, L.E.S. 2012. A economia verde: Amazônia. *Ciência e Cultura* 64: 31–35.
- Barata, L.E.S.; Carvalho, R.Q.D. 2008. *Scents of the Amazon : Replacing Rosewood in Perfumery ? Part I *.* Perfumer & Flavorist. (<https://www.perfumerflavorist.com/fragrance/ingredients/news/21870145/scents-of-the-amazon-replacing-rosewood-in-perfumery-part-i>). Accessed on 09 Feb. 2023.
- Barton, A.F.M.; Tjandra, J.; Nicholas, P.G. 1989. Chemical Evaluation of Volatile Oils in Eucalyptus Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 37: 1253–1257.
- Bastos Lima, M.G. 2021. Corporate power in the bioeconomy transition: The policies and politics of conservative ecological modernization in Brazil. *Sustainability (Switzerland)* 13: 1–20.
- BRASIL. 1992. Portaria No 37, de 03 de abril de 1992, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). .

- BRASIL. 2014. Portaria No 443, de 17 de dezembro de 2014, do Ministério de Estado do Meio Ambiente (MMA). : 9–10.
- Bugge, M.M.; Hansen, T.; Klitkou, A. 2016. What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability (Switzerland)* 8.
- Chantraine, J.M.; Dhénin, J.M.; Moretti, C. 2009. Chemical variability of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in French Guiana. *Journal of Essential Oil Research* 21: 486–495.
- CITES. 2010. *Fifteenth meeting of the Conference of the Parties*. (<https://cites.org/eng/cop/15/ins/index.php>). Accessed on 08 Aug. 2023.
- Clark, G. 2000. *Eucalyptol*. 25.
- Coppen, J.J.W. 1995. *Flavour and fragrances of plant origin*. 7–13p.
- Damasceno, C.S.B.; Fabri Higaki, N.T.; Dias, J.D.F.G.; Miguel, M.D.; Miguel, O.G. 2019. Chemical Composition and Biological Activities of Essential Oils in the Family Lauraceae: A Systematic Review of the Literature. *Planta Medica* 85: 1054–1072.
- Demyttenaere, J.C.R.; Willemsen, H.M. 1998. Biotransformation of linalool to furanoid and pyranoid linalool oxides by *Aspergillus niger*. *Phytochemistry* 47: 1029–1036.
- Duchesne, L.C.; Wetzel, S. 2003. The bioeconomy and the forestry sector: Changing markets and new opportunities. *Forestry Chronicle* 79: 860–864.
- Elghobashy, R.M.; El-Darier, S.M.; Atia, A.M.; Zakaria, M. 2023. Allelopathic Potential of Aqueous Extracts and Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. and *Thymus vulgaris* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 24: 700–715.
- Ellwanger, J.H.; Nobre, C.A.; Chies, J.A.B. 2023. Brazilian Biodiversity as a Source of Power and Sustainable Development: A Neglected Opportunity. *Sustainability (Switzerland)* 15: 1–16.
- Fearnside, P.M. 1999. Biodiversity as an environmental service in Brazil's Amazonian forests: Risks, value and conservation. *Environmental Conservation* 26: 305–321.
- Fearnside, P.M. 2021. The intrinsic value of Amazon biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 30: 1199–1202.
- Ferraz, J.B.; Barata, L.E.; Sampaio, P. de T.; Guimarães, G. 2009. Perfumes da floresta Amazônica: em busca de uma alternativa sustentável. *Ciência e Cultura* 61: 40–43.
- Fidelis, C.H.V.; Augusto, F.; Sampaio, P.T.B.; Krainovic, P.M.; Barata, L.E.S. 2012. Chemical characterization of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) leaf essential oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with quadrupole mass spectrometry. *Journal of*

Essential Oil Research 24: 245–251.

- Garrett, R.D.; Cammelli, F.; Ferreira, J.; Levy, S.A.; Valentim, J.; Vieira, I. 2021. Forests and Sustainable Development in the Brazilian Amazon: History, Trends, and Future Prospects. *Annual Review of Environment and Resources* 46: 625–652.
- Gatti, L. V.; Basso, L.S.; Miller, J.B.; Gloor, M.; Gatti Domingues, L.; Cassol, H.L.G.; et al. 2021. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595: 388–393.
- Gottlieb, O.R.; Kubitzki, K. 1981a. Chemosystematics of Aniba. *Biochemical Systematics and Ecology* 9: 5–12.
- Gottlieb, O.R.; Kubitzki, K. 1981b. Chemogeography of Aniba (Lauraceae). *Plant Systematics and Evolution* 137: 281–289.
- Gurkan, H.; Hayaloglu, A.A. 2023. Changes in volatiles and essential oil composition of three organs (leaf, stem and flower) of purple basil (*Ocimum basilicum* L.) by GC–MS combined with multivariate statistical approach. *Food Chemistry Advances* 2: 100292.
- Hu, D.; Guo, J.; Li, T.; Zhao, M.; Zou, T.; Song, H.; et al. 2019. Comparison and identification of the aroma-active compounds in the root of angelica dahurica. *Molecules* 24.
- Iqbal, Z.; Akhtar, M.; Qureshi, T.M.; Akhter, J.; Ahmad, R. 2011. Variation in composition and yield of foliage oil of eucalyptus polybractea. *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 33: 183–187.
- ITC. 2023. *List of exporters for the selected product in 2022, ITC Trade Map*. (https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7C%7C%7C%7C%7C3301%7C%7C%7C4%7C1%7C1%7C2%7C1%7C%7C2%7C1%7C%7C1). Accessed on 09 Aug. 2023.
- Kolde, R. 2022. Package “pheatmap”: Pretty heatmaps. *R package*: 1–8.
- Krainovic, P.; Almeida, D.; Desconci, D.; Veiga-Júnior, V.; Sampaio, P. 2017. Sequential management of commercial rosewood (*Aniba rosaeodora* ducke) plantations in central Amazonia: Seeking sustainable models for Essential oil production. *Forests* 8.
- Krainovic, P.M.; Almeida, D.R.A. de; Veiga Junior, V.F. da; Sampaio, P. de T.B. 2018a. Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management* 429: 143–157.
- Krainovic, P.M.; Almeida, D.R.A. de; Veiga Junior, V.F. da; Sampaio, P. de T.B. 2018b. Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management* 429: 143–157.

- Kubitzki, K.; Renner, S. 1982. Lauraceae I (Aniba and Aiouea). In: *Flora Neotropica*, Vol. 31, p.1–124.
- Lara, C.S.; Costa, C.R.; Sampaio, P.T.B. 2021. O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba* spp.) no Estado do Amazonas. *Revista de Economia e Sociologia Rural* 59: 1–8.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Sampaio, P. de T.B.; Eberlin, M.N.; Fidelis, C.H. de V. 2018. Linalool enantiomeric distribution in rosewood-reminiscent populations in Central Amazon. *Journal of Essential Oil Research* 30: 464–469.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Minhós, L.M.; Lima Junior, M. de J.V.; Santos, P.V.; Vianna, A.L.M.; et al. 2024a. The rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) value chain in the Brazilian Amazon. *Economic Botany* no prelo.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Junior, S.D.; Ritter, C.D.; Falcão, L. de S.; Ruiz, G.C.M.; et al. 2024b. Rapid analysis of variations in the volatile organic composition of rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) from plantations in the Amazon. *No prelo*.
- Letizia, C.S.; Cocchiara, J.; Lalko, J.; Api, A.M. 2003. Fragrance material review on linalool. *Food and Chemical Toxicology* 41: 943–964.
- Mączka, W.; Duda-Madej, A.; Grabarczyk, M.; Wińska, K. 2022. Natural Compounds in the Battle against Microorganisms—Linalool. *Molecules* 27.
- Maia, J.G.S.; Andrade, E.H.A.; Couto, H.A.R.; Carla, A.; Silva, M.; Marx, F.; et al. 2007. Plant Sources of Amazon Rosewood Oil. *Química Nova* 30: 1906–1910.
- Maia, O.G.S.; Andrade, L.H.A. 2009. Database of the amazon aromatic plants and their essential oils. *Química Nova* 32: 595–622.
- Markets and Markets. 2023. *Essential Oils Market Global Forecast to 2027*. (<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/essential-oil-market-119674487.html>). Accessed on 09 Jan. 2023.
- Martinez, A.P. 2017. *_pairwiseAdonis: Pairwise Multilevel Comparison using Adonis_*. R package version 0.4.1. .
- Matta Barbosa, A.S. da. 2015. *Testando delimitação de espécies em monografias – um estudo de caso em Aniba Aubl. (Lauraceae)*. 100p.
- Mattoso, E.; Dos Anjos, C.S.; Barata, L.; Marsaioli, A.J. 2022. Two Woody Scented Oils from the Amazonian Forest. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 33: 191–195.
- May, P.H.; Barata, L.E.S. 2004. Rosewood Exploitation in the Brazilian Amazon: Options for Sustainable Production. *Economic Botany* 58: 257–265.

- MDIC. 2023. *Exportação e Importação Geral: óleos essenciais. Portal ComexStat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*. (<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/92245>). Accessed on 09 Aug. 2023.
- Mors, W.B.; Gottlieb, O.R. 1959. Phylogeny of the Genus *Aniba* Aubl.-A Comparative Morphological and Chemical Observation. *Nature* 1959: 1589.
- Mosciano, G. 2002. Organoleptic Characteristics of Flavor Materials. *Perfumer & Flavorist* 27: 67–69.
- Ohashi, S.T.; Santana, L.S.R.; Green, C.L. 1997. Brazilian Rosewood Oil: Sustainable Production and Oil Quality Management. *Perfumer & Flavorist* 8: 16–20.
- Oksanen J; G, S.; F, B.; R, K.; P, L.; P, M.; et al. 2022. *vegan: Community Ecology Package*. .
- Ousaid, F.E.; Guenaou, I.; Nait, I.; Ridaoui, K.; Zouheir, Y.; Hmimid, F.; et al. 2024. *Lavandula mairei* essential oil. *Scientific African* 23: e02062.
- Pastore, T.C.M.; Braga, L.R.; Daniele, D.C.G.; Soares, L.F.; Pastore, F.; Alessandro, A.C.; et al. 2022. A green and direct method for authentication of rosewood essential oil by handheld near infrared spectrometer and one-class classification modeling. *Microchemical Journal* 182: 107916.
- Peres, C.A.; Campos-Silva, J.; Ritter, C.D. 2023. Environmental policy at a critical junction in the Brazilian Amazon. *Trends in Ecology and Evolution* 38: 113–116.
- Pimentel, R.B.Q.; Souza, D.P.; Albuquerque, P.M.; Fernandes, A. V.; Santos, A.S.; Duvoisin, S.; et al. 2018. Variability and antifungal activity of volatile compounds from *Aniba rosaeodora* Ducke, harvested from Central Amazonia in two different seasons. *Industrial Crops and Products* 123: 1–9.
- Raguso, R.A.; Pichersky, E. 1999. A day in the life of a linalool molecule: Chemical communication in a plant-pollinator system. Part 1 : Linalool biosynthesis in flowering plants. *Plant Species Biology* 14: 95–120.
- Rehman, R.; Ahmad, W.; Muzaffar, R.; Bano, A.; Sajid, I.; Ahsan, A.U.; et al. 2023. Insect repellent and insecticidal potential of two *Eucalyptus* species essential oils from subtropical desert climate. *Chemical Papers* 78: 2369–2384.
- Rodrigues, M. 2023. Marina Silva Amazon protector. *Nature* 624: 2023.
- Sampaio, L.D.F.S.; Maia, J.G.S.; De Parijós, A.M.; De Souza, R.Z.; Barata, L.E.S. 2012. Linalool from rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) oil inhibits adenylylase cyclase in the retina, contributing to understanding its biological activity. *Phytotherapy Research* 26: 73–77.

- Sampaio, P. de T.B.; Barbosa, A.P.; Vieira, G.; Spironello, W.R.; Bruno, F.M.S. 2005. Biomassa da rebrota de copas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) em plantios sob sombra parcial em floresta primária. *Acta Amazonica* 35: 491–494.
- Shiferaw, Y.; Kassahun, A.; Tedla, A.; Feleke, G.; Abebe, A.A. 2019. Investigation of Essential Oil Composition Variation with Age of *Eucalyptus globulus* Growing in Ethiopia. *Natural Products Chemistry & Research* 07: 1–5.
- Soulimani, R.; ... J.B.-A.J. of; 2019, U. 2019. Limonene: natural monoterpene volatile compounds of potential therapeutic interest. *Essence journal* 7: 1–10.
- Souza, D.P.; Pimentel, R.B.Q.; Santos, A.S.; Albuquerque, P.M.; Fernandes, A. V.; Junior, S.D.; et al. 2020. Fungicidal properties and insights on the mechanisms of the action of volatile oils from Amazonian Aniba trees. *Industrial Crops and Products* 143: 111914.
- Souza, R.C.Z.; Eiras, M.M.; Cabral, E.C.; Barata, L.E.S.; Eberlin, M.N.; Catharino, R.R. 2011. The famous Amazonian rosewood essential oil: Characterization and adulteration monitoring by electrospray ionization mass spectrometry fingerprinting. *Analytical Letters* 44: 2417–2422.
- ter Steege, H.; Pitman, N.C.A.; Killeen, T.J.; Laurance, W.F.; Peres, C.A.; Guevara, J.E.; et al. 2015. Estimating the global conservation status of more than 15,000 Amazonian tree species. *Science Advances* 1: 9–11.
- ter Steege, H.; Prado, P.I.; Lima, R.A.F. d.; Pos, E.; de Souza Coelho, L.; de Andrade Lima Filho, D.; et al. 2020. Biased-corrected richness estimates for the Amazonian tree flora. *Scientific Reports* 10: 1–13.
- Strand, J.; Soares-Filho, B.; Costa, M.H.; Oliveira, U.; Ribeiro, S.C.; Pires, G.F.; et al. 2018. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability* 1: 657–664.
- Sugawara, Y. 2000. Odor Distinctiveness between Enantiomers of Linalool: Difference in Perception and Responses Elicited by Sensory Test and Forehead Surface Potential Wave Measurement. *Chemical Senses* 25: 77–84.
- Team, R.C. 2023. R: A language and environment for statistical computing. .
- da Trindade, R.C.S.; Xavier, J.K.A.M.; Setzer, W.N.; Maia, J.G.S.; da Silva, J.K.R. 2021. Chemical diversity and therapeutic effects of essential oils of aniba species from the amazon: A review. *Plants* 10: 1–46.
- Valli, M.; Russo, H.M.; Bolzani, V. da S. 2018. The potential contribution of the natural products from Brazilian biodiversity to bioeconomy. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* 90: 763–

778.

- Vespermann, K.A.C.; Paulino, B.N.; Barcelos, M.C.S.; Pessôa, M.G.; Pastore, G.M.; Molina, G. 2017. Biotransformation of α - and β -pinene into flavor compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology* 101: 1805–1817.
- Virgiliou, C.; Zisi, C.; Kontogiannopoulos, K.N.; Nakas, A.; Iakovakis, A.; Varsamis, V.; et al. 2021. Headspace gas chromatography-mass spectrometry in the analysis of lavender's essential oil: Optimization by response surface methodology. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences* 1179: 122852.
- Wickham, H.; Averick, M.; Bryan, J.; Chang, W.; McGowan, L.; François, R.; et al. 2019. Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software* 4: 1686.
- Wink, M. 2016. Secondary Metabolites, the Role in Plant Diversification of. *Encyclopedia of Evolutionary Biology* 4: 1–9.
- Xavier, J.K.A.M.; Maia, L.; Figueiredo, P.L.B.; Folador, A.; Ramos, A.R.; Andrade, E.H.; et al. 2021. Essential Oil Composition and DNA Barcode and Identification of Aniba species (Lauraceae) Growing in the Amazon Region. *Molecules (Basel, Switzerland)* 26: 1–19.
- Zellner, B.D.A.; Lo Presti, M.; Barata, L.E.S.; Dugo, P.; Dugo, G.; Mondello, L. 2006. Evaluation of leaf-derived extracts as an environmentally sustainable source of essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry and enantioselective gas chromatography-olfactometry. *Analytical Chemistry* 78: 883–890.

Material Suplementar

Tabela S1. Resultado da PERMANOVA considerando a influência das variáveis Morfotipo, População e Matéria na composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs). Df: Graus de Liberdade (Df), SumOfSqs: Soma dos Quadrados, R2: Coeficiente de Determinação, F value: Estatística F, Pr(>F): Valor p da Estatística. A significância estatística é representada por asteriscos (*).

| Variável | Df | SumOfSqs | R2 | F | Pr(>F) |
|-----------|-----|-----------|-------------|-----------|---------|
| População | 5 | 3091.556 | 0.13088819 | 4.310462 | 0.0001* |
| Morfotipo | 4 | 1523.060 | 0.06448228 | 2.654445 | 0.0001* |
| Matéria | 2 | 4947.665 | 0.20947086 | 17.245942 | 0.0001* |
| Resíduos | 98 | 14057.543 | 0.59515867 | NA | NA |
| Total | 109 | 23619.825 | 1.000000000 | NA | NA |

Tabela S2. Comparação pareada da composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) entre os diferentes grupos de Morfotipos. Df: Graus de Liberdade (Df), SumsOfSqs: Soma dos Quadrados, R2: Coeficiente de Determinação, F.Modelo: Estatística F, p.value: Valor p da Estatística F, p.adjusted: Valor p ajustado pelo método de Bonferroni. Df: Graus de Liberdade (Df), SumOfSqs: Soma dos Quadrados, R2: Coeficiente de Determinação, F value: Estatística F, Pr(>F): Valor p da Estatística. A significância estatística é representada por asteriscos (*).

| Pairs | Df | SumOfSqs | F.Model | R2 | p.value | p.adjusted |
|---------------------|----|-----------|------------|------------|---------|------------|
| embaúba1 x preciosa | 1 | 124.8888 | 0.6050836 | 0.01015154 | 0.841 | 1.00 |
| embaúba1 x itaúba | 1 | 414.3186 | 2.1302901 | 0.02873711 | 0.032 | 0.32 |
| embaúba1 x embaúba2 | 1 | 2005.1099 | 9.3634339 | 0.15773067 | 0.001 | 0.01* |
| embaúba1 x jutaí | 1 | 278.2222 | 1.3329468 | 0.02209318 | 0.168 | 1.00 |
| preciosa x itaúba | 1 | 184.1160 | 1.0618491 | 0.02524495 | 0.374 | 1.00 |
| preciosa x embaúba2 | 1 | 1731.8344 | 8.6297209 | 0.31233471 | 0.001 | 0.01* |
| preciosa x jutaí | 1 | 153.1120 | 0.7908763 | 0.02746969 | 0.584 | 1.00 |
| itaúba x embaúba2 | 1 | 2289.2150 | 12.9915863 | 0.28875591 | 0.001 | 0.01* |
| itaúba x jutaí | 1 | 255.8678 | 1.4476925 | 0.03410533 | 0.153 | 1.00 |
| embaúba2 x jutaí | 1 | 1689.2750 | 8.1249791 | 0.29953863 | 0.001 | 0.01* |

Tabela S3. Comparação pareada da composição relativa dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) entre as diferentes Populações. Df: Graus de Liberdade (Df), SumsOfSqs: Soma dos Quadrados, R2: Coeficiente de Determinação, F.Modelo: Estatística F, p.value: Valor p da Estatística F, p.adjusted: Valor p ajustado pelo método de Bonferroni. Df: Graus de Liberdade (Df), SumOfSqs: Soma dos Quadrados, R2: Coeficiente de Determinação, F value: Estatística F, Pr(>F): Valor p da Estatística. A significância estatística é representada por asteriscos (*).

| Pairs | Df | SumOfSqs | F.Model | R2 | p.value | p.adjusted |
|--------------------------|----|-----------|-----------|------------|---------|------------|
| Parintins vs Uatumã | 1 | 1218.7585 | 5.5589344 | 0.15205406 | 0.001 | 0.015* |
| Parintins vs Maués | 1 | 167.2141 | 0.9440887 | 0.01453695 | 0.439 | 1.000 |
| Parintins vs Uruará | 1 | 424.8904 | 2.1820316 | 0.07229572 | 0.017 | 0.255 |
| Parintins vs Itacoatiara | 1 | 437.8351 | 2.5188378 | 0.07296995 | 0.015 | 0.225 |
| Parintins vs Silves | 1 | 401.7602 | 1.9484442 | 0.04536705 | 0.050 | 0.750 |
| Uatumã vs Maués | 1 | 1374.2240 | 7.0173095 | 0.12527038 | 0.001 | 0.015* |
| Uatumã vs Uruará | 1 | 847.8185 | 2.9687273 | 0.18590882 | 0.012 | 0.180 |
| Uatumã vs Itacoatiara | 1 | 1304.6905 | 5.8020678 | 0.25445358 | 0.001 | 0.015* |
| Uatumã vs Silves | 1 | 864.0290 | 3.3457746 | 0.11401214 | 0.002 | 0.030* |
| Maués vs Uruará | 1 | 497.0523 | 2.7709302 | 0.05681520 | 0.007 | 0.105 |
| Maués vs Itacoatiara | 1 | 368.3019 | 2.2023207 | 0.04218818 | 0.030 | 0.450 |
| Maués vs Silves | 1 | 577.2039 | 3.0262227 | 0.04878941 | 0.003 | 0.045* |
| Uruará vs Itacoatiara | 1 | 346.7358 | 1.9586293 | 0.12273167 | 0.028 | 0.420 |
| Uruará vs Silves | 1 | 371.7029 | 1.5920078 | 0.06473679 | 0.090 | 1.000 |
| Itacoatiara vs Silves | 1 | 657.3311 | 3.2385558 | 0.10710021 | 0.003 | 0.045* |

Tabela S4. Importância dos Componentes Principais na Análise de Componentes Principais (PCA).

| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Desvio padrão | 26.50602 | 9.996241 | 8.131265 | 6.880143 | 4.760673 |
| Proporção da Variância | 0.72205 | 0.1027 | 0.06795 | 0.04865 | 0.02329 |
| Proporção Cumulativa | 0.72205 | 0.82475 | 0.8927 | 0.94135 | 0.96464 |
| | PC6 | PC7 | PC8 | PC9 | PC10 |
| Desvio padrão | 3.432938 | 2.810057 | 1.980709 | 1.749728 | 1.525791 |
| Proporção da Variância | 0.01211 | 0.00812 | 0.00403 | 0.00315 | 0.00239 |
| Proporção Cumulativa | 0.97675 | 0.98487 | 0.9889 | 0.99205 | 0.99444 |
| | PC11 | PC12 | PC13 | PC14 | PC15 |
| Desvio padrão | 1.338946 | 1.156006 | 0.977304 | 0.590844 | 0.469171 |
| Proporção da Variância | 0.00184 | 0.00137 | 0.00098 | 0.00036 | 0.00023 |
| Proporção Cumulativa | 0.99628 | 0.99765 | 0.99864 | 0.99899 | 0.99922 |
| | PC16 | PC17 | PC18 | PC19 | PC20 |
| Desvio padrão | 0.390395 | 0.376539 | 0.311953 | 0.268815 | 0.227983 |
| Proporção da Variância | 0.00016 | 0.00015 | 0.0001 | 0.00007 | 0.00005 |
| Proporção Cumulativa | 0.99938 | 0.99952 | 0.99962 | 0.9997 | 0.99975 |
| | PC21 | PC22 | PC23 | PC24 | PC25 |
| Desvio padrão | 0.213719 | 0.200792 | 0.188951 | 0.168346 | 0.143047 |
| Proporção da Variância | 0.00005 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00003 | 0.00002 |

| | | | | | |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Proporção Cumulativa | 0.9998 | 0.99984 | 0.99988 | 0.9999 | 0.99993 |
| | PC26 | PC27 | PC28 | PC29 | PC30 |
| Desvio padrão | 0.129871 | 0.111656 | 0.100584 | 0.091284 | 0.08078 |
| Proporção da Variância | 0.00002 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 |
| Proporção Cumulativa | 0.99994 | 0.99996 | 0.99997 | 0.99997 | 0.99998 |
| | PC31 | PC32 | PC33 | PC34 | PC35 |
| Desvio padrão | 0.06239 | 0.05545 | 0.051666 | 0.043185 | 0.040588 |
| Proporção da Variância | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Proporção Cumulativa | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 1 |

Tabela S5. Contribuição percentual das variáveis nos 3 primeiros Componentes Principais derivados da Análise de Componentes Principais (PCA).

| Compostos voláteis | PC1 | PC2 | PC3 |
|--|------------|------------|------------|
| alpha-Pinene | 9.3917181 | 5.9679943 | 2.4552197 |
| beta-Citronellene | 0.0223745 | 0.0061281 | 0.014844 |
| alpha-Fenchene | 0.0574333 | 0.0699906 | 0.027185 |
| Camphene | 0.7468869 | 0.5092378 | 0.207065 |
| Benzaldehyde | 0.1272935 | 0.3427082 | 0.0593919 |
| Bois de rose oxide | 0.0715415 | 0.1234821 | 0.0606498 |
| beta-Pinene | 3.7749225 | 2.8129559 | 0.2727752 |
| 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 1.1017777 | 1.9020422 | 0.1077267 |
| beta-Myrcene | 0.1243418 | 0.1198349 | 0.3523167 |
| (2R,5R)-2-Methyl-5-(prop-1-en-2-yl)-2-vinyltetrahydrofuran | 0.0464804 | 0.0444954 | 0.0622093 |
| 5-Hepten-2-ol, 6-methyl- | 0.0253945 | 0.0573331 | 0.0022797 |
| (2R,5S)-2-Methyl-5-(prop-1-en-2-yl)-2-vinyltetrahydrofuran | 0.0447294 | 0.0077642 | 0.1012468 |
| alpha-Phellandrene | 2.2870179 | 2.4293832 | 8.8198039 |
| Carene | 0.0450579 | 0.0291134 | 0.2300617 |
| (+)-4-Carene | 0.0203603 | 0.0607203 | 0.0455467 |
| Benzene, 1-methoxy-4-methyl- | 0.0049107 | 0.0153161 | 0.0015760 |
| p-Cymene | 0.0460666 | 0.0281983 | 0.2281369 |
| o-Cymene | 8.5244716 | 8.2593555 | 28.7285501 |
| D-Limonene | 1.7134069 | 3.3727524 | 2.5355640 |
| Eucalyptol | 9.1834016 | 28.4759710 | 23.5437964 |
| trans beta-Ocymene | 0.0682879 | 0.0628883 | 0.0449662 |
| cis beta-Ocymene | 0.0957559 | 0.0936579 | 0.0468719 |
| cis-Linalool oxide (furanoid) | 1.8691090 | 8.6820129 | 5.1847343 |
| trans-Linalool oxide (furanoid) | 4.8395641 | 23.9291135 | 15.3865783 |
| gamma-Terpinene | 0.0683387 | 0.1924726 | 0.1669809 |
| Linalool | 49.4738593 | 2.8230303 | 0.0519792 |
| 2H-Pyran-3(4H)-one, 6-ethenyldihydro-2,2,6-trimethyl- | 0.8630083 | 3.6345280 | 2.1490867 |
| Benzene, 1-ethyl-4-methoxy- | 0.0119866 | 0.0394092 | 0.0192023 |

| | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| trans Linalool oxide (pyranoid) | 0.3458919 | 1.5203597 | 0.9714183 |
| Terpinen-4-ol | 0.0361417 | 0.0888806 | 0.0864208 |
| alpha-Terpineol | 0.2753144 | 1.1898887 | 1.1248435 |
| alpha-Cubebene | 0.2089521 | 0.2652421 | 0.3053399 |
| Cyclosativene | 0.0095698 | 0.3048054 | 0.1088195 |
| Copaene | 1.1023249 | 1.1716570 | 0.7185242 |
| delta-Elemene | 0.0190852 | 0.0111723 | 0.0142871 |
| cis beta-Elemene | 0.0925903 | 0.1375119 | 0.0068133 |
| alpha-Gurjunene | 0.2493966 | 0.031004 | 0.3704979 |
| Caryophyllene | 1.5963281 | 0.311338 | 4.5378487 |
| alpha-Guaiene | 0.0043275 | 0.0047407 | 0.0068638 |
| Humulene | 0.0918720 | 0.0165579 | 0.2169000 |
| Alloaromadendrene | 0.0145416 | 0.0195619 | 0.0456748 |
| 4a,8-Dimethyl-2-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydronaphthalene | 0.0114958 | 0.2739771 | 0.1371592 |
| beta-Copaene | 0.0837888 | 0.0490493 | 0.0627238 |
| beta-Selinene | 0.7128546 | 0.2561901 | 0.3069392 |
| alpha-Selinene | 0.4242786 | 0.2114826 | 0.0366283 |
| gamma-Cadinene | 0.0111760 | 0.0040900 | 0.0094392 |
| beta-Cadinene | 0.0578435 | 0.0190769 | 0.0128973 |
| Benzyl Benzoate | 0.0027289 | 0.0215235 | 0.0136151 |

Síntese

A cadeia de valor de pau-rosa representa um sistema complexo, dinâmico e multifatorial. Para viabilizar um desenvolvimento mais efetivo, precisamos superar diversas lacunas, desde a produção de conhecimentos técnicos para otimizar a produção até questões socioeconômicas, para consolidar novos arranjos produtivos baseados na sustentabilidade e no comércio justo.

Com o trabalho do Capítulo 1, observamos o potencial da produção de sementes e mudas como fonte de renda a produtores que possuem árvores matrizes, e identificamos desafios práticos que devem ser superados para viabilizar seu cultivo e comercialização sustentáveis. Destacamos a necessidade de implementação de Áreas de Coleta de Sementes para facilitar a produção de mudas, juntamente com o desenvolvimento de estratégias para envolver diferentes setores na regularização dos produtores. Além disso, sugerimos a criação de novos modelos de negócio e promoção de arranjos produtivos entre os produtores para fortalecer o setor e ampliar o acesso às mudas para os interessados.

No Capítulo 2, aprofundamos a análise das questões regulatórias e do mercado internacional de óleo de pau-rosa, revelando um cenário complexo marcado por décadas de exploração predatória e regulações restritivas. Destacamos a necessidade de diversificar os mercados para além do uso tradicional do óleo de pau-rosa como estratégia crucial para revitalizar o setor. No entanto, os desafios no processo de licenciamento ambiental e a dificuldade enfrentada pelos pequenos produtores em obter permissões para a exploração sustentável destacam a necessidade urgente de reformas políticas e regulatórias para apoiar a transição para práticas mais sustentáveis.

No Capítulo 3, validamos a técnica HS-GC-MS para análise de compostos voláteis, representando um avanço significativo no conhecimento científico sobre a química de pau-rosa. Destacamos a capacidade dessa metodologia para analisar pequenas amostras de folhas e galhos frescos, simplificando os processos de coleta e análise, permitindo uma compreensão mais abrangente da composição química da espécie. Além disso, identificamos o impacto da idade das plantas na produção de compostos voláteis, especialmente aqueles que influenciam o aroma do óleo, ressaltando a importância de considerar fatores silviculturais na gestão sustentável dos cultivos.

Por fim, no Capítulo 4, analisamos a composição volátil de árvores de diferentes populações e morfotipos, e observamos distinções no perfil químico ao considerar esses fatores. Destacamos também a distinção na composição volátil entre diferentes partes da planta, como folhas, galhos e

madeira, ressaltando a complexidade da química do pau-rosa e sugerindo a necessidade de mais pesquisas para entender o impacto olfativo dessas variações na qualidade do óleo essencial extraído.

No contexto geral, com os resultados e conclusões desta tese, destacamos a complexidade e a importância de abordagens integradas que considerem tanto os aspectos econômicos quanto ambientais. Destacamos a importância da integração de variáveis morfológicas, genéticas, ambientais e químicas em estudos futuros, como uma abordagem essencial para promover estratégias de conservação eficazes e explorar plenamente o potencial econômico e medicinal de pau-rosa na Amazônia brasileira.

Referências bibliográficas

- Alcântara, J.M.; De Lima Yamaguchi, K.K.; Da Veiga, V.F.; Lima, E.S. 2010. Composição química de óleos essenciais de espécies de Aniba e Licaria e suas atividades antioxidante e antiagregante plaquetária. *Quimica Nova* 33: 141–145.
- Allenspach, M.; Steuer, C. 2021. α -Pinene: A never-ending story. *Phytochemistry* 190: 112857.
- Amazonas, D.R.; Oliveira, C.; Barata, L.E.S.; Tepe, E.J.; Kato, M.J.; Mourão, R.H.V.; et al. 2020. Chemical and Genotypic Variations in Aniba rosiodora from the Brazilian Amazon Forest. *Molecules (Basel, Switzerland)* 26: 1–13.
- Andrade, E.H.A.; Zoghbi, M.D.G.B.; Maia, J.G.S. 2003. Volatiles from aniba terminalis Ducke. *Journal of Essential Oil Research* 15: 81–82.
- Aprotosoiaie, A.C.; Hăncianu, M.; Costache, I.I.; Miron, A. 2014. Linalool: A review on a key odorant molecule with valuable biological properties. *Flavour and Fragrance Journal* 29: 193–219.
- de Area Leão Pereira, E.J.; de Santana Ribeiro, L.C.; da Silva Freitas, L.F.; de Barros Pereira, H.B. 2020. Brazilian policy and agribusiness damage the Amazon rainforest. *Land Use Policy* 92: 104491.
- de Area Leão Pereira, E.J.; Silveira Ferreira, P.J.; de Santana Ribeiro, L.C.; Sabadini Carvalho, T.; de Barros Pereira, H.B. 2019. Policy in Brazil (2016–2019) threaten conservation of the Amazon rainforest. *Environmental Science and Policy* 100: 8–12.
- Barata, L.E.S. 2007. Pesquisa & Desenvolvimento do óleo essencial das folhas de pau-rosa. Prêmio Samuel Benchimol de Tecnologia, MDIC, MCT, Banco da Amazonia. .
- Barata, L.E.S. 2012. A economia verde: Amazônia. *Ciência e Cultura* 64: 31–35.
- Barata, L.E.S.; Carvalho, R.Q.D. 2008. *Scents of the Amazon : Replacing Rosewood in Perfumery ? Part I **. Perfumer & Flavorist. (<https://www.perfumerflavorist.com/fragrance/ingredients/news/21870145/scents-of-the-amazon-replacing-rosewood-in-perfumery-part-i>). Accessed on 09 Feb. 2023.
- Barton, A.F.M.; Tjandra, J.; Nicholas, P.G. 1989. Chemical Evaluation of Volatile Oils in Eucalyptus Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 37: 1253–1257.
- Bastos Lima, M.G. 2021. Corporate power in the bioeconomy transition: The policies and politics of conservative ecological modernization in Brazil. *Sustainability (Switzerland)* 13: 1–20.
- BRASIL. 1992. Portaria No 37, de 03 de abril de 1992, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). .

- BRASIL. 2014. Portaria No 443, de 17 de dezembro de 2014, do Ministério de Estado do Meio Ambiente (MMA). : 9–10.
- Bugge, M.M.; Hansen, T.; Klitkou, A. 2016. What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability (Switzerland)* 8.
- Chantraine, J.M.; Dhénin, J.M.; Moretti, C. 2009. Chemical variability of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in French Guiana. *Journal of Essential Oil Research* 21: 486–495.
- CITES. 2010. *Fifteenth meeting of the Conference of the Parties*. (<https://cites.org/eng/cop/15/ins/index.php>). Accessed on 08 Aug. 2023.
- Clark, G. 2000. *Eucalyptol*. 25.
- Coppen, J.J.W. 1995. *Flavour and fragrances of plant origin*. 7–13p.
- Damasceno, C.S.B.; Fabri Higaki, N.T.; Dias, J.D.F.G.; Miguel, M.D.; Miguel, O.G. 2019. Chemical Composition and Biological Activities of Essential Oils in the Family Lauraceae: A Systematic Review of the Literature. *Planta Medica* 85: 1054–1072.
- Demyttenaere, J.C.R.; Willemen, H.M. 1998. Biotransformation of linalool to furanoid and pyranoid linalool oxides by *Aspergillus niger*. *Phytochemistry* 47: 1029–1036.
- Duchesne, L.C.; Wetzel, S. 2003. The bioeconomy and the forestry sector: Changing markets and new opportunities. *Forestry Chronicle* 79: 860–864.
- Elghobashy, R.M.; El-Darier, S.M.; Atia, A.M.; Zakaria, M. 2023. Allelopathic Potential of Aqueous Extracts and Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. and *Thymus vulgaris* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 24: 700–715.
- Ellwanger, J.H.; Nobre, C.A.; Chies, J.A.B. 2023. Brazilian Biodiversity as a Source of Power and Sustainable Development: A Neglected Opportunity. *Sustainability (Switzerland)* 15: 1–16.
- Fearnside, P.M. 1999. Biodiversity as an environmental service in Brazil's Amazonian forests: Risks, value and conservation. *Environmental Conservation* 26: 305–321.
- Fearnside, P.M. 2021. The intrinsic value of Amazon biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 30: 1199–1202.
- Ferraz, J.B.; Barata, L.E.; Sampaio, P. de T.; Guimarães, G. 2009. Perfumes da floresta Amazônica: em busca de uma alternativa sustentável. *Ciência e Cultura* 61: 40–43.
- Fidelis, C.H.V.; Augusto, F.; Sampaio, P.T.B.; Krainovic, P.M.; Barata, L.E.S. 2012. Chemical characterization of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) leaf essential oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with quadrupole mass spectrometry. *Journal of*

Essential Oil Research 24: 245–251.

- Garrett, R.D.; Cammelli, F.; Ferreira, J.; Levy, S.A.; Valentim, J.; Vieira, I. 2021. Forests and Sustainable Development in the Brazilian Amazon: History, Trends, and Future Prospects. *Annual Review of Environment and Resources* 46: 625–652.
- Gatti, L. V.; Basso, L.S.; Miller, J.B.; Gloor, M.; Gatti Domingues, L.; Cassol, H.L.G.; et al. 2021. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595: 388–393.
- Gottlieb, O.R.; Kubitzki, K. 1981a. Chemosystematics of Aniba. *Biochemical Systematics and Ecology* 9: 5–12.
- Gottlieb, O.R.; Kubitzki, K. 1981b. Chemogeography of Aniba (Lauraceae). *Plant Systematics and Evolution* 137: 281–289.
- Gurkan, H.; Hayaloglu, A.A. 2023. Changes in volatiles and essential oil composition of three organs (leaf, stem and flower) of purple basil (*Ocimum basilicum* L.) by GC–MS combined with multivariate statistical approach. *Food Chemistry Advances* 2: 100292.
- Hu, D.; Guo, J.; Li, T.; Zhao, M.; Zou, T.; Song, H.; et al. 2019. Comparison and identification of the aroma-active compounds in the root of angelica dahurica. *Molecules* 24.
- Iqbal, Z.; Akhtar, M.; Qureshi, T.M.; Akhter, J.; Ahmad, R. 2011. Variation in composition and yield of foliage oil of eucalyptus polybractea. *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 33: 183–187.
- ITC. 2023. *List of exporters for the selected product in 2022, ITC Trade Map*. (https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7C%7C%7C%7C%7C3301%7C%7C%7C4%7C1%7C1%7C2%7C1%7C%7C2%7C1%7C%7C1). Accessed on 09 Aug. 2023.
- Kolde, R. 2022. Package “pheatmap”: Pretty heatmaps. *R package*: 1–8.
- Krainovic, P.; Almeida, D.; Desconci, D.; Veiga-Júnior, V.; Sampaio, P. 2017. Sequential management of commercial rosewood (*Aniba rosaeodora* ducke) plantations in central Amazonia: Seeking sustainable models for Essential oil production. *Forests* 8.
- Krainovic, P.M.; Almeida, D.R.A. de; Veiga Junior, V.F. da; Sampaio, P. de T.B. 2018a. Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management* 429: 143–157.
- Krainovic, P.M.; Almeida, D.R.A. de; Veiga Junior, V.F. da; Sampaio, P. de T.B. 2018b. Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management* 429: 143–157.

- Kubitzki, K.; Renner, S. 1982. Lauraceae I (Aniba and Aiouea). In: *Flora Neotropica*, Vol. 31, p.1–124.
- Lara, C.S.; Costa, C.R.; Sampaio, P.T.B. 2021. O mercado de sementes e mudas de pau-rosa (*Aniba* spp.) no Estado do Amazonas. *Revista de Economia e Sociologia Rural* 59: 1–8.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Sampaio, P. de T.B.; Eberlin, M.N.; Fidelis, C.H. de V. 2018. Linalool enantiomeric distribution in rosewood-reminiscent populations in Central Amazon. *Journal of Essential Oil Research* 30: 464–469.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Minhós, L.M.; Lima Junior, M. de J.V.; Santos, P.V.; Vianna, A.L.M.; et al. 2024a. The rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) value chain in the Brazilian Amazon. *Economic Botany* no prelo.
- Lara, C.S.; Barata, L.E.S.; Junior, S.D.; Ritter, C.D.; Falcão, L. de S.; Ruiz, G.C.M.; et al. 2024b. Rapid analysis of variations in the volatile organic composition of rosewood (*Aniba* spp., Lauraceae) from plantations in the Amazon. *No prelo*.
- Letizia, C.S.; Cocchiara, J.; Lalko, J.; Api, A.M. 2003. Fragrance material review on linalool. *Food and Chemical Toxicology* 41: 943–964.
- Mączka, W.; Duda-Madej, A.; Grabarczyk, M.; Wińska, K. 2022. Natural Compounds in the Battle against Microorganisms—Linalool. *Molecules* 27.
- Maia, J.G.S.; Andrade, E.H.A.; Couto, H.A.R.; Carla, A.; Silva, M.; Marx, F.; et al. 2007. Plant Sources of Amazon Rosewood Oil. *Química Nova* 30: 1906–1910.
- Maia, O.G.S.; Andrade, L.H.A. 2009. Database of the amazon aromatic plants and their essential oils. *Química Nova* 32: 595–622.
- Markets and Markets. 2023. *Essential Oils Market Global Forecast to 2027*. (<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/essential-oil-market-119674487.html>). Accessed on 09 Jan. 2023.
- Martinez, A.P. 2017. `_pairwiseAdonis`: Pairwise Multilevel Comparison using Adonis_. R package version 0.4.1. .
- Matta Barbosa, A.S. da. 2015. *Testando delimitação de espécies em monografias – um estudo de caso em Aniba Aubl. (Lauraceae)*. 100p.
- Mattoso, E.; Dos Anjos, C.S.; Barata, L.; Marsaioli, A.J. 2022. Two Woody Scented Oils from the Amazonian Forest. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 33: 191–195.
- May, P.H.; Barata, L.E.S. 2004. Rosewood Exploitation in the Brazilian Amazon: Options for Sustainable Production. *Economic Botany* 58: 257–265.

- MDIC. 2023. *Exportação e Importação Geral: óleos essenciais. Portal ComexStat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços.* (<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/92245>). Accessed on 09 Aug. 2023.
- Mors, W.B.; Gottlieb, O.R. 1959. Phylogeny of the Genus *Aniba* Aubl.-A Comparative Morphological and Chemical Observation. *Nature* 1959: 1589.
- Mosciano, G. 2002. Organoleptic Characteristics of Flavor Materials. *Perfumer & Flavorist* 27: 67–69.
- Ohashi, S.T.; Santana, L.S.R.; Green, C.L. 1997. Brazilian Rosewood Oil: Sustainable Production and Oil Quality Management. *Perfumer & Flavorist* 8: 16–20.
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F., et al. 2022. vegan: Community Ecology Package. <https://cran.r-project.org/package=vegan>
- Ousaid, F.E.; Guenaou, I.; Nait, I.; Ridaoui, K.; Zouheir, Y.; Hmimid, F.; et al. 2024. Lavandula mairei essential oil. *Scientific African* 23: e02062.
- Pastore, T.C.M.; Braga, L.R.; Daniele, D.C.G.; Soares, L.F.; Pastore, F.; Alessandro, A.C.; et al. 2022. A green and direct method for authentication of rosewood essential oil by handheld near infrared spectrometer and one-class classification modeling. *Microchemical Journal* 182: 107916.
- Peres, C.A.; Campos-Silva, J.; Ritter, C.D. 2023. Environmental policy at a critical junction in the Brazilian Amazon. *Trends in Ecology and Evolution* 38: 113–116.
- Pimentel, R.B.Q.; Souza, D.P.; Albuquerque, P.M.; Fernandes, A. V.; Santos, A.S.; Duvoisin, S.; et al. 2018. Variability and antifungal activity of volatile compounds from *Aniba rosaeodora* Ducke, harvested from Central Amazonia in two different seasons. *Industrial Crops and Products* 123: 1–9.
- Raguso, R.A.; Pichersky, E. 1999. A day in the life of a linalool molecule: Chemical communication in a plant-pollinator system. Part 1 : Linalool biosynthesis in flowering plants. *Plant Species Biology* 14: 95–120.
- Rehman, R.; Ahmad, W.; Muzaffar, R.; Bano, A.; Sajid, I.; Ahsan, A.U.; et al. 2023. Insect repellent and insecticidal potential of two *Eucalyptus* species essential oils from subtropical desert climate. *Chemical Papers* 78: 2369–2384.
- Rodrigues, M. 2023. Marina Silva Amazon protector. *Nature* 624: 2023.
- Sampaio, L.D.F.S.; Maia, J.G.S.; De Parijós, A.M.; De Souza, R.Z.; Barata, L.E.S. 2012. Linalool from rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) oil inhibits adenylate cyclase in the retina,

- contributing to understanding its biological activity. *Phytotherapy Research* 26: 73–77.
- Sampaio, P. de T.B.; Barbosa, A.P.; Vieira, G.; Spironello, W.R.; Bruno, F.M.S. 2005. Biomassa da rebrota de copas de pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) em plantios sob sombra parcial em floresta primária. *Acta Amazonica* 35: 491–494.
- Shiferaw, Y.; Kassahun, A.; Tedla, A.; Feleke, G.; Abebe, A.A. 2019. Investigation of Essential Oil Composition Variation with Age of *Eucalyptus globulus* Growing in Ethiopia. *Natural Products Chemistry & Research* 07: 1–5.
- Soulimani, R.; ... J.B.-A.J. of; 2019, U. 2019. Limonene: natural monoterpene volatile compounds of potential therapeutic interest. *Essence journal* 7: 1–10.
- Souza, D.P.; Pimentel, R.B.Q.; Santos, A.S.; Albuquerque, P.M.; Fernandes, A. V.; Junior, S.D.; et al. 2020. Fungicidal properties and insights on the mechanisms of the action of volatile oils from Amazonian Aniba trees. *Industrial Crops and Products* 143: 111914.
- Souza, R.C.Z.; Eiras, M.M.; Cabral, E.C.; Barata, L.E.S.; Eberlin, M.N.; Catharino, R.R. 2011. The famous Amazonian rosewood essential oil: Characterization and adulteration monitoring by electrospray ionization mass spectrometry fingerprinting. *Analytical Letters* 44: 2417–2422.
- ter Steege, H.; Pitman, N.C.A.; Killeen, T.J.; Laurance, W.F.; Peres, C.A.; Guevara, J.E.; et al. 2015. Estimating the global conservation status of more than 15,000 Amazonian tree species. *Science Advances* 1: 9–11.
- ter Steege, H.; Prado, P.I.; Lima, R.A.F. d.; Pos, E.; de Souza Coelho, L.; de Andrade Lima Filho, D.; et al. 2020. Biased-corrected richness estimates for the Amazonian tree flora. *Scientific Reports* 10: 1–13.
- Strand, J.; Soares-Filho, B.; Costa, M.H.; Oliveira, U.; Ribeiro, S.C.; Pires, G.F.; et al. 2018. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability* 1: 657–664.
- Sugawara, Y. 2000. Odor Distinctiveness between Enantiomers of Linalool: Difference in Perception and Responses Elicited by Sensory Test and Forehead Surface Potential Wave Measurement. *Chemical Senses* 25: 77–84.
- Team, R.C. 2023. R: A language and environment for statistical computing. .
- da Trindade, R.C.S.; Xavier, J.K.A.M.; Setzer, W.N.; Maia, J.G.S.; da Silva, J.K.R. 2021. Chemical diversity and therapeutic effects of essential oils of aniba species from the amazon: A review. *Plants* 10: 1–46.
- Valli, M.; Russo, H.M.; Bolzani, V. da S. 2018. The potential contribution of the natural products

- from Brazilian biodiversity to bioeconomy. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 90: 763–778.
- Vespermann, K.A.C.; Paulino, B.N.; Barcelos, M.C.S.; Pessôa, M.G.; Pastore, G.M.; Molina, G. 2017. Biotransformation of α - and β -pinene into flavor compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology* 101: 1805–1817.
- Virgiliou, C.; Zisi, C.; Kontogiannopoulos, K.N.; Nakas, A.; Iakovakis, A.; Varsamis, V.; et al. 2021. Headspace gas chromatography-mass spectrometry in the analysis of lavender's essential oil: Optimization by response surface methodology. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences* 1179: 122852.
- Wickham, H.; Averick, M.; Bryan, J.; Chang, W.; McGowan, L.; François, R.; et al. 2019. Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software* 4: 1686.
- Wink, M. 2016. Secondary Metabolites, the Role in Plant Diversification of. *Encyclopedia of Evolutionary Biology* 4: 1–9.
- Xavier, J.K.A.M.; Maia, L.; Figueiredo, P.L.B.; Folador, A.; Ramos, A.R.; Andrade, E.H.; et al. 2021. Essential Oil Composition and DNA Barcode and Identification of Aniba species (Lauraceae) Growing in the Amazon Region. *Molecules (Basel, Switzerland)* 26: 1–19.
- Zellner, B.D.A.; Lo Presti, M.; Barata, L.E.S.; Dugo, P.; Dugo, G.; Mondello, L. 2006. Evaluation of leaf-derived extracts as an environmentally sustainable source of essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry and enantioselective gas chromatography-olfactometry. *Analytical Chemistry* 78: 883–890.