

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS-UFAM
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO AMBIENTE E
SUSTENTABILIDADE DA AMAZÔNIA

Sâmia Karyne Gomes de Sá

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU (*Acmella oleracea*) ASSISTIDA
POR ENZIMAS**

Manaus/AM

2025

SÂMIA KARYNE GOMES DE SÁ

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU (*Acmella oleracea*) ASSISTIDA
POR ENZIMAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade da Amazônia, área de concentração em Aproveitamento de resíduos agroindustriais e agrícolas, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Profa. Dra. Leiliane do Socorro Sodré de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Mathias Pereira

Manaus/AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S111e Sá, Sâmia Karyne Gomes de
Extração de óleo essencial de jambu (*Acmella oleracea*) assistida
por enzimas / Sâmia Karyne Gomes de Sá. - 2025.
86 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Leiliane do Socorro Sodré de Souza.
Coorientador(a): Anderson Mathias Pereira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e
Sustentabilidade na Amazônia, Manaus, 2025.

1. Pré-tratamento enzimático. 2. Bioproduto. 3. Propriedades . 4.
antioxidante. I. Souza, Leiliane do Socorro Sodré de. II. Pereira,
Anderson Mathias. III. Universidade Federal do Amazonas.
Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e
Sustentabilidade na Amazônia. IV. Título

SÂMIA KARYNE GOMES DE SÁ

**EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU (*Acmella oleracea*) ASSISTIDA
POR ENZIMAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade da Amazônia, área de concentração em Aproveitamento de resíduos agroindustriais e agrícolas, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Profa. Dra. Leiliane do Socorro Sodré de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Mathias Pereira

Banca Examinadora

Aprovado em 03/07/2025

Prof. Dr. Mozaniel Santana de Oliveira

Universidade Federal do Pará - UFPA

Dr. Eduardo Leonarski

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Profa. Dra. Sandriane Pizato

Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Dedico este trabalho

A Deus, por me guiar e sustentar em todos os momentos
da jornada.

Aos meus pais, pelo amor, orações, apoio e incentivo
incondicional em minha criação e formação acadêmica.

A minha irmã, por ser uma inspiração de dedicação nos
estudos.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me sustentado nos momentos difíceis e tornado eles mais fáceis. Por me acompanhar e guiar meus passos.

À minha família, que sempre foi minha base, especialmente meus pais que sempre foram o principal motivo para que eu almejasse progredir em meus estudos. E minha irmã que é minha maior incentivadora.

Aos amigos que fiz no mestrado, Valcilene e Leandra, que me ajudaram a lavar jambu e em algumas análises. Sentirei falta da viagem, as saídas que marcamos e nunca fizemos, dos almoços juntas e os desabafos que me deram forças para continuar mesmo que tudo parecesse que daria errado. Esse trabalho não seria possível sem o companheirismo de vocês.

Aos meus orientadores, Dr. Leiliane Souza e Dr Anderson Mathias, que embarcaram nessa temática e me ajudaram na construção do trabalho, dar suporte de equipamentos no Labpros e orientação técnica.

Aos companheiros do Laboratório, aos que partiram e aos que permanecem. A todos que me ajudaram em algum momento entre uma extração e outra.

Ao meu parceiro de vida, Marcos Levi, que me ouviu e me ajudou a manter firme quando as adversidades vinham. Obrigada por ter vivido os momentos bons e ruins ao meu lado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, pelo apoio e incentivo a essa pesquisa.

Ao PPGCASA (Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Sustentabilidade da Amazônia), o programa que me acolheu e me fez descobrir como atuar com multidisciplinaridade para contribuir com a Amazônia.

Aos parceiros dessa pesquisa NECTAM (Núcleo de Estudos em Ciências e Tecnologia da Amazônia - IFAM) e CMABio (Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos - UEA) que contribuíram para a realização de algumas análises.

RESUMO

A Amazônia possui particularidades que não são encontradas em nenhuma outra parte do mundo, com uma fauna e flora únicas e diversificadas. Uma das propostas para o desenvolvimento sustentável da Amazônia é a bioeconomia; por meio dela, é possível ressaltar a importância da Floresta Amazônica para a manutenção do clima global. Destacamos os bioprodutos obtidos na Amazônia, como os óleos essenciais (OEs). O principal método é a hidrodestilação, por ser barato e de fácil construção, que também pode ser combinada com pré-tratamento como forma de extração de compostos bioativos. Uma planta aromática de que é possível extrair o OE é o jambu, que possui potencial anti-inflamatório, antimicrobiano, anestésico, antioxidante, entre outros. Desse modo, por meio desse trabalho, buscou-se avaliar a influência do pré-tratamento enzimático no rendimento da extração e na composição do óleo essencial de jambu (*Acmella oleracea*). A metodologia deu-se a partir da aquisição da matéria-prima em mercados da cidade de Manaus/AM. A caracterização físico-química foi feita por determinação de umidade e cinzas. O material segue então para a secagem em estufa (40 °C, 48 h) e posterior extração do óleo essencial, seguindo-se o pré-tratamento utilizando as enzimas Celluclast® 1.5L (700 Ug-1 de atividade EGU) e Pectinex® Ultra SP-L (3800 Ug-1 de atividade PGNU). Com o produto das extrações foram realizadas as análises de CG-MS (Cromatografia em Fase Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas) e atividade antioxidante, enquanto com o resíduo da biomassa foi realizada a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados de cinzas e umidade foram 1,39% e 86,83% respectivamente. O rendimento da extração de óleo essencial por hidrodestilação tradicional foi de 0,07%, enquanto as extrações com pré-tratamento enzimático variam de a 0,07% a 0,10%, sendo a aplicação da enzima celulase a 0,3% com melhor performance. A cinética nos aponta a redução de tempo nas extrações com enzimas, com destaque para celulase 0,5% e pectinase 0,3% que reduziram o processo em 1,5h, em relação a hidrodestilação tradicional (5h). Com o MEV foi possível observar as estruturas com fissuras nas amostras após a hidrodestilação e o impacto da ação enzimática no processo de extração do OE. Os componentes predominantes identificados na CG-MS foram o Cariófileno, β -Cubebeno, e Óxido de Cariófileno. O resultado aponta o potencial do óleo essencial de jambu para atividade anti-inflamatórias, antiagregantes, antioxidante, antimicrobianas, analgésicas, anticancerígenas, antifúngica devido possuir componentes com tais propriedades. Pode-se observar que sua atividade antioxidante aumentou gradualmente com o aumento da concentração e do tempo. O potencial antioxidante foi considerado o máximo com 85,37% de eliminação de radicais livres a 35 μ g/mL da amostra com adição de 0,3% de celulase. Em suma a concentração de 0,3% de enzima no pré-tratamento destacou-se nos experimentos, especialmente quando se utilizou a enzima celulase. A utilização de coquetel enzimático é uma possibilidade para melhoramento dos resultados em estudos posteriores, tal qual a análise específica de propriedades como a antitumoral e antimicrobiana.

Palavras-chave: Pré-tratamento enzimático; Bioproduto; Propriedade antioxidante

ABSTRACT

The Amazon boasts characteristics found nowhere else in the world, with a diverse flora and fauna. One proposal for the sustainable development of the Amazon is the bioeconomy, which emphasizes the Amazon Rainforest's role in maintaining the global climate. We highlight the bioproducts produced in the Amazon, including essential oils (EOs). The primary method is hydrodistillation, as it is inexpensive, easy to construct, and can be combined with pretreatment to extract bioactive compounds. One aromatic plant from which EOs can be extracted is jambu, which has anti-inflammatory, antimicrobial, anesthetic, antioxidant, and other potential properties. Therefore, this study sought to evaluate the influence of enzymatic pretreatment on the extraction yield and composition of jambu (*Acmella oleracea*) essential oil. The methodology was developed based on the acquisition of raw materials from markets in Manaus, Amazonas. The physicochemical characterization was performed by determining moisture and ash. The material was then oven-dried (40 °C, 48 h), and the essential oil was subsequently extracted with pretreatment using the enzymes Celluclast® 1.5 L (700 Ug-1 EGU activity) and Pectinex® Ultra SP-L (3800 Ug-1 PGNU activity). The extraction product was analyzed by GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) and for antioxidant activity, while the biomass residue was examined by scanning electron microscopy (SEM). The ash and moisture results were 1.39 and 86.83, respectively. The essential oil extraction yield by traditional hydrodistillation was 0.07%, while extractions with enzymatic pretreatment ranged from 0.07% to 0.10%, with the 0.3% cellulase enzyme performing best. The kinetics indicate a reduction in extraction time, particularly with 0.5% cellulase and 0.3% pectinase, resulting in a 1.5-hour reduction compared to traditional hydrodistillation (5 hours). SEM enabled us to observe the fissured structures in the samples after hydrodistillation and to assess the impact of enzymatic action on the EO extraction process. The predominant components identified by GC-MS were caryophyllene, β -cubebene, and caryophyllene oxide. The results indicate the potential of jambu essential oil for anti-inflammatory, antiplatelet, antioxidant, antimicrobial, analgesic, anticancer, and antifungal activities due to its components with these properties. Its antioxidant activity gradually increased with increasing concentration and time. The antioxidant potential was considered maximum, with 85.37% free radical scavenging at 35 μ g/mL of the sample containing 0.3% cellulase. In summary, the 0.3% enzyme concentration during pretreatment stood out in the experiments, mainly when cellulase was used. The use of an enzyme cocktail is a possibility for improving the results in future studies, as is the specific analysis of properties such as antitumor and antimicrobial.

Keywords: Enzymatic pretreatment; Bioproduct; Antioxidant property

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Símbolos dos ODS 2 e 17	17
Figura 2 – Folhas e flores de jambu	19
Figura 3 – Sistema de extração de óleo essencial Clevenger	24
Figura 4 – Processo de extração dos glóbulos de óleo facilitado pela enzima.....	28
Figura 5 – Higienização e sanitização, [a] separação do talo e folha; [b] sanitização em com solução de hipoclorito de sódio.....	31
Figura 6 – Modelo base de extrator de óleos essenciais.....	33
Figura 7 – Pré-tratamento enzimático durante processo térmico em banho maria ...	34
Figura 8 – Microscópio Eletrônico de Varredura, JEOL, JSM – IT500HR	35
Figura 9 – Equipamento de Cromatografia em Fase Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas	36
Figura 10 – Óleo essencial de jambu	38
Figura 11 – Cinética de hidrodestilação das amostras controle e pré-tratamento com celulase	40
Figura 12 – Cinética de hidrodestilação das amostras controle e pré-tratamento com pectinase	40
Figura 13 – Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras antes da hidrodestilação [a] controle, [b] JEC 0,1; [c] JEC 0,3; d JEC 0,5; [e] JEP 0,1; [f] JEP 0,3; [g] JEP 0,5	42
Figura 14 – Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras após hidrodestilação [a] controle, [b] JEC 0,1; [c] JEC 0,3; [d] JEC 0,5; [e] JEP 0,1; [f] JEP 0,3; [g] JEP 0,5	43
Figura 15 – Atividade antioxidante do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 5 µg/mL	48
Figura 16 – Atividade antioxidante do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 20 µg/mL	49
Figura 17 – Atividade antioxidante do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 35 µg/mL	49
Figura 18 – Capacidade antioxidante em barras para cada período marcadas por letras diferentes são estatisticamente diferentes em $p < 0,05$. [a] JEC0,1; [b] JEC 0,3; [c] JEC 0,5; [d] JEP 0,1; [e] JEP 0,3, [f] JEP 0,5 [g] Controle [e]	54
Figura A1 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> sem pré-tratamento enzimático	68

Figura A2 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)	68
Figura A3 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)	68
Figura A4 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)	68
Figura A5 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)	69
Figura A6 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)	69
Figura A7 – Cromatograma do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i> com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%)	69
Figura B1 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação tradicional	70
Figura B2 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação tradicional	71
Figura B3 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)	72
Figura B4 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)	73
Figura B5 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)	74
Figura B6 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)	75
Figura B7 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)	76
Figura B8 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)	77
Figura B9 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)	78
Figura B10 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)	79
Figura B11 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)	80
Figura B12 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)	81
Figura B13 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%)	82

Figura B14 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%) 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre a aplicabilidade do jambu	20
Tabela 2 – Propriedades de variedades de óleos essenciais	23
Tabela 3 – Classes principais e subclasses das enzimas	27
Tabela 4 – Registros dos testes preliminares.....	32
Tabela 5 – Composição físico-química da folha de Jambu	37
Tabela 6 – Rendimento de óleo essencial extraído de folhas de jambu com diferentes concentrações	38
Tabela 7 – Composição química dos constituintes do óleo essencial de Jambu.....	45
Tabela 8 - Teste Tukey comparativo de controle e aplicação de enzima celulase.....	50
Tabela 9 - Teste Tukey comparativo de controle e aplicação de enzima pectinase...	52
Tabela C1 - Análise de variância.....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 BIOECONOMIA E SUSTENTABILIDADE	17
3.2 JAMBU	19
3.3 ÓLEO ESSENCIAL	23
3.4 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO	25
3.5 ENZIMAS	28
3.5.1 Pectinase	30
3.5.2 Celulase	30
4. METODOLOGIA	32
4.1 AQUISIÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	32
4.2 DETERMINAÇÃO UMIDADE E CINZAS	32
4.3 TESTES PRELIMINARES	32
4.4 EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU	33
4.4 EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU COM PRÉ-TRATAMENTO ENZIMÁTICO	34
4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA BIOMASSA UTILIZADA EM EXTRAÇÃO COM PRÉ-TRATAMENTO	35
4.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO ÓLEO ESSENCIAL SEM E COM PRÉ-TRATAMENTO ENZIMÁTICO	36
4.7 ENSAIO DE ATIVIDADE DE REDUÇÃO DO RADICAL DPPH	37
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA FOLHA DE JAMBU	38
5.2 TESTES PRELIMINARES	38
5.3 RENDIMENTO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU	39
5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	42
5.5 CROMATOGRAFIA (CG-MS)	45
5.5 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO ÓLEO ESSENCIAL	49
6. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	58

APÊNDICE A - Análises cromatográficas do óleo essencial de <i>Acmella oleracea</i>	
.....	69
APÊNDICE B – Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura da biomassa da hidrodestilação de <i>Acmella oleracea</i>	
.....	71

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia possui particularidades que não são encontradas em nenhuma outra parte do mundo, com uma fauna e flora únicas e diversificadas. A sua biodiversidade singular fascina a todos, em especial biólogos e ecologistas. A bacia amazônica contém por volta de 16.000 espécies de árvores (Dick, 2021). Uma biodiversidade que evoluiu por mais de 50 milhões de anos compreende 25% das espécies de árvores do mundo, fornecendo meios para a vida de inúmeras comunidades, ainda não sendo desfrutada em seu potencial (Kimura, 2023).

Uma das propostas para o desenvolvimento sustentável da Amazônia é a bioeconomia (Kimura, 2023). Por meio dela é possível ressaltar a importância da Floresta Amazônica para a manutenção do clima global. Têm-se criado iniciativas focadas no potencial bioeconômico da região com maior frequência. Como ocorreu no Fórum Mundial de Bioeconomia e no Encontro de Sociobiodiversidade Amazônica, realizados em outubro de 2021 na cidade de Belém do Pará, que debateram sobre como gerar maior sustentabilidade a produtos e serviços desenvolvidos na Amazônia. A concretização desses debates é uma medida que deve ser tomada com urgência para estabelecer diretrizes envolvendo iniciativas financeiras e políticas públicas para a bioeconomia amazônica (Brasil, 2021; Bergamo *et al.*, 2022).

Apesar de não haver delimitações governamentais referentes à temática, a bioeconomia baseada na floresta incorpora amplos benefícios intersetoriais com potencial para variadas funções e aplicações. Além disso, as soluções digitais, como a precisão da entrega, a otimização do nível de estoque e o alinhamento com o planejamento da demanda, têm contribuído para o avanço da bioeconomia nos últimos anos (Naveed, Watanabe e Neittanmäki, 2020). Devido ao potencial dos produtos naturais advindos da natureza, a biodiversidade pode ser considerada como um ativo comercial. O desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema tem se tornado cada vez mais frequente para produtos alimentícios e fármacos, por exemplo. Entretanto, é necessária cautela para não desenvolver um quadro crítico na Amazônia que ameace as espécies, influencie o desmatamento e afete o ecossistema (Kellner, 2021).

Dentre os bioprodutos obtidos na Amazônia, temos os óleos essenciais (OEs). Os OEs são produtos naturais de alto valor agregado com aplicação em diversas

áreas, como farmacêutica, cosmética, perfumaria e indústria alimentícia (Cabi, Arici e Sagdic, 2021). A indústria de alimentos pode ser destacada, pois é crescente a demanda por conservantes naturais devido à preocupação com os efeitos negativos à saúde associados aos corantes sintéticos (Silva *et al.*, 2022).

O mercado internacional de óleos essenciais movimentou em 2021 US\$ 10,3 bilhões, tendo como principais colaboradores Índia, EUA, Espanha, China e Brasil, com aproximadamente 160.000 toneladas de OEs exportadas. Dentre os principais óleos essenciais no mercado internacional, têm-se: laranja, menta japonesa, eucalipto, limão siciliano, hortelã-pimenta, cravo, menta, cedro da Virgínia e citronela (Bizzo e Rezende, 2022).

Já no mercado brasileiro, o óleo essencial que se destaca é o de laranja, como consequência do país ser o maior produtor e exportador mundial de suco dessa fruta. Em 2020, a quantidade exportada de OEs de laranja chegou a 35 mil toneladas. Óleos essenciais de outros cítricos também compõem esse mercado, como limão siciliano, limão Tahiti, *petitgrain*. Além dos cítricos, também temos eucalipto, vetiver, menta e pau-rosa (Bizzo e Rezende, 2022).

O método de extração influencia a composição do OE de acordo com os parâmetros estabelecidos. O principal método é a hidrodestilação, por ser barato e de fácil construção, mas pode causar degradação térmica e o tempo para a execução é prejudicial (Silva *et al.*, 2022). Com o desenvolvimento de novas técnicas de extração, foi possível reduzir o tempo e economizar energia no processo. Esse resultado pode ser obtido pelos métodos com fluido supercrítico, arraste a vapor e hidrodestilação assistida por micro-ondas (MGH), por exemplo (Nagar *et al.*, 2023).

Uma planta aromática com potencial de extração de óleo essencial que podemos destacar é o jambu, de nome científico *Acmella oleracea*, pertencente à família Asteraceae, que está presente em diversos países como Nepal, China, México e Brasil. Seu cultivo possui finalidades hortícolas, medicinais, inseticidas e culinárias. Não é uma planta de grandes dimensões, sua altura pode variar entre 30 e 60 cm, os caules são inclinados ou eretos e cobertos de lanugem na parte superior. As folhas têm formato oval com bordas irregulares e possuem inflorescência anualmente de julho a outubro (Spinuzzi *et al.*, 2021). Sua composição é rica em carboidratos, fibras e minerais. Mesmo que não tenha alto teor lipídico, suas características contribuem

para a extração de óleo essencial de excelência. Como Spinozzi *et al.* (2021) apresentam em sua pesquisa que o óleo essencial de jambu tem um impacto significativo no desenvolvimento larval, fecundidade e natalidade de pernilongos (*C. quinquefasciatus*).

O principal componente do jambu é o espilantol, pois, além de possuir efeitos sensoriais marcantes, também atribui à planta efeito anti-inflamatório, antimicrobiano, anestésico, antipirético, antioxidante, inseticida, antisséptico, estimulação imunológica, antiobesidade e efeitos anticancerígenos (Uthpala e Navaratne 2021). A planta que popularmente é conhecida como “planta dor de dente” possui diversas aplicações, além das já citadas; também pode ser utilizada na preparação de suplementos alimentares, como anestésico local, analgésico, fungicida, diurético, entre outros (Spinozzi *et al.*, 2021).

Visto isso, as abordagens sustentáveis voltadas à utilização e conversão de espécies vegetais em bioprodutos que incentivam a economia circular devem ser colocadas em prática. Desse modo, a bioeconomia é potencializada, gerando emprego e promovendo a expansão e o desenvolvimento da região amazônica. Tais ações contribuem para a preservação da floresta, pois aproveitam a natureza de forma consciente e aprimoram bioprocessos na produção de bioenergia e outros bioprodutos comerciais de interesse (Nagar *et al.*, 2023). Desse modo, por meio desse trabalho, busca-se avaliar a influência do pré-tratamento enzimático no rendimento da extração e na composição do óleo essencial de jambu (*Acmella oleracea*).

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do pré-tratamento enzimático no rendimento da extração e na composição química do óleo essencial de jambu (*Acmella oleracea*).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar as folhas de jambu através das análises de cinzas e umidade;

Caracterizar morfológicamente a biomassa de jambu antes e após o processo de hidrodestilação;

Avaliar a extração do óleo essencial de Jambu;

Aplicar pré-tratamento enzimático à biomassa com as enzimas celulase e pectinase;

Avaliar a influência do pré-tratamento enzimático no rendimento e na composição química do óleo essencial obtido;

Verificar a aplicação do óleo essencial de jambu através da avaliação do potencial terapêutico por meio de atividade antioxidante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

A valorização de bioprodutos tem desempenhado um papel importante para a bioeconomia e o reconhecimento de recursos biotecnológicos (Mohan *et al.*, 2020). O seu conceito pode ser definido como uma economia que utiliza recursos biológicos renováveis da terra e do ar, como animais, florestas e microrganismos, para transformação em energia, alimentação e materiais (Colasante e D'adamo, 2021). Dentre as suas responsabilidades temos o desenvolvimento de materiais e processos que são de origem biológica e imitam ou empregam mecanismos da natureza para alcançar um design eficiente de recursos (Mohan *et al.*, 2020).

Por meio da economia baseada na diversidade, podem ser devolvidos os setores de agricultura, silvicultura, pesca, fabricação de alimentos, combustível, bioeletricidade, entre outros. Para abranger tais campos, o conceito de bioeconomia pode ser acoplado a três perspectivas, segundo D'Adamo *et al.* (2022): a visão da biotecnologia, a visão dos biorecursos e a visão da bioecologia. Tais soluções sustentáveis têm sido utilizadas como possibilidade para o desenvolvimento que preserve a região amazônica. Esta região do Brasil historicamente sofre impactos pelas descobertas de possibilidades de exploração e manejo da sua biodiversidade, onde apresenta alternativas de fomento e desenvolvimento do local por meio da inovação via engenharia biomimética, biologia sintética e desenvolvimento de novos materiais, compostos químicos e biocombustíveis (Kimura *et al.*, 2023).

Tratando-se de Amazônia, existem fatores que não podem ser deixados de lado para que o desenvolvimento de bioprodutos não se sobreponha a harmonia da natureza. Um dos maiores desafios é enfrentar a diversidade interseccionais e os altos níveis de pobreza, protegendo a floresta tropical e sustentando os direitos dos povos amazônicos que promovem sua conservação. Bergamo *et al.* (2022) destacam (i) desmatamento zero, (ii) fortalecimento das práticas culturais e econômicas milenares da Amazônia da população tradicional, (iii) diversificação de métodos e produção que valorizem a biodiversidade como resposta às plantações de monoculturas generalizadas, e (iv) repartição equitativa de benefícios com as comunidades locais.

Quando se fala em sustentabilidade, é importante citar a Agenda 2030, que trata dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) determinados pela Organização das Nações Unidas (ONU). Esses objetivos buscam renovar a visão global para enfrentar os desafios da sustentabilidade e ressaltam a urgência de esforços conjuntos de múltiplos atores sociais. A diversidade de ideias, pontos de vista e interesses pode dificultar a implementação de ações práticas públicas e privadas. Os ODS vêm como meio de intermediar os interesses e guiar para a evolução conjunta. Os conhecimentos existentes devem ser aplicados de forma estratégica e complementar, considerando e integrando diferentes conceitos, abordagens, ferramentas e instrumentos rumo ao desenvolvimento sustentável (D'amato e Korhonen, 2021).

Desse modo, a realização da pesquisa sobre extração de óleo essencial por via enzimática, impacta os ODS 2 e 17, com seus símbolos representados na Figura 1. A segunda diretriz estabelece: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável, em que se busca contribuir com a agricultura sustentável, visando atender às necessidades atuais de produção de alimentos sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades (Beuren *et al.*, 2021). O 17º ODS visa fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável, e uma forma de contribuir com esse objetivo é buscar parcerias voltadas para o ensino-aprendizado necessário para a elaboração da pesquisa (Campos *et al.*, 2021).

Figura 1: Símbolos dos ODS 2 e 17



Fonte: Nações Unidas Brasil, 2025

Ainda que haja dificuldade em medir e monitorar os ODS, a comunidade acadêmica possui um papel importante na contribuição de alcance das metas,

buscando desenvolvimento sustentável e dos pilares subjacentes dos ODS (econômico, social e ambiental) (Swain e Yang-Wallentin, 2020). A pandemia da COVID-19 foi um grande obstáculo inserido no ano de 2019 para progresso dos objetivos, mesmo que tenha evidenciado a urgência da implementação da Agenda 2030. Entretanto, uma das formas de recuperação após a pandemia é justamente a promoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Com os ensinamentos adquiridos desse momento turbulento, a energia de recursos renováveis e tecnologias sustentáveis tem sido mais procurada pela academia e pelos governos para melhorar o meio ambiente, o sistema econômico e a saúde pública a longo prazo (Wang e Huang, 2021).

Alinhada com os ODS, a bioeconomia tem sido um instrumento promissor para a contribuição do alcance dos objetivos da Agenda 2030. Ao ser inserida nesse contexto, a bioeconomia circular implica uma gestão mais eficiente dos recursos renováveis de base biológica, integrando os princípios da economia circular na bioeconomia. Ao ser somada à economia circular, podemos ser orientados para a sustentabilidade que busca transformar a economia linear numa economia mais eficiente e de reciclagem de resíduos, sendo a bioeconomia baseada na utilização de recursos biológicos renováveis (D'amato, Veijonaho e Toppinen, 2020).

3.2 JAMBU

Acmella oleracea é uma espécie vegetal da família *Asteraceae*, é encontrada em regiões tropicais e subtropicais, incluindo o Brasil (Bellumori *et al.*, 2022). É uma planta rasteira, com caule cilíndrico, carnudo, decumbente e ramificado, seu tamanho varia de 20 a 30 cm de altura (Gomes *et al.*, 2020). A coloração da flor é amarelada com ponta vermelha, como é possível observar na Figura 2. Sua folha é fonte de componentes antimicrobianos e antifúngicos. Além disso, as propriedades sensoriais características da folha e das flores são singulares (dar água na boca, dormência, formigamento, pungência), potencializando-as como ingrediente em pratos brasileiros (Uthpala *et al.*, 2021).

Figura 2: Folhas e flores de jambu



Fonte: Autor, 2025

O jambu pode ser utilizado como condimento ao substituir a pimenta na culinária amazônica; para tal aplicação, são utilizadas as partes aéreas da planta, como folhas, caules e flores (Bellumori *et al.*, 2022). O espilantol, uma alquinamida presente na *A. oleracea*, é o responsável não só pelo sabor picante, mas também pelas propriedades anestésicas, anti-inflamatórias e antinociceptivas (Yien *et al.*, 2022).

A produção do estado do Amazonas abrange 68 produtores, segundo o Censo Agropecuário de 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Dentre esses agricultores, 63% priorizam o jambu em sua produção. O cultivo do jambu é feito em semeadura no campo em sulcos no solo; entretanto, esse manejo leva a índices baixos de uniformidade e qualidade das plantas e possibilita a ocorrência de doenças que podem gerar perdas na produção. Para atuar e evitar tais perdas, há alternativas de cultivo, como o uso do sistema de hidroponia. Dentre as vantagens da utilização desse sistema, temos o menor uso de área e de insumos, especialmente água e fertilizantes, ausência de doenças e maior rendimento, o que gera melhor qualidade das plantas. A adubação nitrogenada também pode contribuir com uma safra de excelência, pois aumenta a oferta de nitrogênio no cultivo convencional ou no sistema orgânico (Sampaio *et al.*, 2021).

A planta possui diversas aplicações além das alimentícias. Na América do Sul, Ásia e África, por exemplo, é explorada na área medicinal no tratamento de dores

buciais, cicatrização de feridas, reumatismo, como agentes antiespasmódicos, febrífugos, entre outros (Bellumori *et al.*, 2022). A sua utilização é bastante explorada nas áreas médicas e alimentícias, como pode ser observado na Tabela 1, que apresenta uma síntese dos campos de estudo e desenvolvimento dessa hortaliça.

Tabela 1: Estudos sobre a aplicabilidade do jambu

Estudo desenvolvido	Resultado	Referência
Estudo sobre as alterações causadas na composição química do óleo essencial conforme o método de cultivo.	Houve influência positiva da produção de metabólitos secundários a partir do cultivo de plantas sob influência de luz LED vermelha.	Dedino <i>et al.</i> , 2022
Obtenção de óleo essencial rico em espilantol por extração assistida por micro-ondas.	A aplicação de micro-ondas resultou em rendimento e teor de espilantol superiores à hidrodestilação tradicional.	Spinozzi <i>et al.</i> , 2021
Estudo dos efeitos do óleo essencial de jambu contra três insetos-alvo.	Constatou-se a eficácia do óleo essencial como inseticida quando testado em pernilongo (<i>Culex quinquefasciatus</i>) e lagarta-desfolhadora (<i>Spodoptera littoralis</i>).	Benelli <i>et al.</i> , 2019
Avaliação da atividade acaricida de diferentes frações do extrato metanólico de <i>A. oleracea</i> .	O estudo determinou que a presença do componente espilantol possibilita a atividade acaricida do extrato de <i>A. oleracea</i> .	Marchesini <i>et al.</i> , 2020
Realização da cinética de secagem de massa foliar de jambu e massa foliar de jambu com espuma, em diferentes temperaturas (50, 60 e 70 °C) em espessura de 1,0 cm.	Os resultados obtidos mostram que a formação de espuma contribuiu para a redução do tempo necessário para atingir o teor de umidade de equilíbrio.	Gomes <i>et al.</i> , 2022
Caracterização do perfil fitoquímico dos extratos obtidos das partes aéreas e raízes de mudas de <i>Acmella oleracea</i> cultivadas <i>in vitro</i> , com foco na avaliação de seus metabólitos secundários característicos.	A pesquisa aponta que o procedimento extrativo que utiliza sonicação por 10 min a 60 ± 2 °C foi o que teve melhor desempenho. A análise de componentes do jambu cultivado <i>in vitro</i> e os derivados de organogênese, mostrou os mesmos compostos fenólicos.	Bellumori <i>et al.</i> , 2022
Produção de pó a partir da massa da folha de jambu por meio de secagem convectiva e comparação da composição química entre a massa da folha do jambu em pó e a fresca.	Após a análise do pó elaborado, verificou-se que a composição físico-química não sofreu grandes alterações com a utilização da secagem como método de conservação do jambu, exceto apenas para o pH, que apresentou aumento, favorecendo a conservação.	Gomes <i>et al.</i> , 2020

Desenvolvimento de um método simples e eficaz para a obtenção de extratos ricos em espilantol.	O ponto crucial foi a forma de identificar a quantidade de espilantol presente nos extratos. Desenvolvendo o estudo com base na cromatografia, determinou-se que o procedimento de HPLC-MS/MS foi o mais indicado para quantificar o espilantol em extratos frescos e para monitorar sua estabilidade em extratos de plantas.	Grymel <i>et al.</i> , 2022
Estudo da influência do tipo de cultivo, ou seja, cultivo hidropônico e cultivo convencional de campo, no perfil químico de folhas, flores e caules de <i>Acmella oleracea</i> .	Ao analisar as partes da hortaliça (folha, caule e flor) por meio de extrato constatou-se que o perfil metabólico difere de acordo com o sistema de cultivo e as partes anatômicas.	Nascimento <i>et al.</i> , 2020
Descrição do design e a avaliação de soros de emulsão novos, seguros, eficazes e de alta qualidade, totalmente baseados em ingredientes de origem natural, destinados a melhorar linhas finas e rugas faciais.	O soro de emulsão carregado com extrato de jambu, apresentou redução perceptível de rugas após duas semanas de aplicação em humanos.	Savic <i>et al.</i> , 2021
Determinação de concentrações de reguladores com melhor performance de crescimento para cultivo <i>in vitro</i> de jambu.	Ao testar em meio MS e ágar-ágar constatou-se que o primeiro meio se destacou por ter melhor desenvolvimento de germinação (88%).	Almeida <i>et al.</i> , 2020
Estudo referente ao efeito relaxante de <i>A. oleracea</i> no íleo contrações e seu possível mecanismo.	O extrato de flor de <i>A. oleracea</i> possui grande potencial como produto nutracêutico/fitoterápico por sua ação antiespasmódica geral no trato gastrointestinal, distúrbios como diarreia.	Duangjai <i>et al.</i> , 2021
Obtenção e caracterização de pó liofilizado da folha de <i>Acmella oleracea</i> como ingrediente alimentar funcional.	O produto mostrou-se uma boa fonte de substâncias bioativas. O conteúdo de flavonoides em <i>A. oleracea</i> pode contribuir para a diminuição das prostaglandinas e apresentar atividade antimicrobiana.	Santos <i>et al.</i> , 2021

Como citado na Tabela 1: os estudos sobre o jambu variam entre medicinais, aprimoramento para cultivo e alimentos funcionais. Além dos extratos etanólicos, hexânicos e metanólicos, também é possível obter óleo essencial de jambu. Mesmo que a composição química do óleo essencial vá depender parcialmente das condições de crescimento e desenvolvimento. De acordo com Dedino *et al.* (2020), a planta contém 0,7% de óleo essencial (Dedino *et al.*, 2022).

O óleo essencial de jambu é considerado como explorável em nível industrial. Dentre os seus constituintes voláteis mais frequentes no OE temos, (E)-cariofileno, limoneno e timol. O espilantol presente nele pode contribuir para a redução da vitalidade das larvas de mosquito, além de ser seguro para as células dos mamíferos, se aplicado em plantações agrícolas (Spinozzi *et al.*, 2021).

3.3 ÓLEO ESSENCIAL

Os óleos essenciais são misturas naturais, voláteis e complexas de metabólitos secundários, encontrados ou concentrados principalmente nas folhas, cascas ou partes frutíferas de plantas aromáticas (Zhang *et al.*, 2021). Sua coloração pode variar entre tons de amarelo e laranja-avermelhado ou até mesmo incolor. Há OEs menos densos que a água, como óleo de citronela, limão ou laranja; também há os que possuem densidade superior à da água, como o óleo essencial de canela e o de alho (Haro-González *et al.*, 2021). Segundo Kampasakai *et al.* (2023), os compostos voláteis presentes no OE pertencem a vários suportes químicos e principalmente de terpenos e compostos fenólicos.

Podendo ser obtidos diretamente das plantas e apresentando composição complexa, os óleos essenciais são fluidos hidrofóbicos e aromáticos. As centenas de moléculas individuais terpênicas e não terpênicas que compõem os OEs são responsáveis por lhe conferir propriedades físicas, químicas e biológicas únicas (Menossi *et al.*, 2021). Suas propriedades possibilitam uma vasta gama de aplicações, como farmacológicas, devido às propriedades antiespasmódicas. Em especial, OEs de plantas medicinais se destacam, por ter potenciais agentes antifúngicos para armazenamento de alimentos (Zhang *et al.*, 2021).

As propriedades químicas estarão atreladas à sua composição; entretanto, propriedades biológicas, como atividade antimicrobiana, anti-inflamatória, antioxidante e anticancerígena, estarão presentes de forma independente. Ao interligar a biodegradabilidade e o baixo impacto ambiental com as suas propriedades, as aplicações dos óleos essenciais tomam amplas vertentes. São empregados na indústria farmacêutica, em aplicações médicas, em cosmética e aromaterapia e como alternativas naturais aos biocidas para uso doméstico (Kampasakali *et al.*, 2023). Apesar de tais especificidades, são sensíveis a interferências externas como luz,

oxigênio, e calor, podendo causar deterioração e oxidação caso não esteja em ambiente paramentado (Amaralaj *et al.*, 2020).

Há cerca de 3000 óleos essenciais conhecidos, porém, somente 10% são utilizados comercialmente. Sua obtenção pode ser realizada a partir de várias partes do vegetal: flores (*Jasminum* spp., *Rosa* spp., *Viola* spp., *Lavandula* spp., *S. aromaticum* L.), folhas (*Thymus vulgaris*, *Eucalyptus* spp., *Lippia graveolens*, *Ocimum basilicum*, *Salvia rosmarinus*, *Cymbopogon citratus*, *Melaleuca alternifolia*), frutos (*Illicium verum*, *Citrus sinensis*, *Citrus limon*), sementes (*Elettaria cardamomum*, *Coffea arabica*, *Piper nigrum* L.), casca (*Cinnamomum* spp.) e raízes (Haro-González *et al.*, 2021). Na Tabela 2, são apresentados alimentos utilizados como fonte para óleos essenciais e suas propriedades.

Tabela 2: Propriedades de variedades de óleos essenciais

Fonte do óleo essencial	Propriedade	Referência
Eucalipto (<i>Eucalyptus</i>) e Cânfora (<i>Cinnamomum camphora</i>)	Pró-convulsivantes	Mathew <i>et al.</i> , 2021
Pimenta-do-reino (<i>Piper nigrum</i> L.)	Efeito antioxidante	Zhang <i>et al.</i> , 2021
Cravo da Índia (<i>Syzygium aromaticum</i>)	Antimicrobianas e antioxidantes	Kiki, 2023
Orégano (<i>Origanum</i>)	Efeito aromatizante, antimicrobiano, antioxidante, atividade antiviral.	Plati e Parasevopoulou, 2022
Canela (<i>Cinnamomum zeylanicum</i>)	Mecanismo antibacteriano	Chuensiang, Sanguandeeikul e Siripatrawan, 2021
Bergamota (<i>Citrus bergamia</i>)	Antiviral	Silva <i>et al.</i> , 2018
Capim-limão (<i>Cymbopogon flexuosus</i>)	Antiviral	Silva <i>et al.</i> , 2019
Tomilho (<i>Thymus vulgaris</i>)	Antiviral	Silva <i>et al.</i> , 2020
Lavanda (<i>Lavandula angustifolia</i>).	Antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória	Sanchez <i>et al.</i> , 2023
Gengibre (<i>Ziniber officinale</i> Roscoe)	Atividades antimicrobianas, antioxidantes, anti-inflamatórias, anticancerígenas e antidiabéticas	Amalraj <i>et al.</i> , 2022

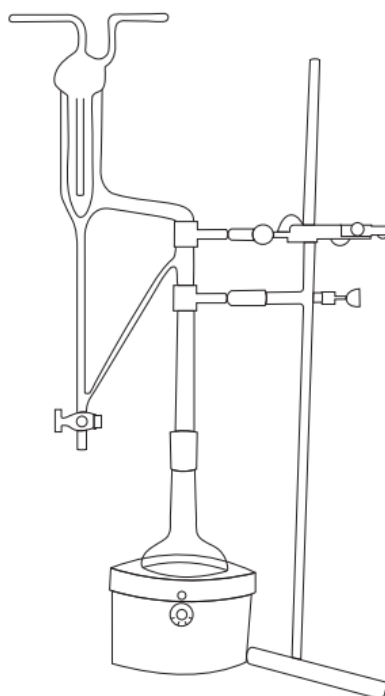
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	Pesticida	Tamer <i>et al.</i> , 2022
Abeto chinês (<i>Abies recurvata</i>)	Atividade antibacteriana	Xiuli <i>et al.</i> , 2022
Alecrim (<i>R. officinalis</i> L.)	Atividade citotóxica, antioxidante e antibacteriana	Zuhairi <i>et al.</i> , 2020

O valor dos óleos essenciais é alto, principalmente devido às suas propriedades e aplicações em diversas áreas. Um fator importante é o método de extração, por vezes até sendo usadas formas de fraude para obtenção de maior lucro (Kampasakaliet *al.*, 2023). O perfil químico dos OEs pode ser afetado por variáveis do cultivo da matéria-prima, como espécie, composição do solo, órgão da planta (partes aéreas, inflorescência ou raízes), idade, estágio do ciclo, método de extração selecionado e condições de extração (Haro-González *et al.*, 2021).

3.4 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

O método mais tradicional de extração de OE é a hidrodestilação, que utiliza o aparelho Clevenger, apresentado na Figura 3. Esse método consiste em um recipiente esférico contendo uma mistura de material vegetal medicinal e solvente (geralmente água). A mistura é aquecida externamente por meio de uma mante térmica, gerando vapores que são condensados no condensador e o OE é coletado (Katekar, Rao, Sardeshpande, 2023).

Figura 3: Sistema de extração de óleo essencial Clevenger



Implicações causadas por métodos tradicionais e/ou pré-tratamentos que gerem resíduos poluentes, como é o caso do solvente orgânico, geralmente possuem baixo rendimento e alto custo. Desse modo, desperta-se o interesse pelo desenvolvimento de tecnologia e do conceito verde, para proporcionar melhorias ao processo (Li *et al.*, 2022). Dao *et al.* (2022) apresentam a comparação de alguns métodos de extração de OEs e constataam que o pré-tratamento por micro-ondas permite melhor eficiência de hidrodestilação, fração de oxigenação, consumo de energia e emissão de CO₂. Os autores também indicaram que a prensagem a frio pode ser inferior ao método de destilação (Dao *et al.*, 2022). Quando é aplicado o pré-tratamento por micro-ondas, por exemplo, melhora o rendimento e a qualidade do óleo essencial obtido de plantas. Além disso, gera economia, pois não utiliza solvente derivado do petróleo (Wei *et al.*, 2022).

O método fluido supercrítico é considerado uma alternativa verde, contribui para a eliminação das etapas de purificação e é capaz de recuperar alguns compostos orgânicos que não são extraídos na hidrodestilação. Por sua vez, a metodologia arraste a vapor fornece economia de energia e limita possíveis modificações dos componentes naturais do OE causadas pela oxidação; entretanto, causa perda das moléculas voláteis e modificações químicas dos componentes do óleo. O método de hidrodestilação assistida por micro-ondas não só contribui para a redução do tempo

de extração, como também melhora a reprodução do aroma natural em comparação com outras técnicas (Silva *et al.*, 2022).

Os pré-tratamentos, como a extração por micro-ondas sem solvente e a extração assistida por enzimas, são estudados para contribuir com a melhoria do processo. O primeiro é uma tecnologia verde que combina o calor das micro-ondas e destilação seca à pressão atmosférica (Abifarín, Otunola e Afolayan, 2020). O segundo, é um pré-tratamento que contribui para o aumento do rendimento, utilizando a água como solvente. A enzima é utilizada para hidrolisar a parede celular e polissacarídeos em materiais vegetais, facilitando a extração dos glóbulos de óleo. Sua aplicação pode ser útil na extração de compostos bioativos, ou seja, compostos fenólicos, antocianinas, flavonoides não antocianínicos e antioxidantes (Majid *et al.*, 2023). Outro exemplo de pré-tratamento é a secagem, que permite preparar o material para o armazenamento e mantém a qualidade química dos princípios ativos, sem que haja a perda dele. Entretanto, a composição dos óleos pode ser influenciada conforme a temperatura utilizada (Borges *et al.*, 2019).

O desenvolvimento de novas tecnologias de obtenção de óleo essencial é fundamental, pois há algumas matérias que não possuem boa performance em técnicas tradicionais, como é o caso do manjeriço. Morsy e Hammad (2020) apresentam que as técnicas tradicionais possuem algumas deficiências, como tempo extenso de extração, além de custos operacionais mais elevados. Visando atender às necessidades econômicas e à qualidade do produto, métodos inovadores são aplicados na extração de OE, como o pré-tratamento com enzimas.

Ao inserir enzimas celulase (pectinase ou hemicelulase) ou complexo enzimático no processo, incluindo uma quantidade considerável de carboidratos, é possível hidrolisar a parede celular, aumentar a permeabilidade da parede celular, aumentar a liberação de óleo e melhorar a eficiência de extração dos compostos-alvo da planta matriz. É possível afirmar que o pré-tratamento enzimático resulta na diminuição do tempo de extração, no aumento do rendimento do óleo essencial e na evitação de alterações desfavoráveis em compostos termolábeis, sendo, portanto, uma alternativa verde para obtenção de óleos essenciais. (Morsy e Hammad, 2020).

3.5 ENZIMAS

As enzimas são capazes de catalisar as transformações biológicas que mantêm a vida na célula, por serem, em sua maioria, proteínas funcionais. Quando se trata de eficiência, especificidade e seletividade, o seu poder é superior ao de catalisadores de meios artificiais. Apesar de sua potência, alguns fatores podem atrapalhar seu desempenho, como temperatura, flutuações de pH, a maioria dos solventes orgânicos e inibidores (Huang *et al.*, 2020).

O papel das enzimas é fundamental para a manutenção das atividades vitais dos organismos. Desenvolvem reações químicas no metabolismo, na nutrição, na conversão de energia, entre outros. Mesmo que haja os tipos de enzimas que são ácidos nucleicos, as proteínas são mais estudadas. Desse modo, a determinação de classe e subclasse é mais bem ajustada. Dispostas pela Comissão de Enzimas, as 7 classes principais, apresentadas na Tabela 3, são utilizadas em diversas áreas de pesquisa (Tao *et al.*, 2020).

Tabela 3: Classes principais e subclasses das enzimas

Classes principais	Subclasses
Oxidoredutases	Atuação no grupo CH-OH, Atuação no grupo CH-NH, Atuação no grupo CH-CH, entre outros.
Transferases	Transferindo carbono, nitrogênio e enxofre, glicosetransferase...
Hidrolases	Atuando nas ligações peptídicas, anidridos ácidos, ligações éster, ligações de nitrogênio...
Liasas	Liasas de fósforo-oxigênio, carbono-oxigênio, carbono- carbono, carbono-enxofre...
Isomerases	Liasas intramolecular, transferases intramoleculares, oxidoredutases intramoleculares, cis-trans-isomerases...
Ligases	Formando ligações de carbono-carbono, carbono-oxigênio, nitrogênio-metal
Translocases	Translocação de próton, aminoácidos, cátion, ânion.

Fonte: Tao *et al.*, 2020

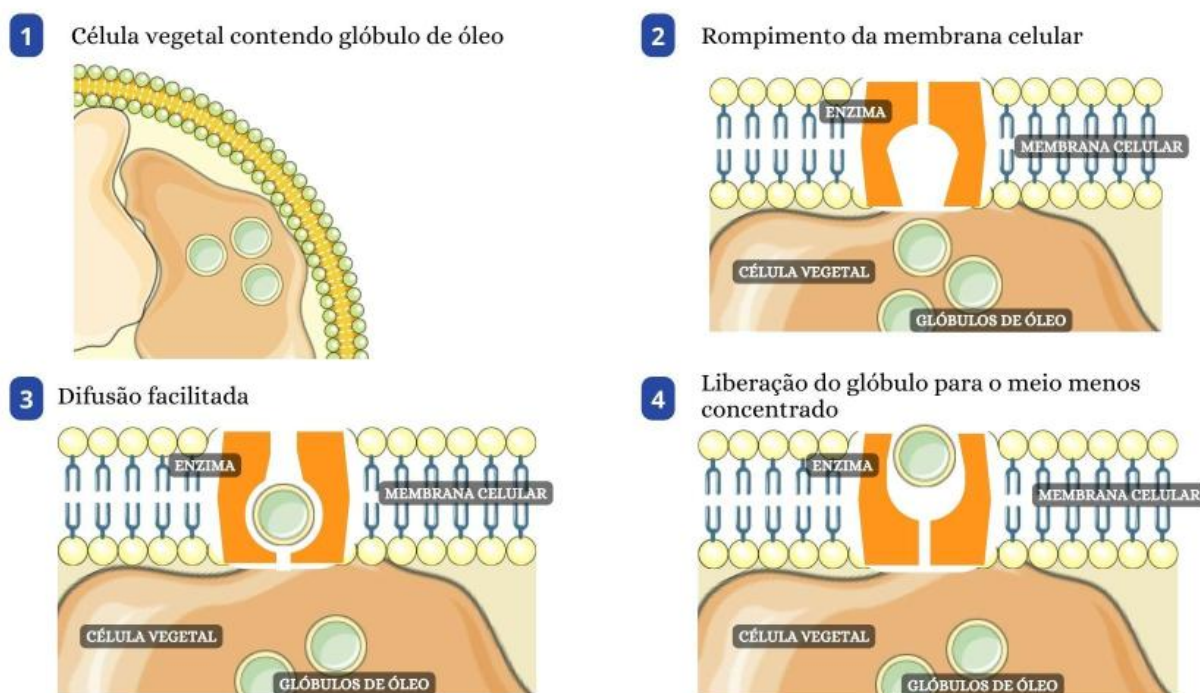
As enzimas podem ser incluídas em diversos processos da indústria, tendo como principais vantagens torná-los seguros, estáveis, confiáveis e biodegradáveis, sendo úteis para a substituição de produtos químicos agressivos. Tornar o processo ecológico e aprimorar a qualidade dos produtos são fatores atrativos para aplicações em áreas como: indústria têxtil para o processamento de diferentes tipos de fibras

(Kumar *et al.*, 2021), agricultura como indicador de qualidade do solo (Datta *et al.*, 2021), aquicultura, inserida em aditivo alimentar (Liang *et al.*, 2022), indústria alimentícia contribuindo com recuperação de óleos e proteínas (Liu *et al.*, 2020).

Destacam-se alguns benefícios da utilização as enzimas, sendo eles: substituição de catalisadores sintéticos em diferentes processos; levam a utilização de menores quantidades de reagentes tóxicos, o que gera menor consumo de energia e menos impactos ambientais; incorporação aos alimentos de forma direta e com segurança; melhoramento da funcionalidade do produto, como textura e aparência; eleva a qualidade nutricional, prazo de validade e segurança dos alimentos; e a geração de novos produtos de interesse comercial como parte fundamental da evolução de determinados processos (Souza e Kawaguti, 2021).

Protease e celulase são vastamente usadas na extração aquosa de óleos. A combinação de celulase e protease contribui para o melhoramento do rendimento do óleo (Liu *et al.*, 2020). Essas enzimas atuam hidrolisando a parede celular da planta, promovendo a dissolução de substâncias intracelulares, reduzindo a perda de componentes bioativos e aumentando o rendimento de compostos-alvo (Yan *et al.*, 2020), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Processo de extração dos glóbulos de óleo facilitado pela enzima.



Fonte: Imagem elaborada com auxílio dos programas Servier Medical Art e Canva.

3.5.1 Pectinase

O grupo complexo e heterogêneo da pectinase atua sobre substâncias pécticas. A pectinase pode ser encontrada comumente em plantas e frutas, fornecendo a rigidez e a estrutura da célula. Essa enzima merece destaque no mercado, pois é essencial para o setor comercial para o rendimento de frutas estáveis e claras. Suas fontes variam entre leveduras, bactérias, fungos e plantas. As modificações enzimáticas e químicas afetam a pectina presente nas frutas. Durante o amadurecimento dos frutos, ocorrem a solubilização da pectina e o amolecimento dos frutos devido à pectinase (Shrestha, Rahman e Qin, 2021).

Por sua estrutura ser complexa, não é totalmente conhecida. Sabe-se que o principal constituinte dos polissacarídeos da pectina é o ácido D-galacturônico. Os demais componentes estruturais e a massa molecular da pectina diferem com sua origem, tipos de células, diferentes estágios de desenvolvimento celular, condição de extração, métodos de extração e a espessura de uma determinada parede celular (Shrestha, Rahman e Qin, 2021).

Segundo Shrestha, Rahman e Qin (2021), essa enzima possui diversas aplicações, que variam desde a fabricação de sucos e frutas, explorados desde a sua descoberta, até a indústria de vinhos, papel e celulose, tratamento de águas residuais, produção de bioetanol, extração de DNA de uma planta. Além das aplicações já citadas, ainda pode ser empregada em ração animal, sacarificação e liquefação de biomassa, maceração e desgomação de fibras vegetais, biolavagem de fibras de algodão, fermentação de café e chá e extração de óleo.

A pesquisa de Ajayi *et al.*, (2021), apresenta alternativa para obtenção de pectinase e sua utilização para obtenção de óleo de coco. Aplicando *Aspergillus niger* em casca de abacaxi para fermentação submersa por 7 dias. A pectinase foi purificada com carvão ativado a 3% foi empregada na extração de óleo de coco e indicou rendimento médio de óleo superior à da pectinase comercial. Além de ter potencializado a extração do produto quando comparada com o método mecânico.

3.5.2 Celulase

A celulase é classificada em endocelulase, exocelulase e β -glicosidasas. Suas aplicações são viabilizadas em amaciamento de algodão, trituração de alimentos, tratamento de águas residuais e produtos farmacêuticos. Ao utilizar essa enzima,

pode ocorrer redução de custo na produção em até 40%, sem impactos negativos. A celulase, quando incluída em processos alimentícios, pode contribuir para reter e manter o sabor, textura e aroma de vegetais e frutas (Tatta *et al.*, 2022).

Sua produção acontece por diferentes gêneros de microrganismos, como bactérias anaeróbias do trato digestivo de ruminantes, bactérias aeróbias, fungos filamentosos e actinomicetos (Souza e Kawaguti, 2021). Essa enzima desempenha um papel essencial na conversão de biomassa, o que desperta o interesse industrial na biotransformação da celulose, mesmo que a sua fabricação de celulose possua custos altos devido ao substrato utilizado na cadeia (Singh *et al.*, 2023). De acordo com Areeshi (2022), o processo para obtenção de celulase envolve vantagens como tecnologia de produção de combustível limpo e verde, gerenciamento e valorização de resíduos, bem como geração de energia comercial de baixo custo para aplicações práticas.

Esse polissacarídeo, considerado o mais abundante na Terra, possui vasta gama de aplicações, como indústrias têxteis, detergentes, couro, alimentos, ração, papel, entre outros (Krishnaswam *et al.*, 2022). Wainer *et al.* (2022), em seu trabalho sobre extração de óleos essenciais de lavanda, apresentam a comparação entre as metodologias de destilação a vapor, hidrodestilação e hidrodestilação assistida por celulase. A constatação dos autores foi que o tempo da extração assistida por celulase foi menor que o dos demais métodos, sendo algo desejável, pois contribui para a redução de custos. O resultado da aplicação dessa técnica também foi de óleos de melhor qualidade e odor doce, tornando-os adequados para perfumes.

4. METODOLOGIA

4.1 AQUISIÇÃO DE MATÉRIA PRIMA

As folhas de jambu foram obtidas no Mercado Municipal Adolpho Lisboa, localizado na Zona Sul da cidade de Manaus. A origem do material é da comunidade Chiborém, localizada a 30 km a noroeste de Manaus, às margens do Rio Negro. Foi realizada a separação de folha e talo (Figura 5a), seguida da higienização, sanitização com solução de hipoclorito de sódio (50 ppm) por 15 minutos (Figura 5b). As partes tiveram tamanho reduzido e congeladas em sacos plásticos, sendo imediatamente congeladas e mantidas a -10 °C até a realização dos experimentos.

Figura 5: Higienização e sanitização, [a] separação do talo e folha; [b] sanitização com solução de hipoclorito de sódio



4.2 DETERMINAÇÃO UMIDADE E CINZAS

A umidade (U, % b.u.) foi determinada com o auxílio de um analisador de umidade com aquecimento por lâmpada de halogênio (Shimadzu Corporation, MOC63u). A calibração deste analisador foi realizada com base no método de referência para determinação de umidade (AOAC, 1995). O analisador de umidade com aquecimento por lâmpada de halogênio realiza a secagem da amostra e mede a perda de massa sob aquecimento com o decorrer do tempo até uma variação mínima de massa entre os tempos de análise da balança. Para a determinação da umidade das folhas, 5 g de amostra e o método denominado de manga seca (padrão do fabricante), que utiliza temperatura de 120 °C e porcentagem de perda de massa de 0,05 %. O teor de cinzas será determinado através de calcinação em mufla a 550 °C, seguindo o método da AOAC (1997).

4.3 TESTES PRELIMINARES

A parte inicial dos testes foi realizada a fim de encontrar um fornecedor em que o produto apresentasse quantidade expressiva de óleo essencial, sendo superior a 0,2 mL. Primeiramente, foram filtrados fornecedores das cidades de Manaus/AM, Altamira/PA, Belém/PA; entretanto, nos jambus de origem paraense não foi obtido

óleo essencial e o fornecedor de Manaus não apresentou quantidade expressiva de OE. A partir de então, foram mapeados 5 fornecedores na Feira do Produtor, localizada na Zona Norte de Manaus, e 12 no Mercado Municipal Adolpho Lisboa (Zona Sul). A quantidade total de testes dos fornecedores pode ser observada na Tabela 4. Essa fase durou cerca de 7 meses (10/2023 a 04/2024), o que interferiu nas análises a serem realizadas no produto das extrações por hidrodestilação.

Tabela 4: Registros dos testes preliminares

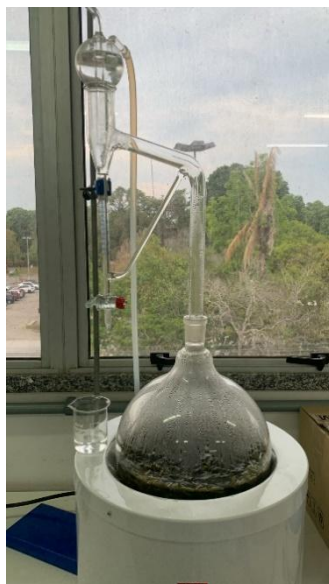
	Local	Mês/Ano	Teste	Resultado (mL)
01	Belém	10/2023	001, 002, 013	≈0,1
02	Altamira - Feira do Produtor	10/2023	003	≈0,1
03	Manaus - Feira do Produtor 1	10/2023	004, 005, 014	Ausente
04	Manaus - MMAL 1	11/2023	006	≈0,2
05	Manaus - MMAL 2	11/2023	007	Ausente
06	Manaus - Feira do Produtor 5	11/2023	008	Ausente
07	Manaus - Feira do Produtor 2	02/2024	009	Ausente
08	Manaus - Feira do Produtor 3	02/2024	010	Ausente
09	Manaus - Feira do Produtor 4	02/2024	011	Ausente
10	Manaus - MMAL 3	11/2023	012	≈0,2
11	Manaus - MMAL 12	04/2024	015	≈0,1
12	Manaus - MMAL 7	04/2024	016	Ausente
13	Manaus - MMAL 10	04/2024	017	Ausente
14	Manaus - MMAL 5	04/2024	018	Ausente
15	Manaus - MMAL 13	04/2024	019	Ausente
16	Manaus - MMAL 4	04/2024	020, 024, 025	Ausente
17	Manaus - MMAL 8	04/2024	021	Ausente
18	Manaus - MMAL 9	04/2024	022	Ausente
19	Manaus - MMAL 11	04/2024	023	Ausente

MMLA= Mercado Municipal Adolpho Lisboa

4.4 EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU

A extração de óleo essencial na hortaliça ocorreu por meio do processo de hidrodestilação, utilizando o equipamento Clevenger (Figura 6). O design do extrator é calculado para operar em um sistema fechado, sendo concebido com base em cálculos hidrodinâmicos para manter o equilíbrio do sistema durante todo o procedimento de extração. A extração do óleo essencial foi baseada no trabalho de Reis *et al.* (2020) estudaram a extração enzimática de óleo essencial de gengibre. Variando o tempo conforme a constância do volume e a separação do óleo sendo feita por liofilização.

Figura 6: Modelo base de extrator de óleos essenciais.



As folhas de *Acmella oleracea* foram secas em estufa com circulação de ar (marca Nova Ética) por cerca 40 h a 40 °C e posteriormente triturada em moinho de modelo LUCA-226/2 da marca LUCADEMA, para seguir para a extração do óleo essencial. Com o intuito de otimizar o processo de extração do óleo essencial, foi avaliado o efeito do tempo e da razão mássica água/biomassa na massa de óleo essencial extraído. Com a condição de razão mássica de 20%, o volume de extração foi verificado de 0 h a 5 h para observar a influência do mesmo sobre a quantidade de óleo produzido, por meio da cinética obtida pela Equação 1.

$$Teor\% = \frac{g(\text{massa de óleo})}{g(\text{massa de biomassa foliar fresca})} \times 100 \quad (1)$$

Para a separação de óleo e água, o material foi submetido ao processo de liofilização para posterior caracterização por cromatografia gasosa e demais análises.

4.4 EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU COM PRÉ-TRATAMENTO ENZIMÁTICO

Do mesmo modo que na hidrodestilação comum, o material foi previamente seco e triturado, e então seguiu o pré-tratamento enzimático, no qual foi estudada a influência da porcentagem de enzima na concentração de sólidos de 20% para todos os experimentos. O resultado corresponde ao rendimento (%) do processo de extração.

Foram empregadas as enzimas celulase e pectinase. As concentrações utilizadas para avaliar o efeito enzimático foram de 0,1%, 0,3% e 0,5%, que apresentam atividade enzimática de 700 Ug-1 de atividade EGU para Celluclast® 1.5L

e 3800 Ug-1 de atividade PGNU para Pectinex® Ultra SP-L. Após a adição da concentração de enzimas no balão de fundo redondo contendo o jambu e água, o material seguiu para banho-maria (representado na Figura 7) a 50 °C, para celulase, ou 45 °C, quando pectinase. Passado o tempo de 60 min, o procedimento segue para a hidrodestilação em aparelho Clevenger. As amostras foram codificadas como JEC 0,1 (pré-tratamento com celulase à concentração de 0,1%), JEC 0,3 (pré-tratamento com celulase à concentração de 0,3%), JEC 0,5 (pré-tratamento com celulase à concentração de 0,5%), JEP 0,1 (pré-tratamento com pectinase à concentração de 0,1%), JEP 0,3 (pré-tratamento com pectinase à concentração de 0,3%), JEP 0,5 (pré-tratamento com pectinase à concentração de 0,1%).

Figura 7: Pré-tratamento enzimático durante processo térmico em banho-maria.



4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA BIOMASSA UTILIZADA EM EXTRAÇÃO COM PRÉ-TRATAMENTO

A caracterização das folhas de jambu com e sem pré-tratamento é de amostras retiradas antes e após a hidrodestilação, secas a 40 °C por 3 h. Essa análise foi realizada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permite a caracterização morfológica e a observação das mudanças na estrutura após a atuação da enzima. A análise foi feita em um microscópio eletrônico de varredura (JEOL, JSM – IT500HR), pertencente ao Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos da Universidade do Estado do Amazonas (CMABio-UEA).

Figura 8: Microscópio Eletrônico de Varredura, JEOL, JSM – IT500HR



4.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO ÓLEO ESSENCIAL SEM E COM PRÉ-TRATAMENTO ENZIMÁTICO

A análise química do óleo essencial foi realizada utilizando o equipamento de cromatografia em fase gasosa acoplada à espectrometria de massas – CG-MS, apresentado na Figura 8 (Nexis GC2030, GCMS- QP2020 NX, Shimadzu), instalado na Central Analítica do IFAM. A análise cromatográfica foi realizada utilizando o CG-EM equipado com coluna capilar de sílica fundida SH-RTx-5Sil-MS (30 m x 0,25 mm, espessura de filme de 0,25 μm). As temperaturas do injetor e do detector foram de 250 °C e 260 °C, respectivamente; hélio como gás de arraste (1,0 mL/min); corrida com temperatura de 60 °C a 250 °C com taxa de 3 °C/min. Proporção de divisão 1:50 e 1,0 μL de solução de hexano. A energia de ionização foi de 70 eV e a faixa do espectro de massas foi de 40 a 420. A análise dos óleos essenciais por GC-MS foi realizada com base na comparação de seus índices de retenção e espectros de massas com dados previamente publicados e bibliotecas como a WILEY 275 e o National Institute of Standards and Technology (NIST 3.0).

Figura 9: Equipamento de Cromatografia em Fase Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas.



4.7 ENSAIO DE ATIVIDADE DE REDUÇÃO DO RADICAL DPPH

As atividades de eliminação de DPPH (2,2-difenil-2-picril-hidrazila) dos óleos foram determinadas com o protocolo radical DPPH (Farias *et al.*, 2019). As diluições do óleo essencial de jambu foram de 5, 20 e 35 mg mL⁻¹, reparadas com metanol. 30 µL das soluções de óleo essencial foram misturados com 100 µL de solução DPPH; para o controle, a solução do óleo foi substituída por metanol. A absorbância das amostras e controles foi medida a 517 nm imediatamente após os tempos de 10, 20, 30 e 40 min, conservados no escuro à temperatura ambiente até a leitura no UV-M51. A porcentagem da atividade de eliminação de DPPH foi calculada de acordo com a fórmula:

$$\% \text{ DPPH Scav. Act.} = [(A_{\text{Controle}} - A_{\text{Amostra}}) / A_{\text{Controle}}] \times 100.$$

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise antioxidante foi avaliada estatisticamente através do software Statistica (Statsoft, versão 7.0, USA). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). As médias serão comparadas através do teste de *Tukey*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA FOLHA DE JAMBU

Os resultados observados nas análises físico-química do jambu são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Composição físico-química da folha de jambu.

Análise	Média (%) $\pm$ Desv. Pad.
Cinzas	1,39 $\pm$ 0,04
Umidade*	86,83 $\pm$ 1,11
Umidade**	7,03 $\pm$ 0,03

*base úmida

**base seca

Em hortaliças, a água pode constituir de 80 a 95% do alimento. Os valores de umidade em base úmida são semelhantes aos encontrados por Barbosa *et al.*, 2014 (89,98%), IBGE, 2011 (89%). Pires e Silva (2020) estudaram o cultivo convencional e hidropônico e tiveram valores pouco mais elevados, 90,78% e 90,84%, respectivamente. Valores elevados de umidade contribuem para o crescimento de micro-organismos e para ser um alimento muito perecível; por isso, a importância do processo de secagem.

Há poucos dados na literatura referentes aos resíduos inorgânicos da *Acmella oleracea*. Entretanto, Gomes et al. (2022) apresentam os valores de cinzas para variados estados da matéria (folhas frescas, espuma, folhas secas e espuma seca), sendo a massa in natura o percentual de 1,34% de matéria inorgânica, conforme o estado da matéria-prima. Para o jambu *in natura*, seu resultado foi de 1,44%, valor semelhante ao obtido neste trabalho. Enquanto para o jambu seco em três diferentes temperaturas o autor encontrou variância entre 16,49% e 17,42%. Outro exemplo é o resultado de Barbosa *et al.* (2014), que obteve 1,6% na análise de cinzas de jambu *in natura*.

5.2 TESTES PRELIMINARES

Os testes realizados foram fundamentais para estabelecer um provedor da hortaliça do estudo, pois estabeleceu-se uma fonte fixa e segura para todo o estudo. Após a definição do fornecedor, ainda havia dificuldade de retirada do óleo essencial

do aparelho Clevenger, devido a quantidade de extração em média ser entre 0,1 e 0,2mL (rendimento aproximado de 0,006% e 0,01%), ainda que estivesse sendo usadas quantidades de biomassa *in natura* o rendimento obtido estava abaixo do comum de outros materiais semelhantes, que podem variar de 0,2 a 2% como os exemplos a seguir: *Verbesina macrophylla*, 0,33% (Veras *et al.*, 2021), *Varronia curassavica* 0,5% (Tonial *et al.*, 2020), *Citrus sinensis* 0,31% (Ngan *et al.* 2020), *Eucalyptus globulus*, 1,65% (Ngo, 2020). A abordagem seguida foi a secagem prévia do material, para que houvesse concentração do material utilizado na hidrodestilação. Os parâmetros usados foram: secagem a 40 °C por 48 h, hidrodestilação por 4 h com 20% de concentração de biomassa (Shaw *et al.*, 2023). Desse modo, foi definido o protocolo para extração de óleo essencial de jambu por hidrodestilação.

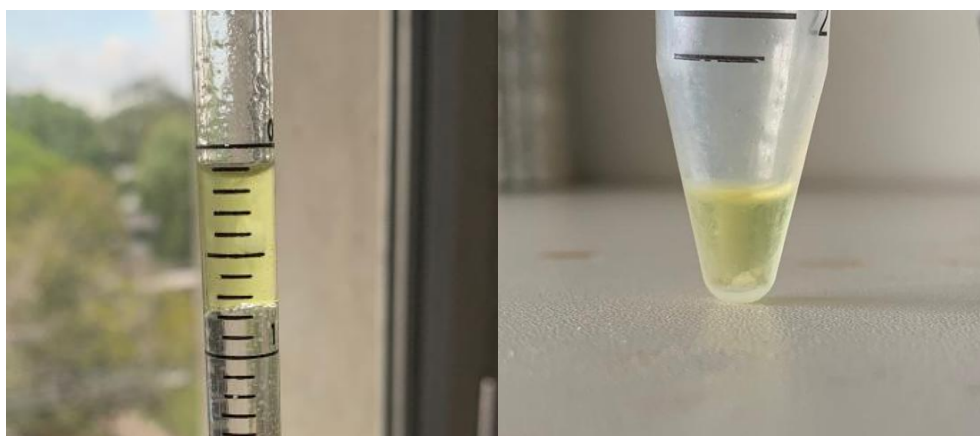
5.3 RENDIMENTO ÓLEO ESSENCIAL DE JAMBU

A hidrodestilação das folhas e talo da *Acmella oleracea* forneceu óleo levemente viscoso, coloração amarelada e aroma característico das folhas ressaltado, como apresentado na Figura 10. O rendimento da extração de óleo essencial sem e com pré-tratamento pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6: Rendimento de óleo essencial extraído de folhas de jambu com diferentes concentrações de enzimas celulase e pectinase.

Experimento	Controle - Sem PTT (%)	Concentração 0,1% (%)	Concentração 0,3% (%)	Concentração 0,5% (%)
Celulase	0,06	0,09	0,10	0,07
Pectinase	0,06	0,07	0,08	0,07

Figura 10: Óleo essencial de jambu



Fonte: Autor, 2025

Ao aplicar as enzimas no processo, aumentamos o rendimento em 66,67% com a adição da celulase e 33,33% com a pectinase. Ao buscarmos na literatura, encontramos valores de rendimento semelhantes ao aplicar enzimas. Miljanovic *et al.* (2020) exploraram três espécies: alecrim, sálvia e folha de louro. Para o primeiro, obteve melhoria de 30% e 40% ao aplicar no pré-tratamento as enzimas celulase e pectinase, respectivamente. Os resultados da sálvia foram ainda melhores, 50% e 52% para os mesmos tratamentos. O maior destaque foi para a folha de louro que obteve 60% e 52% ao adicionar as enzimas celulase e protease ao processo. Taktak *et al.* (2021), ao estudar as cascas de *Citrus sinensis* aplicando de coquetel enzimático com celulase, pectinase e hemicelulase, obtiveram resultados superiores, obtendo 93,15% de taxa de crescimento em relação à extração sem pré-tratamento.

Outros processos também apresentam progresso ao serem utilizados na extração de óleo essencial, como é o caso de pré-tratamento enzimático e da extração por micro-ondas sem solvente. Wei *et al.* (2022) encontraram rendimento 26,09% maior que a hidrodestilação convencional em folhas frescas de *Pelargonium graveolens* L'Herit. Fato explicado pela facilitação do rompimento da estrutura celular da planta causado pela hidrólise enzimática e pela radiação enzimática. Apesar de ter combinado esses dois tratamentos não tradicionais, a hidrodestilação do jambu com celulase, como apresentado anteriormente, foi superior à de Wei *et al.* (2022). Ngan *et al.* (2020) aplicaram apenas o micro-ondas sem solvente e obtiveram uma taxa de crescimento de 25,81% e estudaram a obtenção de óleo essencial de laranja.

Os dados sobre óleo essencial de *Acmella oleracea* são escassos, porém Spinozzi *et al.* (2021) estudaram esse bioproduto aplicando a metodologia de micro-ondas na extração do OE. O rendimento obtido foi de 0,22% para a hidrodestilação e 0,47% para a assistida por micro-ondas, sendo uma taxa de crescimento de 113,64%. A celulase geralmente melhora mais o rendimento quando a estrutura que aprisiona os óleos é rica em celulose/fibrilas de celulose ou quando as condições de tratamento (pH, temperatura, tempo, concentração enzimática) favorecem a atividade celulolítica. Por isso, a celulase se desempenha de melhor forma que a pectinase, que age na pectina e só será tão eficaz quanto a pectina for o componente limitante da parede celular.

5.3.1 Cinética

O estudo da extração de óleos essenciais fornece ferramentas importantes para a escolha das condições operacionais mais adequadas, que garantam a eficiência do processo. Por meio dos gráficos de taxas de rendimento, apresentados nas Figuras 11 e 12, podemos observar a evolução da quantidade de óleo, conforme o passar do tempo.

Figura 11: Cinética de hidrodestilação das amostras controle e pré-tratamento com celulase

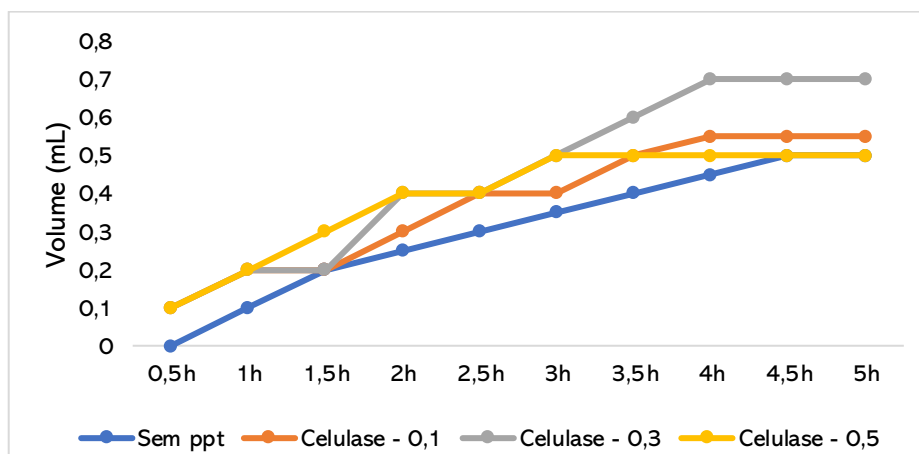
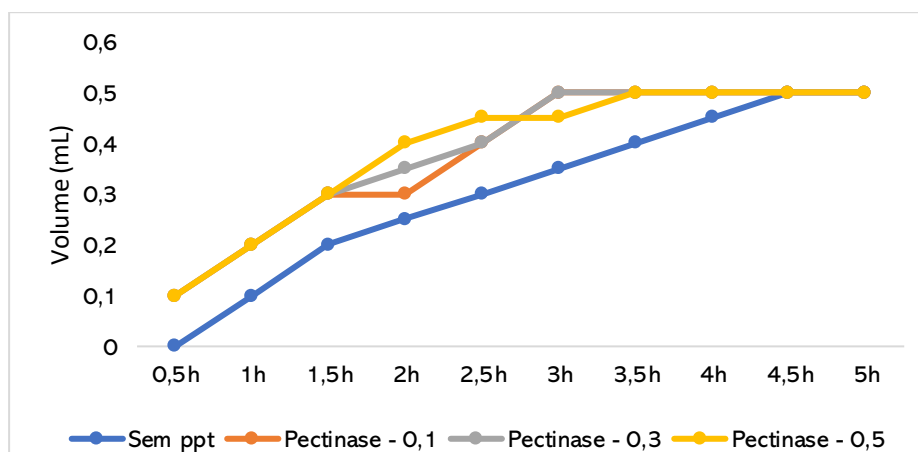


Figura 12: Cinética de hidrodestilação das amostras controle e pré-tratamento com pectinase



Os resultados mostraram que a concentração de 0,3% obteve constância e maior rendimento dentre as amostras com celulase. Já para pectinase, obteve a mesma performance em apenas 3 h. Ainda que na literatura haja metodologias para duração de 3h da hidrodestilação (Morshrdloo *et al.*, 2021; Bakar *et al.*, 2022; Morsy e Hammad, 2021; Ghavam *et al.*, 2021), se faz necessária a observação de tempo mais elevados pois o volume pode ser alterado (Tereza-Martínez *et al.*, 2022), como foi o caso do controle, que obteve seu melhor rendimento após 4,5h.

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica versátil que possibilita a observação das morfologias que constituem os materiais. Aqui, especificamente, foi possível avaliar o impacto do pré-tratamento na extração do OE, através da análise morfológica das folhas antes da hidrodestilação e do material resultante do processo de extração, conforme mostram as Figuras 13 e 14.

Na Figura 13 são observadas estruturas com fissuras nas amostras após a hidrodestilação, que podem ter sido causadas pela liberação do óleo essencial. Ao relacionarmos as amostras com e sem pré-tratamento, é possível observar o impacto da ação enzimática no processo de extração do OE. Estando também evidente ao verificarmos a amostra controle e com pré-tratamento (Figura 12). Todas as imagens expostas estão em lente 600 $\times$, o que gera a proximidade de 20 μm .

A Figura 12 (20 μm ; 600X) mostra a morfologia da folha após o pré-tratamento, revelando uma superfície com poros na superfície lateral (Figura 13 [b], [c] e [d]). Figuras 12 [e], [f] e [g] apresentam a vista frontal dos estômatos presentes na folha, dispostos ao longo de uma superfície não plana resultante do procedimento de secagem combinado com a influência da enzima. A partir das imagens do material resultante do processo de extração, foi possível verificar mudanças significativas em sua morfologia, quando comparada com as folhas secas.

Figura 13: Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras antes da hidrodestilação [a] controle, [b] JEC 0,1; [c] JEC 0,3; [d] JEC 0,5; [e] JEP 0,1; [f] JEP 0,3; [g] JEP 0,5

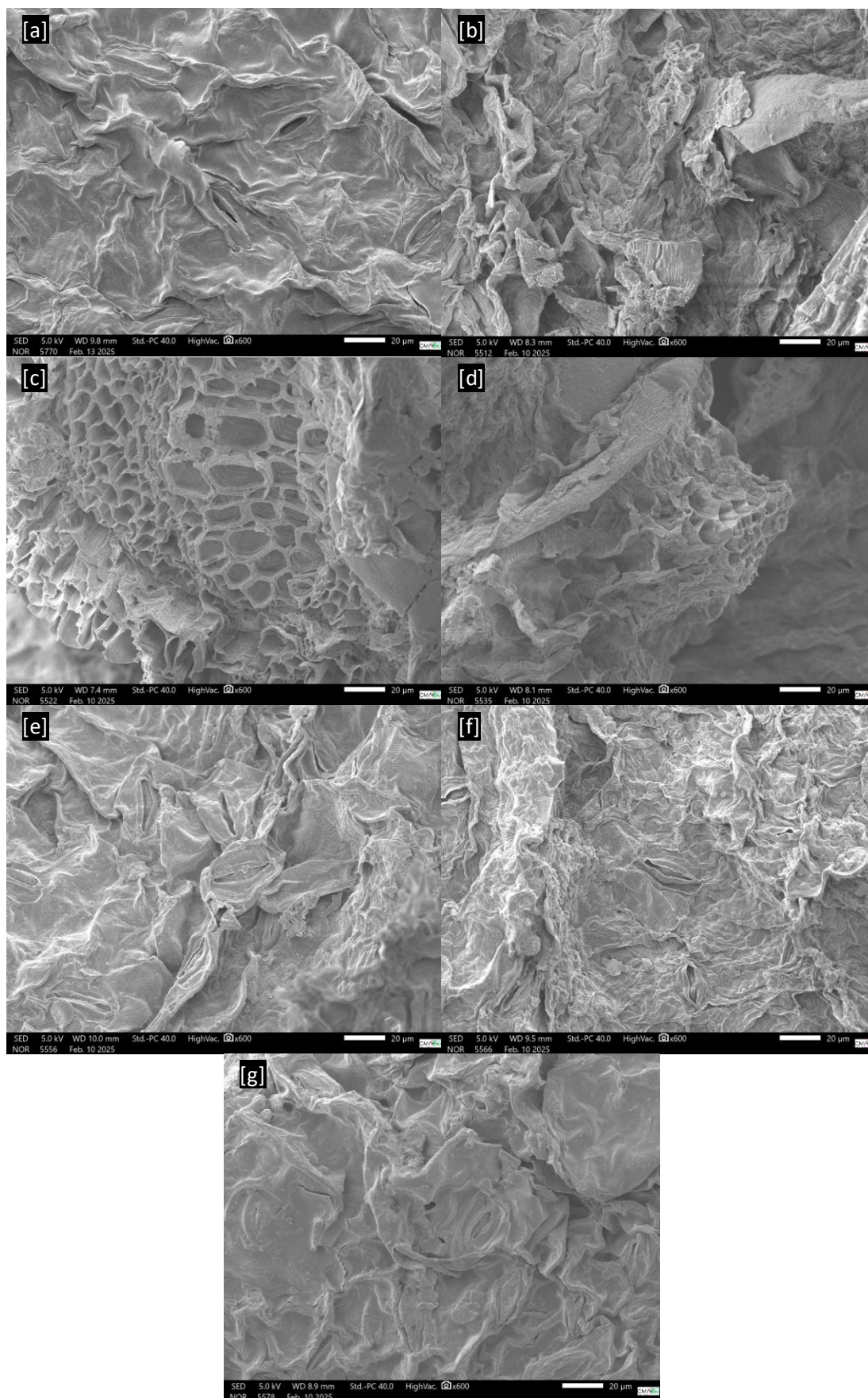
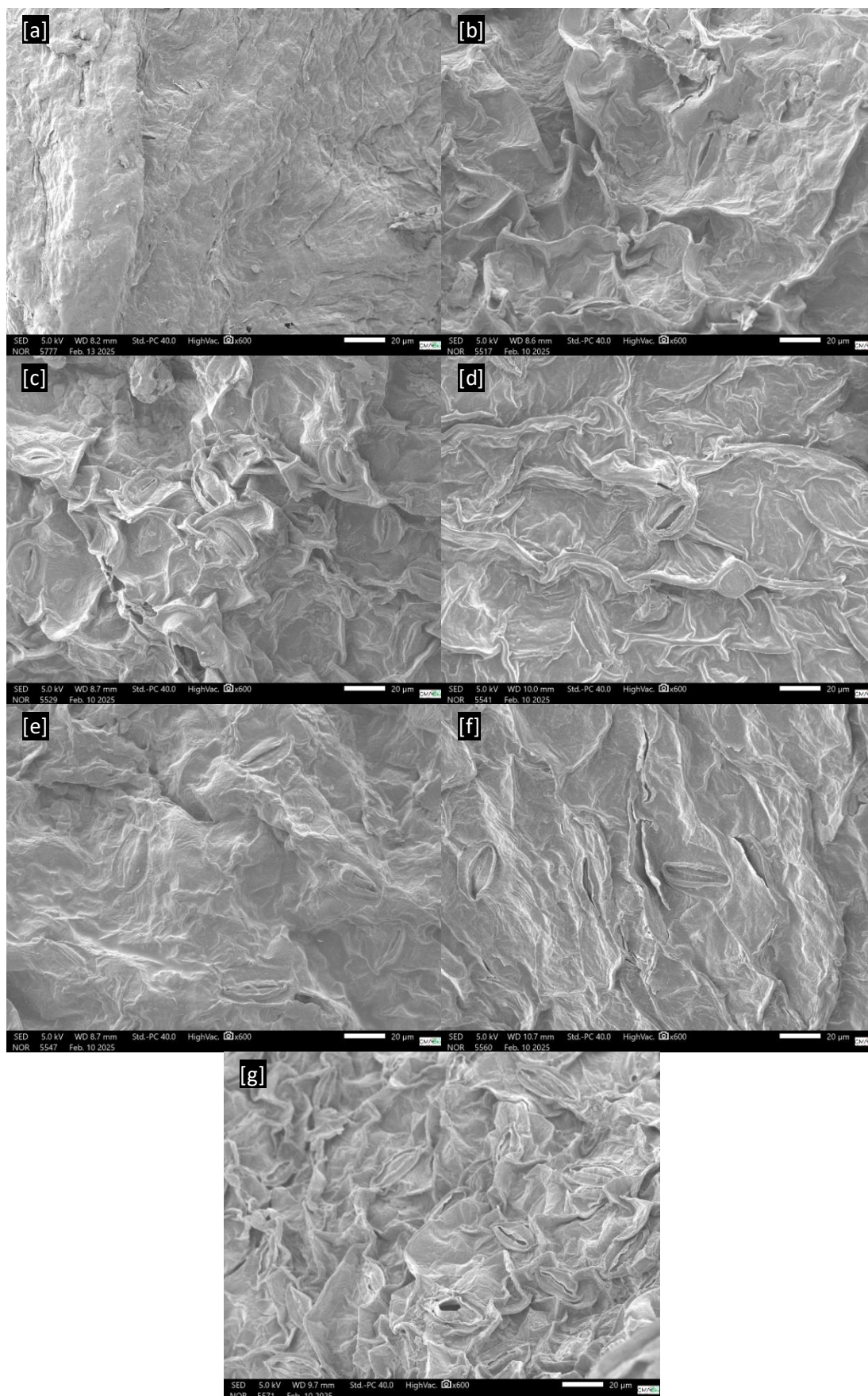


Figura 14: Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras após hidrodestilação [a] controle, [b] JEC 0,1; [c] JEC 0,3; [d] JEC 0,5; [e] JEP 0,1; [f] JEP 0,3; [g] JEP 0,5



Na literatura, não encontramos muitos estudos sobre morfologia da biomassa de extração de OE; entretanto, Gomes (2020) estudou características físicas de *Piper hispidum* e encontrou poros na superfície lateral. O autor destaca a superfície rugosa e os estômatos presentes na folha, dispostos ao longo de uma superfície não plana. A secagem em estufa com circulação forçada de ar, produzindo uma atmosfera de 50% de umidade relativa a 45 °C por 48 h, foi a causa dos estômatos.

Sobre a morfologia do jambu, Gomes, Sousa e Resende (2020) expõem dados de farinha de jambu. As partículas apresentaram-se irregulares e desuniformes, como é característica de material vegetal, que podem ter sido agravadas pelo processo de secagem, trituração das folhas antes e depois de secas, temperatura de secagem, composição química e estrutural do material. Temperaturas mais altas agredem mais a estrutura, como foi o caso do material seco a 80 °C, que evidenciou mais irregularidades e rugas.

Diante dos resultados obtidos na análise da estrutura antes e após a hidrodestilação de cada tratamento, observou-se que a estrutura sofreu alteração conforme a adição de enzima e a quantidade utilizada. Estes resultados podem ser confrontados com os resultados da cromatografia, que apresentou também mudança em sua composição em relação à amostra sem o pré-tratamento enzimático.

5.5 CROMATOGRAFIA (CG-MS)

Por meio da análise CG/MS, identificaram-se 42 constituintes com índice de similaridade acima de 90, como observado na Tabela 7. De modo geral destacam-se Cariofileno, β -Cubebeno, e Óxido de cariofileno por serem predominantes nas amostras controle e com pré-tratamento enzimático. Spinozzi *et al.* (2021), em seu estudo sobre óleo essencial de jambu, destacam, germacreno, Cariofileno, mirceno e β -pineno. Em comum ao nosso estudo foram encontrados: cariofileno, humuleno, germacreno, copaeno, biciclogermacreno, α -farneseno e óxido de cariofileno.

Tabela 7: Composição química dos constituintes do óleo essencial de Jambu

	Nome do metabólito	Área (%)						
		Controle	JEC 0,1	JEC 0,3	JEC 0,5	JEP 0,1	JEP 0,3	JEP 0,5
1	β -Cubebeno	-	22,66	35,25	29,65	29,26	35,76	-
2	Espatulanol	-	1,13	-	1,64	1,44	-	0,94
3	2-Hexadecen-1-ol, 3,7,11,15-tetrametil	-	11,05	-	4,69	-	-	-
4	2-Tridecanona	-	-	-	0,8	-	-	-
5	β -Copaen-4 α -ol	-	23,09	-	-	-	-	43,57
6	γ -bisboleno	-	-	-	-	-	-	2,42
7	α -Sprigene	-	3,72	2,35	1,97	2,3	3,16	2,31
8	1,1,4,8-tetrametil-cis,cis,4,7,10-cicloundecatrieno	4,35	-	-	-	-	-	-
9	1,4,7,-Cicloundecatrieno, 1,5,9,9-tetrametil-, Z,Z,Z-	-	2,33	-	3,63	-	-	-
10	Geranilinalol	-	1,25	-	-	-	-	11,71
11	(1S,5S,7R)-10,10-dimetil-3,4-diazatriciclo[5.2.1.01,5]decan-2-ona	0,42	-	-	-	-	-	-
12	14-Hidroxicariofileno	0,63	-	11,65	-	-	-	7,16
13	4,8,13-Ciclotetradecatrieno-1,3-diol, 1,5,9-trimetil-12-(1-metiletil)-	0,42	-	-	-	-	-	-
14	Geranilacetona	-	0,81	-	1,37	1,02	-	-
15	6-Isopropenil-4,8a-dimetil-1,2,3,5,6,7,8,8a-octahidronaftaleno-2-ol	0,27	-	-	-	-	-	-
16	Hidrato de 7-epi-trans-Sesquisabineno	-	-	-	2,32	2,06	-	-
17	Biciclogermacreno	2,12	-	-	-	-	-	-
18	Cariofileno	30,62	23,49	42,07	30,53	30,51	35,97	19,29
19	Óxido de cariofileno	18,97	25,78	-	19,55	18,46	10,28	-
20	Clorpirifós	-	-	-	-	-	-	2,01
21	Copaeno	0,34	-	-	-	-	-	-
22	α -Bisabolene	-	-	-	-	0,81	-	-
23	Shyobunol	-	1,29	-	-	-	-	-
24	Elixene	-	-	-	-	-	2,08	2,33
25	Geranilacetona	1,39	-	-	-	-	-	-

26	Humuleno	-	2,19	3,51	-	3,21	3,77	2,13
27	Humuleno epóxido II	0,88	1,29	-	-	-	-	-
28	Cetona de menta	0,77	-	-	-	-	-	-
29	Neofitadieno	-	11,61	4,24	-	5,19	-	5,85
30	n-Pentadecanol	0,38	-	-	-	-	-	-
31	Decanoato de fitila	2,38	-	-	-	-	-	-
32	Ylangenal	0,43	-	-	-	-	-	-
33	α -Bisaboleno	1,08	-	-	-	-	-	-
34	α -Cadinol	0,86	1,88	-	-	-	-	1,87
35	α -Farneseno	1,02	1,98	2,34	1,45	2,21	2,31	1,96
36	α -Springene	0,86	-	-	-	-	-	-
37	β -Cadineno	1,02	-	-	-	-	-	1,58
38	β -Copaene-4 α -ol	25,62	-	-	-	-	-	-
39	β -Germacrene	0,31	-	-	-	-	-	-
40	β -Oloopenona	2,48	3,43	-	2,83	2,74	2,01	3,31
41	γ -Bisaboleno	0,83	-	-	-	-	-	-
42	τ -Muurolol	-	-	-	-	1,22	-	-

Os componentes identificados apontam o potencial do óleo essencial de jambu para atividades anti-inflamatórias, antiagregantes, antioxidantes, antimicrobianas, analgésicas, anticancerígenas, antifúngicas devido a possuir componentes com tais propriedades. Como é o caso do cariofileno que demonstra atividades analgésicas, antioxidantes, anticancerígenas, hepatoprotetoras, imunomoduladoras, antimicrobianas e anti-inflamatórias (Machado *et al.* 2018; Gyrzymova e Rubtsova, 2022). Esse componente apresenta baixa solubilidade em água, o que reduz sua absorção pelas células em meios aquosos, como os fluidos biológicos. Esse composto é um componente ativo relevante presente em óleos essenciais extraídos de diversas especiarias e plantas alimentícias. Irrera *et al.* (2020), em seu estudo sobre os efeitos do cariofileno em um modelo *in vitro* de glioblastoma, constataram que esse componente pode ser considerado um inibidor de mecanismos de proliferação celular em cânceres invasivos como o glioblastoma, graças à modulação do sistema canabinoide. Apesar do fato de que o potencial translacional deste estudo pode estar relacionado ao uso de células cancerígenas humanas, investigações adicionais serão realizadas para confirmar os resultados obtidos *in vitro*.

O segundo componente de maior significância é o β -cubebeno, um sesquiterpeno encontrado como componente minoritário em diversos óleos essenciais de plantas como vietnâmica *Ocimum gratissimum* L. (Houng *et al.*, 2020), manjeriçãodoce *Ocimum basilicum* L. (Semenova *et al.*, 2022), vietnamita *Mikania micrantha* Kunth (Nguyen *et al.*, 2023), *Artemisia annua* (Hong *et al.*, 2023). Suas propriedades ainda não são bem específicas na literatura científica. A maioria dos estudos concentra-se nos efeitos dos óleos essenciais como um todo, sem isolar a atividade desse composto. Por outro lado, sua presença atribui aroma agradável traduzido como frutado e cítrico (Freitas *et al.*, 2020).

Podemos destacar também o óxido de cariofileno, que esteve presente em 5 das 7 amostras com percentual de área entre 10 e 25%. Esse componente é comum em óleos essenciais, entretanto, com baixas concentrações. Como encontrado no óleo essencial de jaboticaba – 5,4% (Tedesco *et al.*, 2020), óleo de copaíba – entre 0,13 e 5,21% (Lima *et al.*, 2020), *Aloysia aloysioides* Loes – 5,98% (Miranda *et al.*, 2021), *Smallanthus parviceps* – 3,53% (Ordóñez *et al.*, 2020). Entretanto, há registro de trabalhos que encontraram valores mais altos, como no óleo essencial de *Syzygium Cumini* estudado por Xavier, Binhara e Ferreira (2021) que obteve área de 15,55%. O óxido de cariofileno, se combinado com o limoneno, possui atividade tripanocida, ou seja, atua sobre o protozoário *Trypanosoma cruzi* (Carvalho *et al.*, 2023). Uma das suas propriedades é a atividade fungicida, antimicrobiana e anticolinesterase (Xavier, Banhara e Ferreira, 2021; Maciel *et al.*, 2023).

Alguns dos componentes estão presentes nos OE com pré-tratamento, mas não são encontrados na amostra controle, como é o caso de α -Sprigene e Copaeno. Onde o primeiro também foi apresentado nos estudos de Ragavendran *et al.* (2024) sobre óleo essencial de *Ocimum tenuiflorum* L. extraído por destilação a vapor e Almutairi *et al.* (2022) que estudaram o óleo de olíbano. Na literatura identificamos o α -Farneseno no óleo essencial de *Vismia guianensis* (Barbosa, 2022), *Schinus molle* (Filho, Sousa e Castro, 2020) e *Croton* Sp. (Batista e Santos, 2021), todos extraídos por hidrodestilação.

Podemos destacar outros componentes que tiveram incidência na maioria das amostras, como β -Oloopenona e α -Farneseno. Conforme a literatura, o β -Oloopenona está presente nos óleos essenciais de *Tripleurospermum conoclinium* (Servi, Sem e Dogan, 2020), *Thottea grandiflora* (Silleh e Khamis, 2021), flores de *Chamaemelum*

nobile (El-Assri *et al.*, 2025), obtidos por hidrodestilação em aparelho Clevenger. O α -Farneseno também é recorrente em outros óleos essenciais, como por exemplo: *Piper dilatatum* (Vasconcelos *et al.*, 2023), *Casearia sylvestris* (Oliveira, Pezzi e Silva, 2022) e *Zingiber officinale* (Ataide *et al.*, 2020).

5.5 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO ÓLEO ESSENCIAL

Os antioxidantes combatem os efeitos destrutivos dos danos dos radicais livres que estão presentes em nosso ambiente. Neste estudo utilizou-se o agente radical 2,2-difenil-2-picril-hidrazila (DPPH) para analisar o efeito da eliminação de radicais livres. As porcentagens de inibição do óleo essencial de jambu foram determinadas em um intervalo de 10 a 40 min usando três concentrações: 5 $\mu\text{g/mL}$, 20 $\mu\text{g/mL}$ e 35 $\mu\text{g/mL}$. Os resultados ilustrados nos gráficos apresentados nas Figuras 15, 16 e 17 revelam o poder de eliminação de radicais DPPH. Pode-se observar que sua atividade aumentou gradualmente com o aumento da concentração e do tempo. O potencial antioxidante foi considerado o máximo com 85,37% de eliminação de radicais livres a 35 $\mu\text{g/mL}$ da amostra JEC 0,3.

Figura 15: Atividade antioxidante do óleo essencial de *Acmella oleracea* contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 5 $\mu\text{g/mL}$

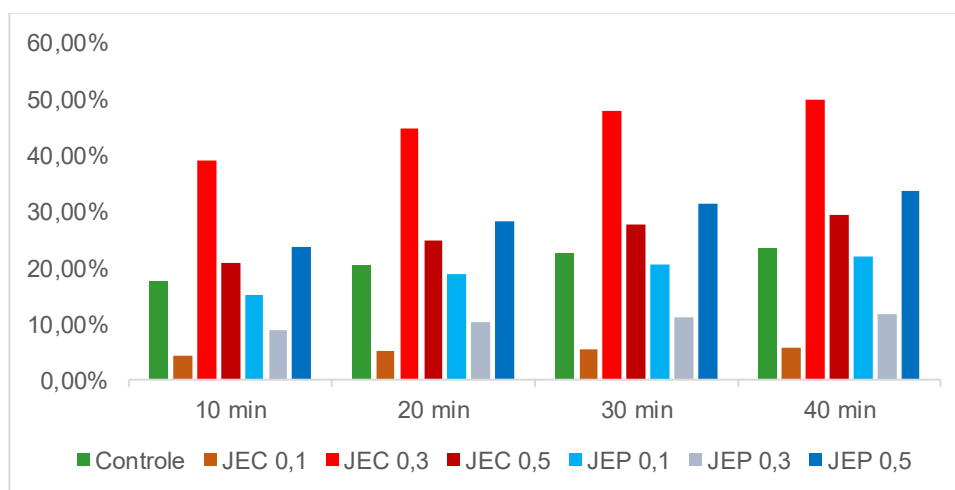


Figura 15: Atividade antioxidante do óleo essencial de *Acmella oleracea* contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 20 µg/mL

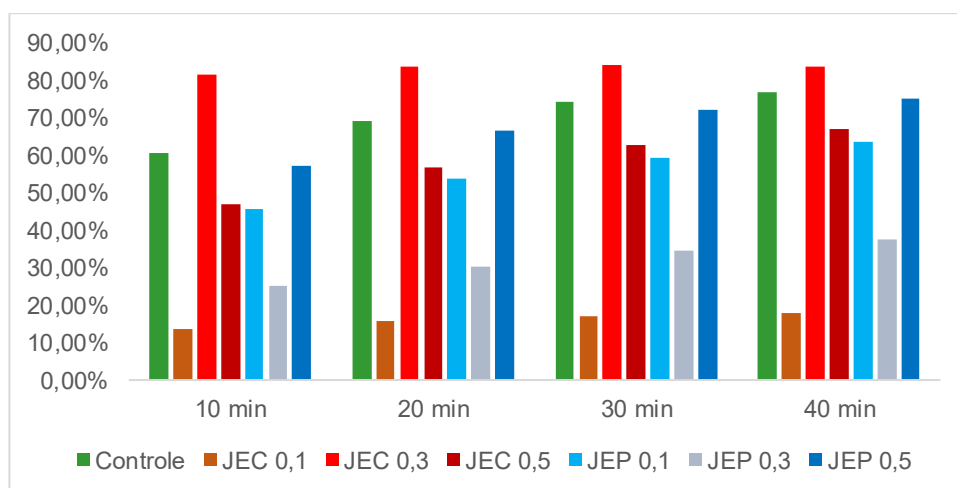
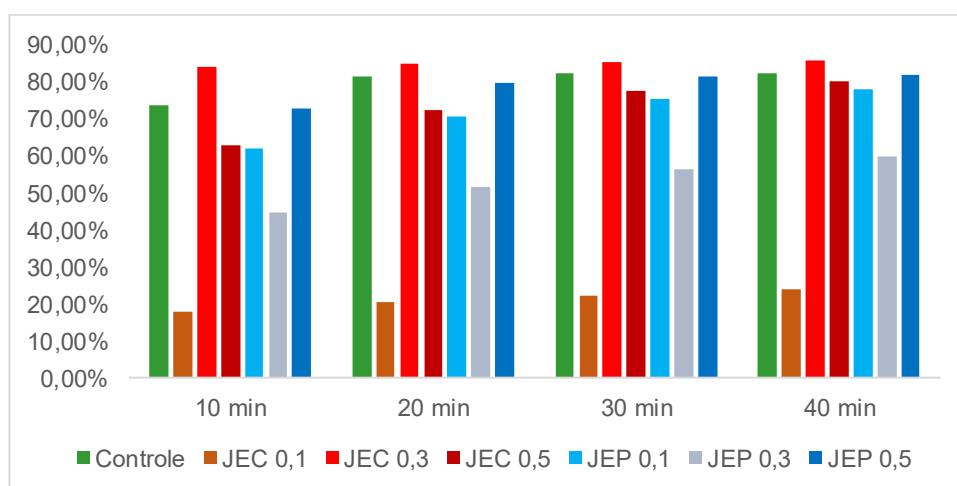


Figura 16: Atividade antioxidante do óleo essencial de *Acmella oleracea* contra radicais hidroxila 2,2-difenil-1-picril-hidrazila na concentração 35 µg/mL



Teresa-Martínez *et al.* (2022), em seu estudo sobre óleo essencial de cardamomo, obtiveram resultados de atividade antioxidante entre 62,28% e 68%. O seu desempenho em relação ao controle aumentou 19,3%, apontando para o tratamento com queda de pressão controlada instantânea na extração de óleo essencial de cardamomo, que é uma forma de preservar a qualidade dos metabólitos secundários graças à auto vaporização da água, que garante um resfriamento rápido, o que evita a degradação térmica de compostos sensíveis.

O óleo essencial de cravo, estudado por Kiki (2023), apresenta maior atividade antioxidante ao analisar, com valor de 50 a 80 µg/mL, chegando a 98,7% de eliminação de radicais livres. O OE de *Ocimum basilicum* expressou atividade

antioxidante significativa no estudo de Vasconcelos *et al.* (2019), pois variou entre 100 e 77% nas três concentrações analisadas (15,6; 7,8 e 3,9 $\mu\text{g mL}^{-1}$). Aebisher *et al.* (2021) estudaram o óleo essencial de tomilho. Seus resultados foram semelhantes aos desse estudo. Ainda que tenha aplicado as concentrações de 1,0, 2,0, 4,0, 8,0, 16,0 mg/mL, obteve absorções que variaram de 30% a 80%, semelhantes aos resultados desse experimento.

5.5.1 Análise estatística

5.5.1.2 Anova

A Tabela 8 apresenta os resultados da ANOVA trifatorial para os efeitos principais e interações entre o tempo de leitura, a concentração de óleo essencial (E.O.) e a concentração enzimática utilizada no pré-tratamento. A coluna Soma dos quadrados indica a quantidade de variação explicada por cada fator ou interação. Já a coluna “Quadrado médio” representa a variância média associada a cada efeito, sendo obtida pela razão entre a soma dos quadrados e o número de categorias do fator. O *F-Value* compara essa variância média com a variância residual do modelo e indica a magnitude do efeito de cada fator sobre a variável resposta. Finalmente, o *P-valor* mostra a significância estatística desses efeitos: valores próximos de zero indicam que o fator ou interação teve efeito significativo sobre a inibição do DPPH, enquanto valores maiores que 0,05 indicam ausência de efeito estatisticamente relevante. Na tabela, observa-se que os três fatores principais (tempo, E.O. e concentração) apresentaram efeitos significativos, assim como algumas interações, como E.O. $\times$ concentração e a interação tripla (Fávero; Belfiore, 2017).

Tabela 8: Análise de variância trifatorial sobre a inibição do DPPH com celulase

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
Time	3	0,11335	0,03778	82,17267	0
E.O	2	3,65336	1,82668	3972,90407	0
Concentration	3	4,65802	1,55267	3376,96101	0
Time * E.O	6	0,00392	6,53E-04	1,42121	0,21839
Time * Concentration	9	0,02815	0,00313	6,80162	5,25E-07
E.O * Concentration	6	0,52412	0,08735	189,98674	0
Time * E.O * Concentration	18	0,02624	0,00146	3,17038	2,62E-04
Model	47	9,52129	0,20258	440,59908	0
Error	72	0,0331	4,60E-04	0	0
Corrected Total	119	9,5544	0	0	0

Time: janela de tempo de leitura; E.O: concentração de óleo essencial; Concentration: concentração de celulase.

Entre as interações, destacaram-se E.O. × concentração ($F = 189,99$) e tempo × concentração ($F = 6,80$), ambas significativas ($p < 0,05$), indicando que a eficácia antioxidante depende da composição química do extrato, modulada pelo pré-tratamento enzimático, e da janela do tempo de leitura. A interação tripla (tempo × E.O. × concentração) também foi significativa ($F = 3,17$; $p < 0,001$), reforçando que a inibição do DPPH é resultado de combinações específicas entre os três fatores. Já a interação tempo × E.O. não foi significativa ($p = 0,218$), sugerindo que essa combinação, isoladamente, não altera de forma relevante o padrão de inibição. Vale considerar que, nesse contexto, a concentração enzimática no pré-tratamento foi considerada uma variável proxy da composição do óleo essencial, uma vez que afeta o rendimento e o perfil químico do extrato. Assim, sua influência sobre a inibição do DPPH reflete indiretamente o impacto do tratamento enzimático na liberação de compostos bioativos.

O modelo apresentou excelente ajuste aos dados, com R^2 de 99,65%, indicando que praticamente toda a variação observada foi explicada pelas combinações entre tempo, dose de óleo essencial e concentração enzimática.

Dentre os tratamentos, o maior valor de inibição (85,39 %) foi obtido com 35 µg de E.O., 0,3% de enzima e leitura em 40 minutos, combinação que integrou isoladamente o grupo A do teste de Tukey, sendo estatisticamente superior às demais. No entanto, considerando o custo-benefício, destacou-se o tratamento com 20 µg de E.O., mesma concentração enzimática e leitura em 30 minutos, que apresentou inibição de 83,77%, também pertencente ao grupo A. Essa condição representa uma redução de 42% na quantidade de óleo e 25% no tempo de leitura, mantendo alta eficácia com menor custo operacional.

Tabela 9: Análise de variância trifatorial sobre a inibição do DPPH com celulase

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value
Time	3	0,24025	0,08008	139,80903	<0.0001
E.O	2	6,03312	3,01656	5266,27769	<0.0001
Concentration	3	1,19481	0,39827	695,29532	<0.0001
Time * E.O	6	0,02939	0,0049	8,55003	<0.0001
Time * Concentration	9	0,00538	5,97E-04	1,04292	0,4135
E.O * Concentration	6	0,1807	0,03012	52,57856	<0.0001
Time * E.O * Concentration	18	0,0104	5,78E-04	1,00848	0,45922
Model	47	8,08708	0,17207	300,39015	<0.0001
Error	84	0,04812	5,73E-04		
Corrected Total	131	8,1352			

Na Tabela 9, os mesmos indicadores são apresentados para outro conjunto experimental, mantendo a estrutura de interpretação. A soma dos quadrados revela que grande parte da variação da inibição do DPPH foi explicada pela dose de óleo essencial, seguida pela concentração enzimática e, em menor proporção, pelo tempo. O *F-Value*, bastante elevado para E.O. e concentração, confirma a expressiva influência desses fatores sobre a resposta. O *P-Value*, novamente, aponta significância estatística para os três fatores principais e para a interação entre E.O. e concentração. Por outro lado, as interações envolvendo o tempo, incluindo a interação tripla, apresentaram valores de p não significativos, indicando que, neste caso, o tempo de leitura teve efeito menos dependente das outras variáveis. Essas informações ajudam a identificar quais fatores e combinações realmente influenciaram a atividade antioxidante e devem ser priorizados na interpretação biológica e aplicação prática dos resultados.

A análise de comparação múltipla (teste de Tukey) revelou que os tratamentos com maiores médias de inibição do DPPH se concentraram principalmente nas combinações com 35 µg de óleo essencial, independentemente da presença de pré-tratamento enzimático. O tratamento mais eficaz foi obtido com 35 µg de óleo essencial, sem adição de enzima, lido aos 40 minutos, com média de (82,37%), valor que integrou isoladamente o grupo A, confirmando superioridade estatística. Contudo, o fato de outras combinações com a mesma dose de óleo, mas com enzima a 0,5% e leituras a 30 ou 40 minutos, também figurarem nos grupos A e B, sugere que o tempo de reação pode atenuar diferenças na composição induzida pelo tratamento enzimático, permitindo convergência no desempenho antioxidante.

Apesar disso, nem sempre a adição de enzima se traduziu em aumento de inibição. Tratamentos com 35 µg de óleo e enzima a 0,1% ou 0,3% apresentaram valores consideravelmente mais baixos, entrando nos grupos J ou até inferiores. Esse resultado indica que o simples uso de enzima não garante um melhor desempenho antioxidante e reforça a hipótese de que há um equilíbrio entre degradação da matriz e liberação seletiva de compostos bioativos. Além disso, a ausência de significância nas interações envolvendo o tempo sugere que o efeito do tempo de leitura foi mais estável e menos sensível às variações de concentração enzimática, especialmente nas doses maiores de óleo.

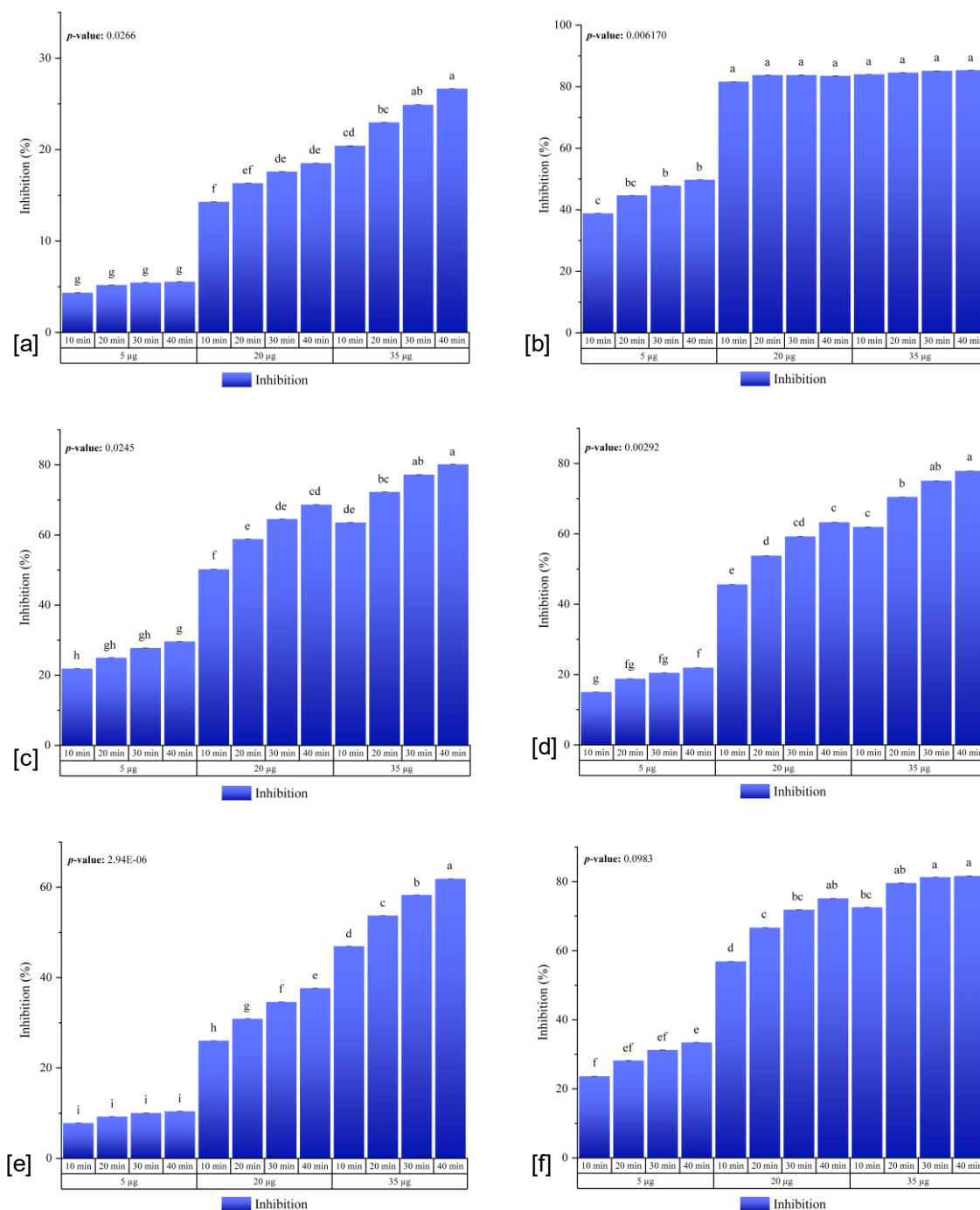
Em contrapartida, observou-se um desempenho expressivo para o tratamento com 20 µg de óleo essencial, sem enzima, e leitura aos 30 minutos, que alcançou média de 77,01% e integrou os grupos C–E. Embora estatisticamente inferior ao grupo A, esse tratamento se destaca pelo menor custo experimental e pela ausência de aditivos, tornando-se uma alternativa interessante para contextos em que a simplicidade operacional e o custo-benefício sejam prioritários. De modo geral, as combinações com doses de 5 µg apresentaram desempenhos bastante inferiores, mesmo com uso de enzima, o que reforça a limitação de concentração mínima necessária para que o óleo exerça ação antioxidante detectável no modelo avaliado. Portanto, a segunda matriz de comparações indica que, embora doses altas de óleo essencial promovam a maior inibição, há espaço para condições intermediárias com desempenho satisfatório, especialmente quando se elimina o uso de enzima e se otimiza o tempo de leitura. A ausência de efeito significativo das interações com o tempo reforça essa ideia, apontando que o fator mais determinante é a quantidade total de compostos disponíveis, mais do que a duração da reação em si. Esse padrão pode ser especialmente relevante para aplicações industriais que buscam eficiência com menos etapas de preparo e menor uso de insumos.

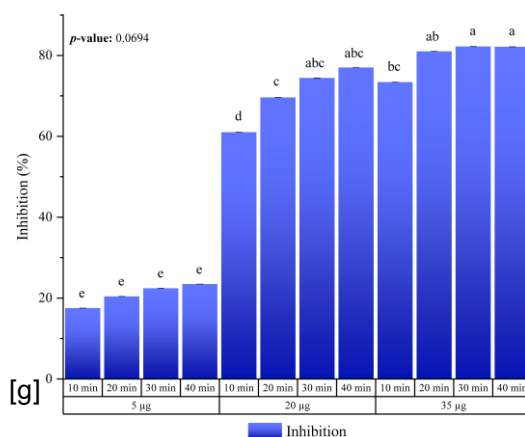
5.5.1.2 Tukey

As diferenças estatísticas e significativas entre si podem ser observadas por meio de teste de Tukey, aplicado nesse estudo entre os tempos e as concentrações de cada amostra, conforme exposto na Figura 18. Esse procedimento possibilita comparar diretamente os pares de médias, evidenciando quais resultaram em respostas diferenciadas. Os resultados obtidos indicaram que os experimentos

tiveram resultados diferentes entre a amostra de 35 μg e a de 40 min, dentre as demais.

Figura 18: Capacidade antioxidante em barras para cada período marcadas por letras diferentes são estatisticamente diferentes em $p < 0,05$. [a] JEC0,1; [b] JEC 0,3; [c] JEC 0,5; [d] JEP 0,1; [e] JEP 0,3, [f] JEP 0,5 [g] Controle [e]





O teste de Tukey foi aplicado para identificar quais tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação às variáveis analisadas, sendo aplicado em cada amostra os tempos entre as concentrações. Para a amostra controle, observou-se que a diferença significativa não foi apresentada entre as amostras de maior desempenho, acontecendo o mesmo na amostra JEC 0,3; entretanto, as demais tiveram expressividade em seus resultados. Os melhores resultados entre as amostras foram controle 82,34%, pectinase 81,62% e celulase 85,28%.

Esses resultados sugerem que o aumento no tempo de contato favorece a ação antioxidante do óleo essencial, bem como a atuação enzimática, promovendo maior liberação de compostos de interesse. Filho et al. (2020), em seu estudo sobre óleo essencial da flor de *Fridericia platyphylla*, obtiveram resultados eficientes na redução de DPPH, com as concentrações de 50, 40 e 30 µL mL⁻¹, chegando a 100% de redução. De igual modo, Filho et al., 2020, obtiveram tal resultado em sua análise em óleo essencial de flor de Algodão-do-cerrado, com as concentrações variando entre 50 e 2 mg mL⁻¹. Entre os grupos, houve diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), exceto para a concentração de 0,062 mg mL⁻¹, que não apresentou diferença significativa.

A concentração utilizada e o tempo influenciam o resultado, como podemos observar na literatura e nos resultados desse estudo. De modo geral, a prática nos mostra que a aplicação da enzima, especialmente a celulase, em concentrações mais baixas e por maior tempo pode ser mais vantajosa em termos de custo-benefício.

6. CONCLUSÃO

A caracterização das folhas de jambu foi realizada pelas análises de cinzas e umidade; ambos os resultados estão conformes à literatura. Também foi possível verificar a morfologia da biomassa ao longo do processo de hidrodestilação. As imagens da microscopia eletrônica de varredura possibilitaram a observação da atuação da enzima na matéria vegetal que ocasiona poros mais ressaltados nas amostras com pré-tratamento enzimático.

A extração de óleo essencial por hidrodestilação tradicional obteve resultado até 66,67% inferior às extrações com pré-tratamento, provando que essa metodologia contribuiu com melhor rendimento. A cinética corrobora essa afirmação; além disso, evidencia que o tempo foi reduzido com a aplicação de enzimas no processo, chegando a reduzir em até 1,5 h o tempo de extração.

Os componentes predominantes identificados na CG-MS indicam o potencial do óleo essencial de jambu para atividades anti-inflamatórias, antiagregantes, antioxidantes, antimicrobianas, analgésicas, anticancerígenas, antifúngicas devido a possuir componentes com tais propriedades. Entretanto, são necessárias análises complementares para confirmar a atuação do óleo essencial de jambu nas propriedades citadas. Tal como foi realizada a eliminação de DPPH para avaliação da atividade antioxidante. Ainda que não tenha apresentado resultados expressivos ao adicionar enzimas no processo, apenas 17% dos testes ficaram com eliminação do radical DPPH acima de 80%.

Em suma, a concentração de 0,3% de enzima no pré-tratamento destacou-se nos experimentos, especialmente quando se utilizou a enzima celulase. Os componentes majoritários (Cariofileno, β -Cubebeno) foram mais expressivos nessa concentração em ambas as enzimas; entretanto, os resultados em destaque da atividade antioxidante são para a celulase, bem como o volume de rendimento, que também foi o maior obtido. Tais resultados apontam que maiores concentrações não estão ligadas a melhores resultados, o que nos proporciona economia do material enzimático e energia. A utilização de coquetel enzimático é uma possibilidade para melhoramento dos resultados em estudos posteriores, tal qual a análise específica de propriedades como a antitumoral e antimicrobiana.

REFERÊNCIAS

- Abifarin, T. O., Otunola, G. A., Afolayan, A. J. Chemical Composition of Essential Oils Obtained from *Heteromorpha arborescens* (Spreng.) Cham. and Schltdl Leaves Using Two Extraction Methods. **The Scientific World Journal**. Article ID 9232810, 2020
- Adney, B., Baker, J. Laboratory Analytical Procedure (LAP): Measurement of Cellulase Activities. **Technical Report** NREL/TP-510-42628, 2008.
- Aebisher, D. *et al.* Essential Oils of Seven Lamiaceae Plants and Their Antioxidant Capacity. **Molecules**, 26(13), 3793, 2021
- Ainane, A., *et al.* Chemical composition and insecticidal activity of five essential oils: *Cedrus atlantica*, *Citrus limonum*, *Rosmarinus officinalis*, *Syzygium aromaticum* and *Eucalyptus globules*. **Materials Today: Proceedings** 13, 474–485, 2019
- Ajayi, A. A., Pectinase Production by *Aspergillus niger* using Pineapple Peel Pectin and Its Application in Coconut Oil Extraction. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science** 655, 012014, 2021
- Almeida, S.P., *et al.* In vitro culture of jambu with different growth regulators. **Horticultura Brasileira** 38: 134-138, 2020
- Almutairi, M. B. F., *et al.* *In-Vitro* and *In-Vivo* Antibacterial Effects of Frankincense Oil and Its Interaction with Some Antibiotics against Multidrug-Resistant Pathogens. **Antibiotics**, 11, 1591, 2022
- Amaralaj, A., *et al.* Preparation, characterization and antimicrobial activity of polyvinyl alcohol/gum arabic/chitosan composite films incorporated with black pepper essential oil and ginger essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, Volume 151, 2020
- AOAC International. Official methods of analysis. 14^a ed. **Gaithersburg: Published by AOAC International**, 1995.
- AOAC International. Official methods of analysis. 16^a ed., 3^a rev. **Gaithersburg: Published by AOAC International**, v.2.1997.
- Areeshi, M. Y., Microbial cellulase production using fruit wastes and its applications in biofuels production. **International Journal of Food Microbiology**. Volume 378, 2, 109814, 2022.
- Ataide, J. O. *et al.* Caracterização e atividade inseticida do óleo essencial de *Zingiber officinale* Roscoe – Zingiberaceae sobre *Duponchelia fovealis* Zeller, 1847 (Lepidoptera: Crambidae). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n.2, 2020
- Bakar, I. N. A., *et al.* Characterization of asiaticoside concentration, total phenolic compounds, and antioxidant activity of different varieties of *Centella asiatica* (L.) and essential oil extraction using hydro-distillation with enzyme assisted. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 44, 2022.

Barbosa, A. F.; *et al.* Composição centesimal de Jambu (*Spilanthes oleracea* L.) in natura e seco. **Magistra**, v. 26, p. 1010-1013, 2014.

Barbosa, A. T., Composição química e atividades biológicas dos óleos essenciais das folhas de *Vismia guianensis* (Aubl.) choisy e *vismia cayennensis* (Jacq.) Pers. **Universidade Federal do Amazonas**, 2022

Batista, A. C. R., Santos, C. C. Determinação da composição química e da atividade citotóxica do óleo essencial de *Croton* sp. **Universidade Federal Rural do Seminário**, 2021.

Bellumori, M., *et al.* *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen: Alkylamides and phenolic compounds in aerial parts and roots of in vitro seedlings. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**. Volume 220, 25, 114991, 2022.

Benelli, G., *et al.* Insecticidal efficacy of the essential oil of jambú (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) cultivated in central Italy against filariasis mosquito vectors, houseflies and moth pests. **Journal of Ethnopharmacology** 229, 272–279, 2019.

Bergamo, D., *et al.* The Amazon bioeconomy: Beyond the use of forest products. **Ecological Economics** 199 107448, 2022.

Beuren, F. H., *et al.* Sistema Produto-Serviço Voltado para a Erradicação da Fome e Incentivo a Agricultura Sustentável. **Revista Eletrônica do Alto Vale do Itajaí – REAVI**, v.10, nº 17, 2021

Bhandari, K.B., *et al.* Essential oil composition of 'WW-B.Dahl' old world bluestem (*Bothriochloa bladhii*) grown in the Texas High Plains. **Industrial Crops & Products** 133, 1–9, 2019

Bizzo, H. R., Rezende, C. M., O Mercado de Óleos Essenciais no Brasil e no Mundo na Última Década. **Quim. Nova**, Vol. 45, No. 8, 949-958, 2022

Borges, F. F., *et al.* Efeito da Secagem sobre o Rendimento de Óleo Essencial de Capim-Limão (*Cymbopogon Citratus* (D.C.) Stapf). **Global Sciende and Technology**, Rio Verde, v.12, n.03, p.01-19, 2019.

Brasil, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Fórum Mundial de Bioeconomia reforça relevância da Amazônia. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/publicacoes/noticias/forum-mundial-de-bioeconomia-reforca-relevancia-da-amazonia> Acesso em: 03/12/2024

Cabi, N., Arici, M., Sadic, O. The famous Turkish rose essential oil: Characterization and authenticity monitoring by FTIR, Raman and GC–MS techniques combined with chemometrics. **Food Chemistry** 354, 129495, 2021

Campos, A. F., *et al.* O Uso Estratégico de Redes Sociais Digitais no Ensino-Aprendizagem: Um Estudo com os Objetivos 4 e 17 Da Agenda 2030. **Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina**, Florianópolis, v. 26, 2021.

Carreiro, et al. Determinação dos índices físico-químicos dos óleos essenciais de *Rosmarinus officinalis*, *Cymbopogon citratus* e *Cymbopogon winterianus*. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, e4359119959, 2020

Carvalho, Z. S. *et al.* Atividade antifúngica do óleo essencial de *Lippia alba* em *Aspergillus welwitschiae*. **Magistra**, v. 33, 2023

Chuensiang, P., Sanguandeeikul, R., Siripatrawan, U. Enhancing effect of nanoemulsion on antimicrobial activity of cinnamon essential oil against foodborne pathogens in refrigerated Asian seabass (*Lates calcarifer*) fillets. **Food Control** Volume 122, 107782, 2021

Colasante, A., D'adamo, I., The circular economy and bioeconomy in the fashion sector: Emergence of a "sustainability bias". **Journal of Cleaner Production** 329, 2021

D'adamo, I., *et al.* Bioeconomy of Sustainability: Drivers, Opportunities and Policy Implications. **Sustainability**, 2022.

D'amato, D., Korhonen, J., Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework. **Ecological Economic**, Vol 188, 2021

D'amato, D., Veijonaho, S. Toppinen, A., Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. **Forest Policy and Economics** Vol 110, 2020

Dao, P. T., *et al.* Kinetics of pilot-scale essential oil extraction from pomelo (*Citrus maxima*) peels: Comparison between linear and nonlinear models. **Alexandria Engineering Journal** Volume 61, Issue 3, 2022

Datta, A., *et al.* Application of enzymes as a diagnostic tool for soils as affected by municipal solid wastes. **Journal of Environmental Management**. Vol 286, 2021, 112169

Dedino, D.B., *et al.* Red LED light and different cultivation methods changed the essential oil composition of *Acmella oleracea*. **Plant Cell Tiss Organ Cult** 151, 511–520, 2022

Dick, W. C. A genomic perspective on amazon tree diversity. **Molecular Ecology** Volume 30, Issue 5, Pagesi-iv, 1103-1356, 2021

Duangjai, A., *et al.* Spasmolytic effect of *Acmella oleracea* flowers extract on isolated rat ileum. **J Herbmед Pharmacol**. 10(1): 109-115, 2021

El-Assri, E. *et al.* Molecular characterization, chemical profile and biological properties of essential oils from *Chamaemelum nobile* (L.) flowers of Morocco: in vitro and *in silico* studies. **Frontiers in Chemistry**, 2025

Farias, A. L. Chemical Characterization, Antioxidant, Cytotoxic and Microbiological Activities of the Essential Oil of Leaf of *Tithonia Diversifolia* (Hemsl) A. Gray (Asteraceae). **Pharmaceuticals**, 12(1), 34, 2019

Favaro, S. Extração de óleo de polpa de macaúba assistida por enzimas. EMBRAPA, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8wC-yYroPnM>. Acesso em: 28/08/2023

Ferreira, R. C. Óleo essencial das partes aéreas de *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist (Asteraceae): caracterização química, efeito antimelanoma in vitro e toxicidade em modelo de peixe-zebra. Tese de Doutorado, **Universidade Federal da Paraíba**, 2023

Filho, A. C. P. M. Avaliação química, antifúngica e antioxidante do óleo essencial da flor de *Fridericia platyphylla* (Cham.) L. G. Lohmann. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, 2020

Filho, A. C. P. M., *et al.* Composição química dos óleos essenciais de *Schinus molle* e atividade antifúngica em *Sclerotinia sclerotiorum*. **Colloquium Agrariae**, v. 16, 2020

Filho, A. C. P. M., *et al.* Perfil químico e atividades antioxidante e antifúngica do óleo essencial da flor de *Cochlospermum regium* (Mart. ex Schrank.) –Pilg. (Bixaceae) **Colloquium Agrariae**, v. 16, 2020

Fonseca, M. C. M., *et al.* Production and essential oil quality of *Varronia curassavica* DC. submitted to different spacing between plants, harvest season and drying temperatures of leaves. **Ciência Rural**, v.53:6, e20210770, 2023

Freitas, T. P., *et al.* Volatile Compounds and Physicochemical Quality of Four Jabuticabas (*Plinia* sp.) **Molecules**, 25(19), 4543, 2020

Gabetti, E., *et al.* Chemical fingerprinting strategies based on comprehensive two-dimensional gas chromatography combined with gas chromatography-olfactometry to capture the unique signature of Piemonte peppermint essential oil (*Mentha x piperita* var Italo-Mitcham). **Journal of Chromatography A** 1645, 2021

Ghavam, M., *et al.* Extraction of essential oil from *Dracocephalum kotschy* Boiss. (Lamiaceae), identification of two active compounds and evaluation of the antimicrobial properties. **Journal of Ethnopharmacology** 267 113513, 2021

Ghose, T. K. Measurement of cellulose activities. **Pure and Applied Chemistry**, v.59, p.257-268, 1987.

Gomes, F. P., Souza, E. P., Resende, O. Avaliação morfológica de farinha de jambu. **7º Simpósio de Segurança Alimentar**, 2020

Gomes, F. P., *et al.* Comparison of powdered and fresh jambu (*Acmella oleracea*). **Heliyon** 3, 2020

Gomes, F. P., *et al.* Application of Mathematical Models and Thermodynamic Properties in the Drying of Jambu Leaves. **Agriculture**, 12, 1252, 2022

Gomes, P. V. R. Incorporação de micropartículas carregadas com óleo essencial em holocelulose extraída de rejeito orgânico para o desenvolvimento de um biodefensivo larvicida. 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado em Química) - **Universidade Federal do Amazonas**, Manaus, 2020

Grymel, M., *et al.* Extraction, Purification, Quantification, and Stability of Bioactive Spilanthol from *Acmella oleracea*. **Planta Med**, 2022

Gyrdymova, Y. V., Rubtsova, S. A. Caryophyllene and caryophyllene oxide: a variety of chemical transformations and biological activities. **Chemical Papers**, 76:1–39, 2022

Haro-González, J. N., *et al.* Clove Essential Oil (*Syzygium aromaticum* L. Myrtaceae): Extraction, Chemical Composition, Food Applications, and Essential Bioactivity for Human Health. **Molecules**, 26 (21), 6387, 2021

Hong, M. *et al.*, Multivariate Analysis of Essential Oil Composition of *Artemisia annua* L. Collected from Different Locations in Korea. **Molecules**, 28(3), 1131, 2023

Huang, S., *et al.* “Armor-Plating” Enzymes with Metal–Organic Frameworks (MOFs). **Angewandte Chemie International**, Vol 59, 8786-8798, 2020

Huong, N. C., Physical and Chemical Profile of Essential oil of Vietnamese *Ocimum gratissimum* L. **Energy Security and Chemical Engineering Congress** IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 736, 2020

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br> . Acesso em: 10 jan. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Tabelas de composição nutricional dos alimentos consumidos no Brasil. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008- 2009, Rio de Janeiro: **IBGE**, 2011. 351p.

Irrera, N., *et al.* β -Caryophyllene Inhibits Cell Proliferation through a Direct Modulation of CB2 Receptors in Glioblastoma Cells. **Cancers**, 12(4), 1038, 2020

Júnior, A. Q., *et al.* Atividade anticolinesterásica de óleos essenciais dos rizomas de *Curcuma longa* L. e *Zingiber officinale* R. (zingiberaceae). **Anais do Simpósio de Plantas Medicinais do Brasil**, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://resumos.sbpmed.org.br/index.php/spmb/article/view/122>. Acesso em: 11 fev. 2025.

Kampasakali, E., *et al.* μ -Raman Determination of Essential Oils' Constituents from Distillates and Leaf Glands of Origanum. **Molecules**, 28(3), 1221, 2023

Katekar, V. P., Rao, A. R., Sardeshpande, V. R. A hydrodistillation-based essential oils extraction: A quest for the most effective and cleaner technology. **Sustainable Chemistry and Pharmacy** V. 36, 101270, 2023

Kellner, A. W. A. Amazon biodiversity – *quo vadis?* **Editorial Note**, An. Acad. Bras. Ciênc. 93 (2), 2021

Kiki, M. J. In Vitro Antiviral Potential, Antioxidant, and Chemical Composition of Clove (*Syzygium aromaticum*) Essential Oil. **Molecules**, 28(6), 2421, 2023

Kimura, L. T., *et al.* Amazon Biobank: a collaborative genetic database for bioeconomy development. **Functional & Integrative Genomics**, volume 23, Article number: 101, 2023

Krishnaswam, V. G., *et al.* Cellulase enzyme catalyst producing bacterial strains from vermicompost and its application in low-density polyethylene degradation. **Chemosphere**, Volume 288, 132552, 2022

Kumar, D., *et al.* Application of enzymes for an eco-friendly approach to textile processing. **Environmental Science and Pollution Research** volume 30, pages 71838–71848, 2023

Liang, Q., *et al.* Application of enzymes as a feed additive in aquaculture. **Marine Life Science & Technology** volume 4, pgs 208–221, 2022

Lima, M. C. F. *et al.* Quantificação do β -cariofileno e óxido de cariofileno para o controle de qualidade dos óleos de copaíba (*Copaifera multijuga* Hayne). Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 1, p.608-623. 2020

Liu, C., *et al.* Study on Extraction of Peanut Protein and Oil Bodies by Aqueous Enzymatic Extraction and Characterization of Protein. **Journal of Chemistry**, Article ID 5148967, 2020

Li, Z., *et al.* Enzyme-deep eutectic solvent pre-treatment for extraction of essential oil from *Mentha haplocalyx* Briq. leaves: Kinetic, chemical composition and inhibitory enzyme activity. **Industrial Crops and Products**, Volume 177, 114429, 2022

Majid, I., *et al.* Recent insights into green extraction techniques as efficient methods for the extraction of bioactive components and essential oils from foods. **CYTA - Journal of Food**, Vol. 21, No. 1, 101–114, 2023

Machado, K. C. *et al.* A systematic review on the neuroprotective perspectives of beta-caryophyllene. **Phytotherapy Research**, v. 32, 2376-2388

Maciel, Y. R. S., *et al.* Composição química e atividade biológica de óleos essenciais de espécies da família Myrtaceae oriundos do Banco de óleos do Laboratório de Bioprospecção e Biologia experimental LabBBEx/UFOPA. **Anais do Simpósio de Plantas Medicinais do Brasil**, [S. l.], 2023.

Marchesini, P., *et al.* Acaricidal activity of *Acmella oleracea* (Asteraceae) extract against *Rhipicephalus microplus*: What is the influence of spilanthol? **Veterinary Parasitology** 283, 2020

Mathew, T., *et al.* Essential oil related seizures (EORS): A multi-center prospective study on essential oils and seizures in adults. **Epilepsy Research** Volume 173, 106626, 2021

Menossi, M., *et al.* Essential oil-loaded bio-nanomaterials for sustainable agricultural applications. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology** Volume 96, Issue 8, 2021

Miljanovic, A., *et al.* Effect of Enzymatic, Ultrasound, and Reflux Extraction Pretreatments on the Yield and Chemical Composition of Essential Oils. **Molecules**, 25(20), 4818, 2020

Miranda, C. H. *et al.* Actividad antibacterial y composición química del aceite esencial de la *Aloysia aloysioides* Loes. **Revista de la Sociedad Química del Perú**, 87(3) 2021

Mohan, S. V., *et al.* Circular bioeconomy approaches for Sustainability. **Bioresource Technology** 318, 2020

Morshdloo, M. R., *et al.* Comparasion of drYing methods for the extraction of essential oil from gragonhead (*Dracocephalum moldavica*L., Lamiaceae). **Journal of essential oil research**, vol. 22. No 2, 162-170, 2021

Morsy, N. F. S., Hammad, K. S. M. Extraction of essential oil from methyl cinnamate basil (*Ocimum canum* Sims) with high yield in a short time using enzyme pretreatment. **Journal of Food Science and Technology** volume 58, 2599–2605, 2021

Nações Unidas Brasil, Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/> Acesso em: 11/05/2025

Nagar, S., Pigott, M., Whyms, S., Effect of Extraction Methods on Essential Oil Composition: A Case Study of Irish Bog Myrtle-Myrica gale L. **Separations**, 10, 128, 2023

Nascimento, L. E. S., *et al.* Phytochemical profile of different anatomical parts of jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen): A comparison between hydroponic and conventional cultivation using PCA and cluster analysis. **Food Chemistry** 332, 127393, 2020

Naveed, N., *et al.* Co-evolutionary coupling leads a way to a novel concept of R&D – Lessons from digitalized bioeconomy. **Technology in Society** 60, 101220, 2020

Ngan, T. T. K. *et al.* Chemical Composition and Antibacterial Activity of Orange (*Citrus sinensis*) Essential Oils Obtained by Hydrodistillation and Solvent free Microwave Extraction. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** 991, 012023, 2020

Ngo, T. C. Q. *et al.* The effects of influencing parameters on the *Eucalyptus globulus* leaves essential oil extraction by hydrodistillation method. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 991, 012126, 2020

Neves, J. S. Síntese de tintas acrílicas à base de água: encapsulamento de óleos essenciais com atividade antifúngica e látex com alto teor de sólido. Tese de Doutorado, **Universidade de Brasília**, 2019

Nguyen, Q. T. *et al.* A comparative study on essential oils from the leaves and stems of Vietnamese *Mikania micrantha* Kunth. *Natural Product research*, Vol. 39, No. 1, 66–72, 2025

Oliveira, A. M. R., Pezzi, A., Silva, M. S. Óleo essencial de guaçatonga no controle alternativo de fungos causadores do mofo cinzento e alternarioses. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, 2023

Ordóñez, G. N. *et al.* Estudio químico del aceite esencial de la “yareta” *Smallanthus parviceps* (Blake) Rob. **Revista de la Sociedad Química del Perú**, 86 (2), 2020

Pires, I. V., Silva, A. E. Caracterização e capacidade antioxidante do jambu (*Spilanthes oleracea* L.) *in natura* procedente do cultivo convencional e de hidroponia. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.10, p.74624-74636, 2020

Plati, F., Parasevopoulou, A. Micro- and Nano-encapsulation as Tools for Essential Oils Advantages' Exploitation in Food Applications: The Case of Oregano Essential Oil. **Food and Bioprocess Technology** volume 15, pages949–977, 2022

Ragavendran, K., *et al.* Chemical composition and mosquitocidal properties of essential oil from Indian indigenous plants *Ocimum tenuiflorum* L. and *Ocimum americanum* L. against three vector mosquitos. **Experimental Parasitology**, 258, 108709, 2024

Reis, N.S.R., *et al.* Enzyme extraction by lab-scale hydrodistillation of ginger essential oil (*Zingiber officinale* Roscoe): Chromatographic and micromorphological analyses. **Industrial Crops and Products**, 146, 2020.

Safe, F. A. A., *et al.* Antimicrobial and anti-aflatoxigenic activities of nanoemulsions based on *Achillea millefolium* and *Crocus sativus* flower extracts as green promising agents for food preservatives. **BMC Microbiology**, 23:289, 2023

Salleh, W. M. N. H. W., Khamis, S. Essential Oil of *Thottea grandiflora* and its Lipoxigenase Inhibitory Activity. **Chemistry of Natural Compounds**, v 57, 959-960, 2021

Sampaio, I. M. G., *et al.* Production and postharvest quality of jambu in hydroponics under nitrogen application in nutrient solution. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 2, e20197075, 2021

Sanchez, E. C., *et al.* Alginate–Chitosan Membranes for the Encapsulation of Lavender Essential Oil and Development of Biomedical Applications Related to Wound Healing. **Molecules**, 28 (9) 3689, 2023

Santos, O. V., *et al.* Physicochemical properties and bioactive composition of the lyophilized *Acmella oleracea* powder. **Journal of Food Processing and Preservation** Volume 45, Issue 4, 2021

Santos, R.M., Nogueira, K. L., Chapla, V. M., Composição Química e Atividade Antioxidante de Óleos Essenciais das Folhas da *Schinus terebinthifolius* e *Siparuna guianensis*. **Revista Virtual Química**, 15(2), 295-300, 2023

Savic, S.M., *et al.* 'All- natural' anti-wrinkle emulsion serum with *Acmella oleracea* extract: A design of experiments (DoE) formulation approach, rheology and in vivo skin performance/efficacy evaluation. **International Journal of Cosmetic Science** Volume 43, Issue 5, 2021

Semenova, N. A. *et al.* Impact of Ultraviolet Radiation on the Pigment Content and Essential Oil Accumulation in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). **Applied Science**, 12, 7190, 2022

Servi, H., Sem, A., Dogan, A. Chemical composition and biological activities of endemic *Tripleurospermum conoclinium* (Boiss. & Balansa) Hayek essential oils. **Flavour and Fragrance Journal**, V. 35, Issue 6, p. 713-721, 2020

Shaw, D., *et al.* Valorization of essential oils from citrus peel powder using hydrodistillation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, 32, 101036, 2023

Silva, J. K. R., *et al.* Essential Oils as Antiviral Agents, Potential of Essential Oils to Treat SARS-CoV-2 Infection: An In-Silico Investigation. **International Journal Molecular Sciences**, 21(10), 3426, 2020

Silva, P.T., *et al.* Composição Química do Óleo Essencial Extraído das Folhas dos Indivíduos Macho e Fêmea e Frutos de *Schinus terebenthifolius*. **Revista Virtual Química**, Vol 11, No. 1, 180-189, 2019

Silva, W. M. F., *et al.* Basil Essential Oil: Methods of Extraction, Chemical Composition, Biological Activities, and Food Applications. **Food Bioprocess Technol** 15, 1–27, 2022

Singh, R., *et al.* Prospects of microbial cellulase production using banana peels wastes for antimicrobial applications. **International Journal of Food Microbiology**. Volume 388, 110069, 2023

Shrestha, S., Rahman, M. S., Qin, W. New insights in pectinase production development and industrial applications. **Applied Microbiology and Biotechnology** volume 105, pages9069–9087, 2021.

Smart Service Medical Art. Disponível em: <https://smart.servier.com/> Acesso em: 28/08/2023

Souza, T. S. P., Kawaguti, H. Y. Cellulases, Hemicellulases, and Pectinases: Applications in the Food and Beverage Industry. **Food and Bioprocess Technology** volume 14, pages1446–1477, 2021

Spinozzi, E., *et al.* Spilanthol-rich essential oil obtained by microwave-assisted extraction from *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen and its nanoemulsion: Insecticidal, cytotoxic and anti-inflammatory activities. **Industrial Crops & Products** 172, 114027, 2021

Swain, R. B., Yang-Wallentin, F., Achieving sustainable development goals: predicaments and strategies. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Vol 27, 2020

Taktak, O. *et al.* Physical and Chemical Influences of Different Extraction Techniques for Essential Oil Recovery from *Citrus sinensis* Peels. **Journal of Essential Oil-Bearing Plants** 24 (2), 290-303, 2021

Tamer, T. M., *et al.* Influence of Cedar Essential Oil on Physical and Biological Properties of Hemostatic, Antibacterial, and Antioxidant Polyvinyl Alcohol/Cedar Oil/Kaolin Composite Hydrogels. **Pharmaceutics**, 14 (12), 2649, 2022

Taom, Z., *et al.* The Classification of Enzymes by Deep Learning. **IEEE Access**, Vol 8, 2020

Tatta, E. R., *et al.* Bioprospecting of microbial enzymes: current trends in industry and healthcare. **Applied Microbiology and Biotechnology** volume 106, pages1813–1835, 2022

Tedesco, L. *et al.* Fases fenológicas da jabuticaba (*Plinia cauliflora*) e composição química do óleo essencial das folhas e atividade antioxidante. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020

Teresa-Martinez, G. D. T., *et al.* Effect of the Instant Controlled Pressure Drop Technology in Cardamom (*Elettaria cardamomum*) Essential Oil Extraction and Antioxidant Activity. **Molecules**, 27(11), 3433, 2022

Tonial, C. H., *et al.* Technical and economic evaluation of cultivation and obtaining of *Varronia curassavica* Jacq. essential oil. **Industrial Crops & Products** 154, 11265, 2020

Trindade, J. K. M., *et al.* Perfil químico e atividade antimicrobiana do óleo essencial de variedades de *Psidium guajava* L. (Myrtaceae). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, e211101018794, 2021

Uthpala, T.G.G., *et al.* Evaluation of antimicrobial potential and phytochemicals in *Acmella* (*A. oleracea*) flower pod extracts subjected to different drying techniques. **Journal of Food Processing and Preservation** Volume 45, Issue 6, 2021

Uthpala, T. G. G., Navaratne, S. B., *Acmella oleracea* Plant; Identification, Applications and Use as an Emerging Food Source—Review. **Food Reviews International**, VOL. 37, NO. 4, 399–414, 2021

Vasconcelos, S. C. *et al.* Composição química, atividade bactericida e antioxidante dos óleos essenciais das folhas de *Ocimum basilicum* e *Ocimum gratissimum* (Lamiaceae) **Research, Society and Development**, v. 10, n.8, 2021

Veras, B. O., *et al.* The essential oil of the leaves of *Verbesina macrophylla* (Cass.) S.F.Blake has antimicrobial, anti-inflammatory and antipyretic activities and is toxicologically safe. **Journal of Ethnopharmacology** 265, 113248, 2021

Vigiliou, C., *et al.*, Headspace gas chromatography-mass spectrometry in the analysis of lavender's essential oil: Optimization by response surface methodology. **Journal of Chromatography B** 1179, 122852, 2021

Villarreal-Rivas, S. *et al.* Composición química y evaluación de la actividad antibacteriana del aceite esencial de *Tithonia diversifolia* (hems. l.) a. gray (asteraceae) recolectada en el Estado mérida – Venezuela. **Acta Bioclinica**, V 12, 23, 2022

Wang, C-X., *et al.* Anti-proliferation activities of three bioactive components purified by high-speed counter-current chromatography in essential oil from ginger. **European Food Research and Technology**, 246:795–805, 2020

Wang, Q., Huang, R., The impact of COVID-19 pandemic on sustainable development goals – A survey. **Environmental Research**. Vol 202, 2021

Wainer, J., *et al.* Extraction of Essential Oils from *Lavandula × intermedia* 'Margaret Roberts' Using Steam Distillation, Hydrodistillation, and Cellulase-Assisted Hydrodistillation: Experimentation and Cost Analysis. **Plants**, 11(24), 3479, 2022

Wei, L., *et al.* Comparison of chemical composition and activities of essential oils from fresh leaves of *Pelargonium graveolens* L'Herit. extracted by hydrodistillation and enzymatic pretreatment combined with a solvent-free microwave extraction method. **Industrial Crops and Products**. Volume 186, 15, 115204, 2022

Xavier, L. D., Binhara, R. C., Ferreira, F. D., Avaliação da atividade antifúngica do óleo essencial de *Syzygium Cumini*. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.5, p.52380-52390, 2021

Xiuli, C., *et al.* Development of Microcapsule Bioactive Paper Loaded with Chinese Fir Essential Oil to Improve the Quality of Strawberries. **Coatings**, 12 (2), 254, 2022

Yan, B., *et al.* Status of the application of exogenous enzyme technology for the development of natural plant resources. **Bioprocess and Biosystems Engineering** volume 44, pages429–442, 2021

Yien, R. M. K., *et al.* Alkylamides from *Acmella oleracea*: antinociceptive effect and molecular docking with cannabinoid and TRPV1 receptors. **Natural Product Research**, 2022

Zuhairi, J. J. M. J. A., *et al.* Antioxidant, cytotoxic and antibacterial activity of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil against bacteria isolated from urinary tract infection. **European Journal of Integrative Medicine** Volume 38, 101192, 2020

Zhang, C., *et al.* Antioxidant, hepatoprotective and antifungal activities of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil. **Food Chemistry** Volume 346, 128845, 2021

APÊNDICE A - Análises cromatográficas do óleo essencial de *Acmella oleracea*

Figura A1: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* sem pré-tratamento

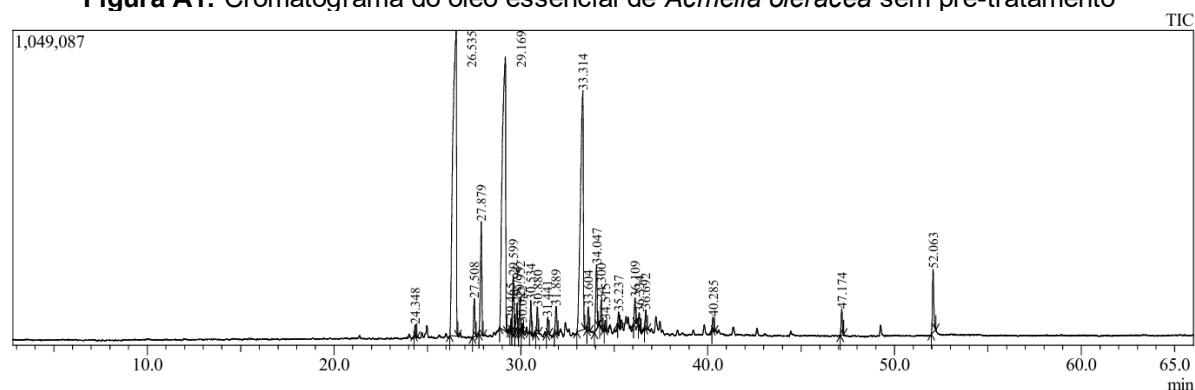


Figura A2: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)

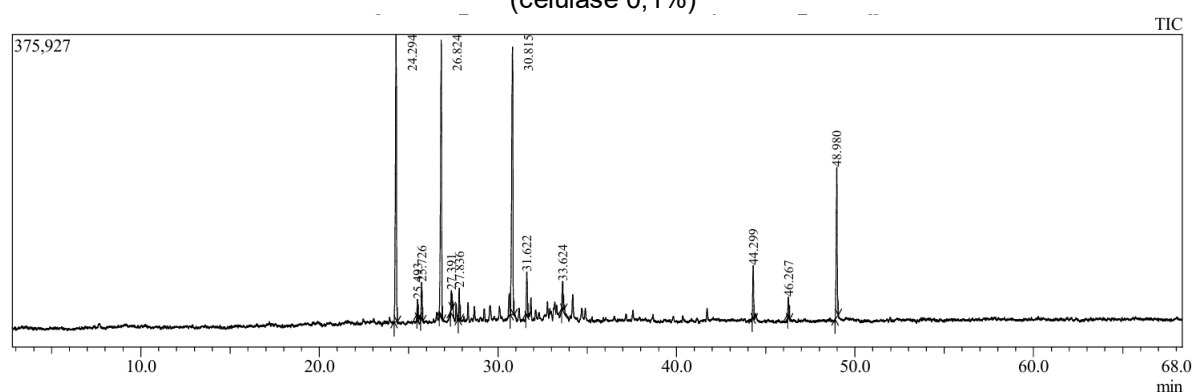


Figura A3: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)

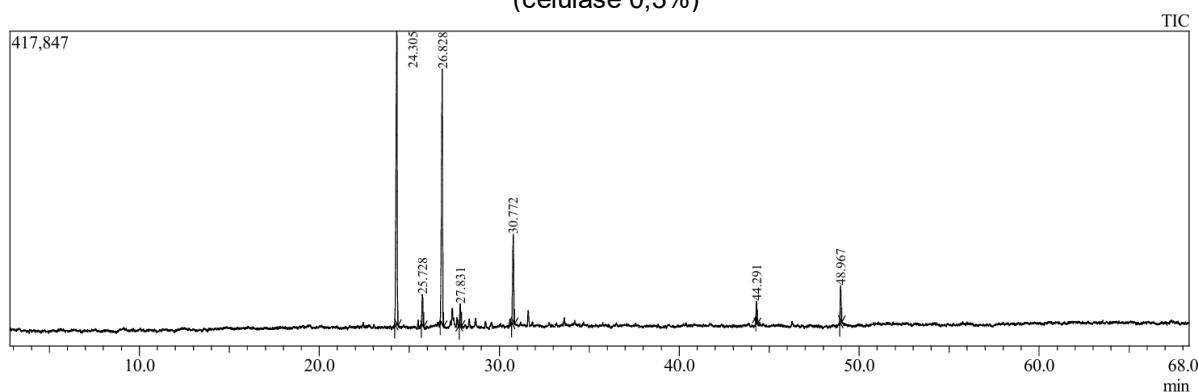


Figura A4: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)

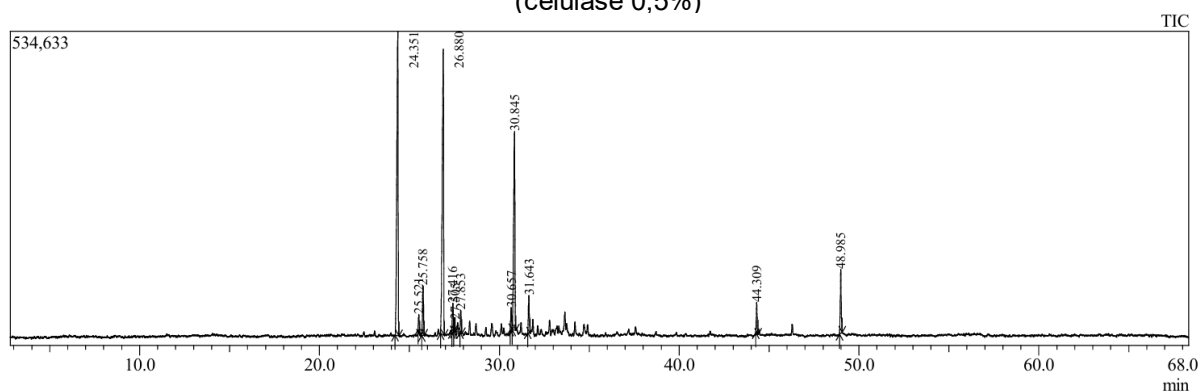


Figura A5: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)

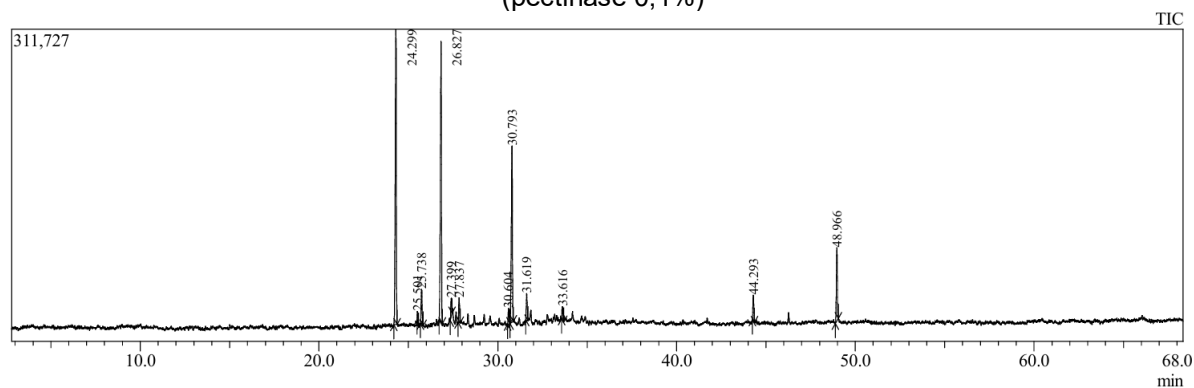


Figura A6: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)

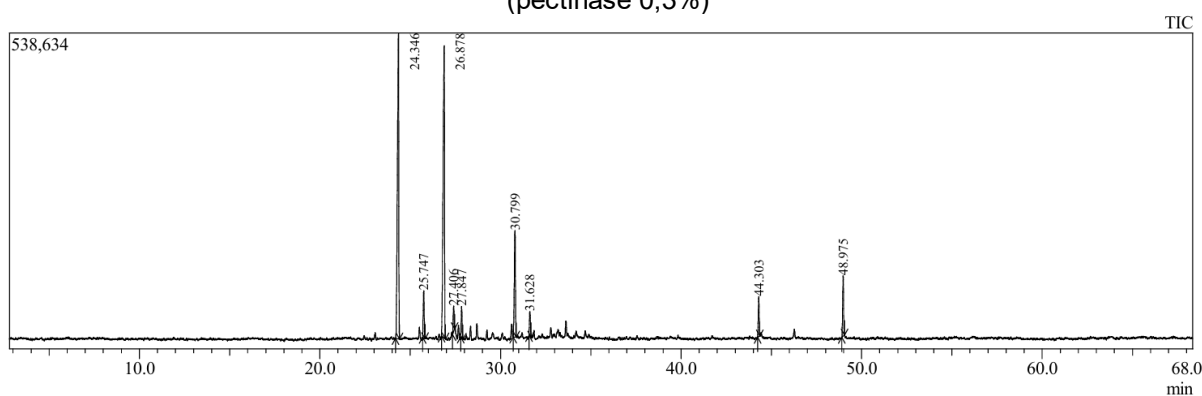
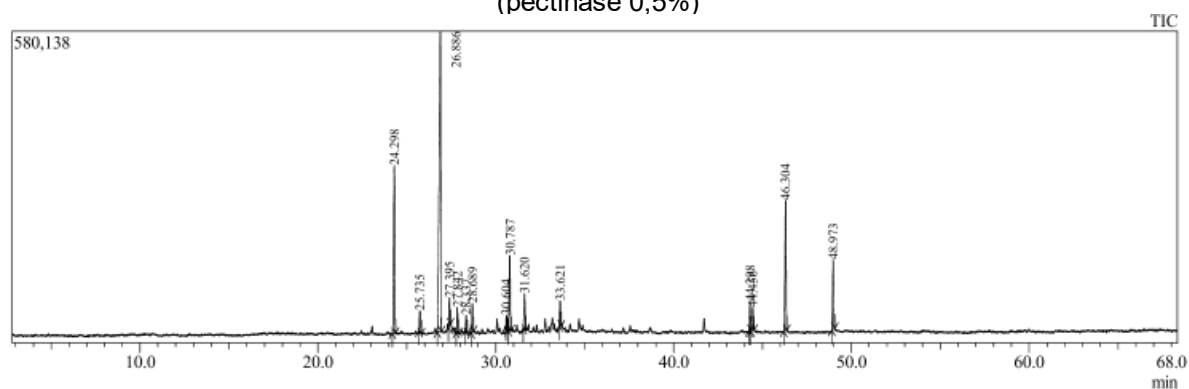


Figura A7: Cromatograma do óleo essencial de *Acmella oleracea* com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%)



APÊNDICE B – Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura da biomassa da hidrodestilação de *Acmella oleracea*

Figura B1: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação tradicional

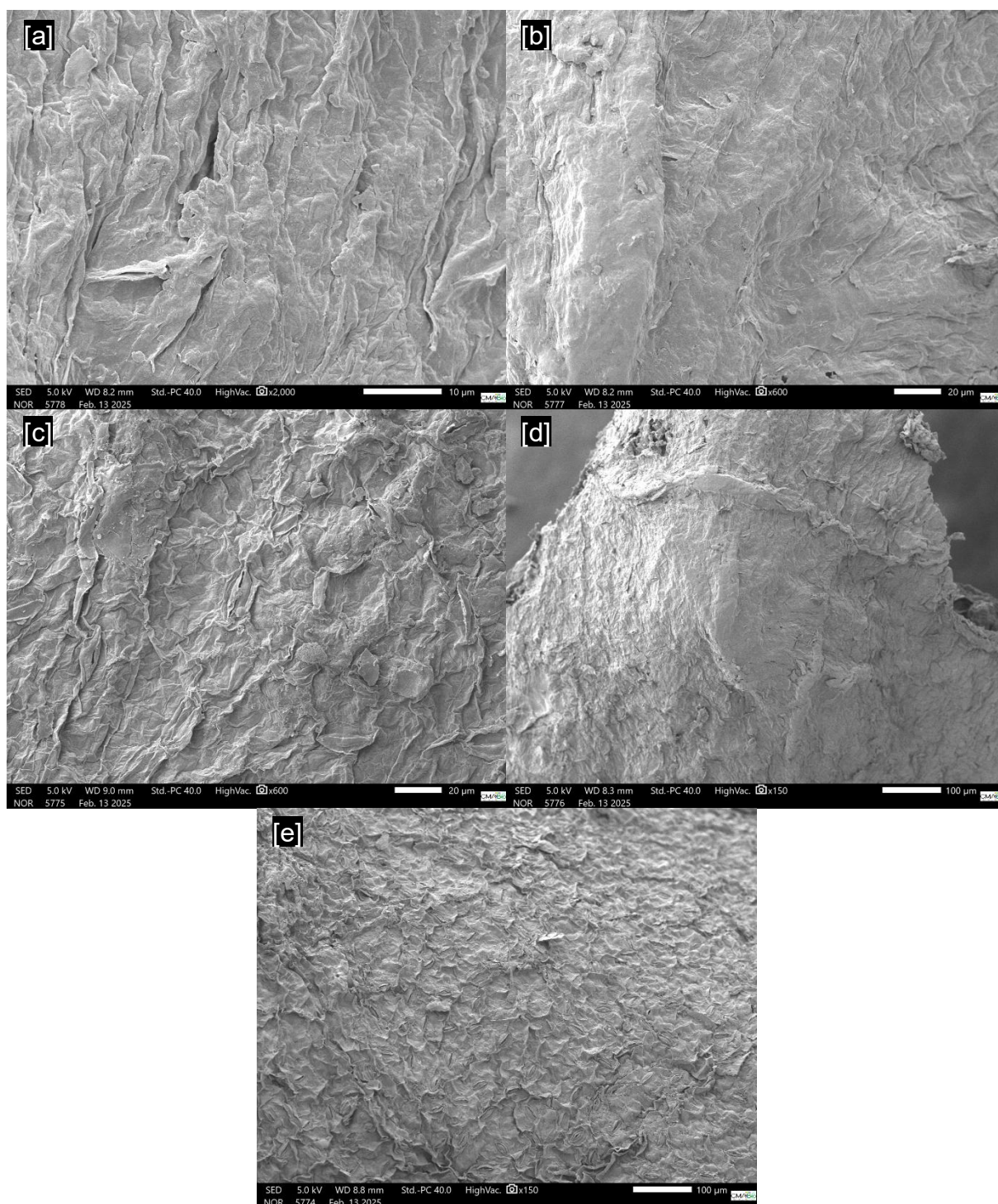


Figura B2: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação tradicional

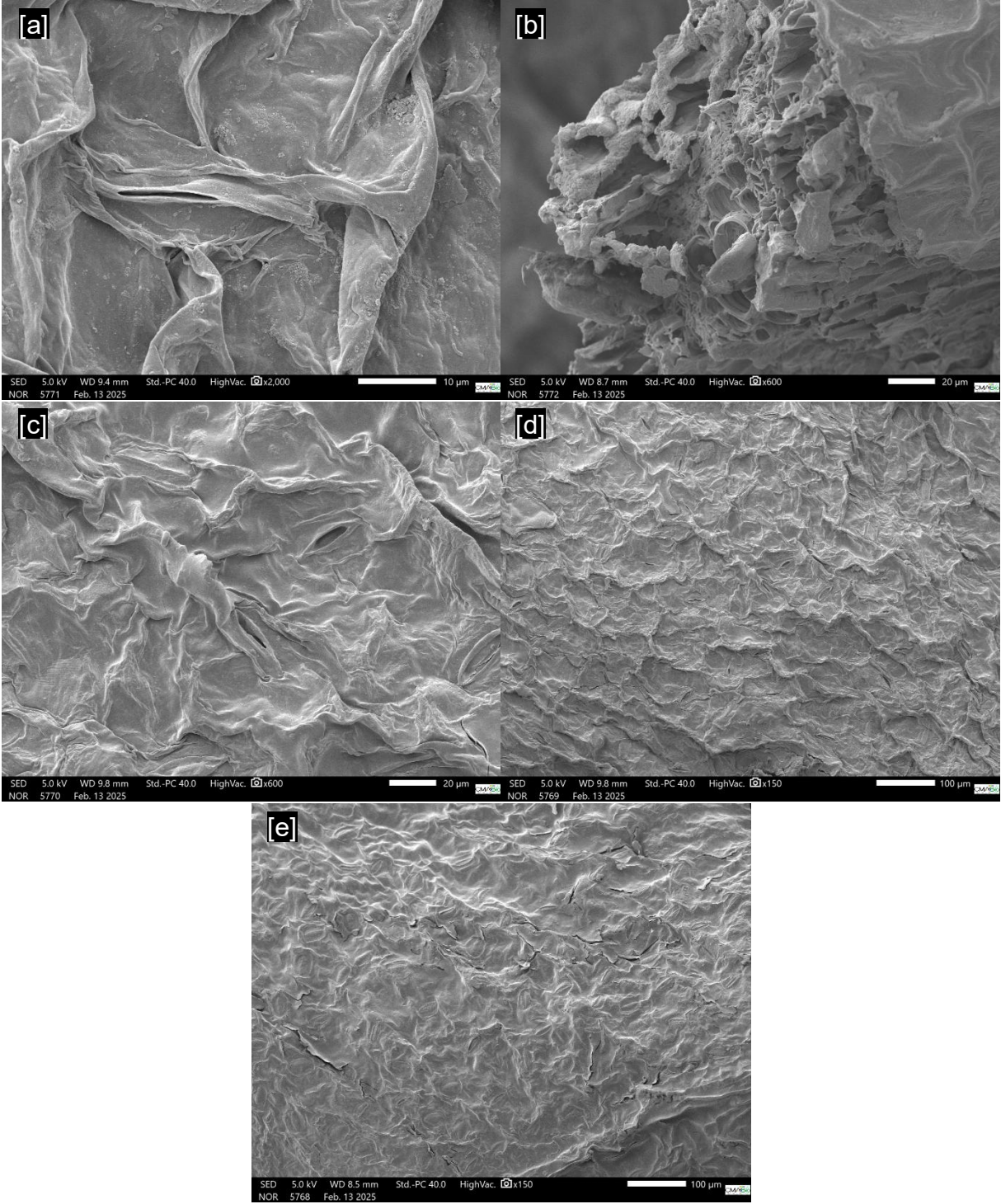


Figura B3: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)

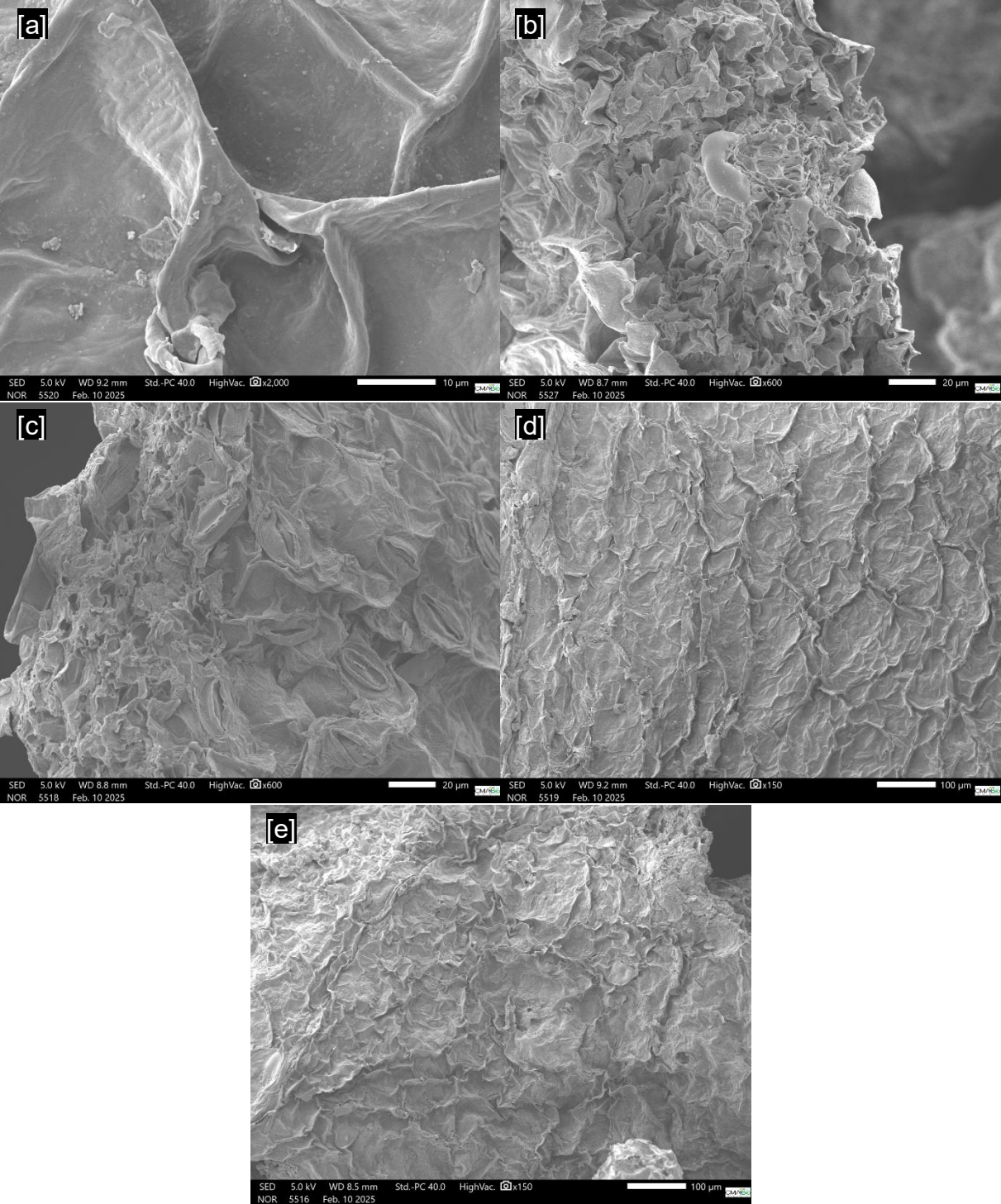


Figura B4: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,1%)

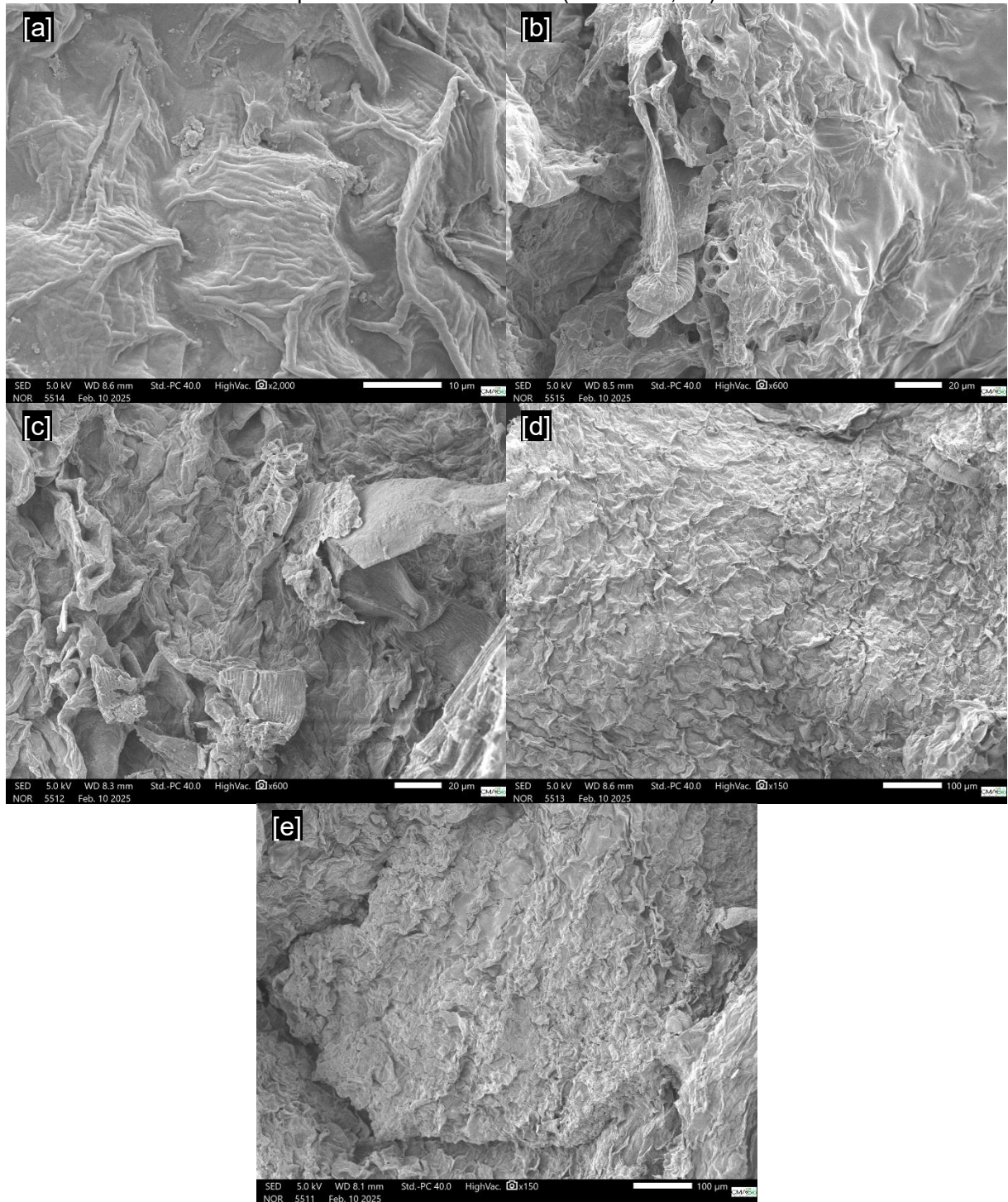


Figura B5: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)

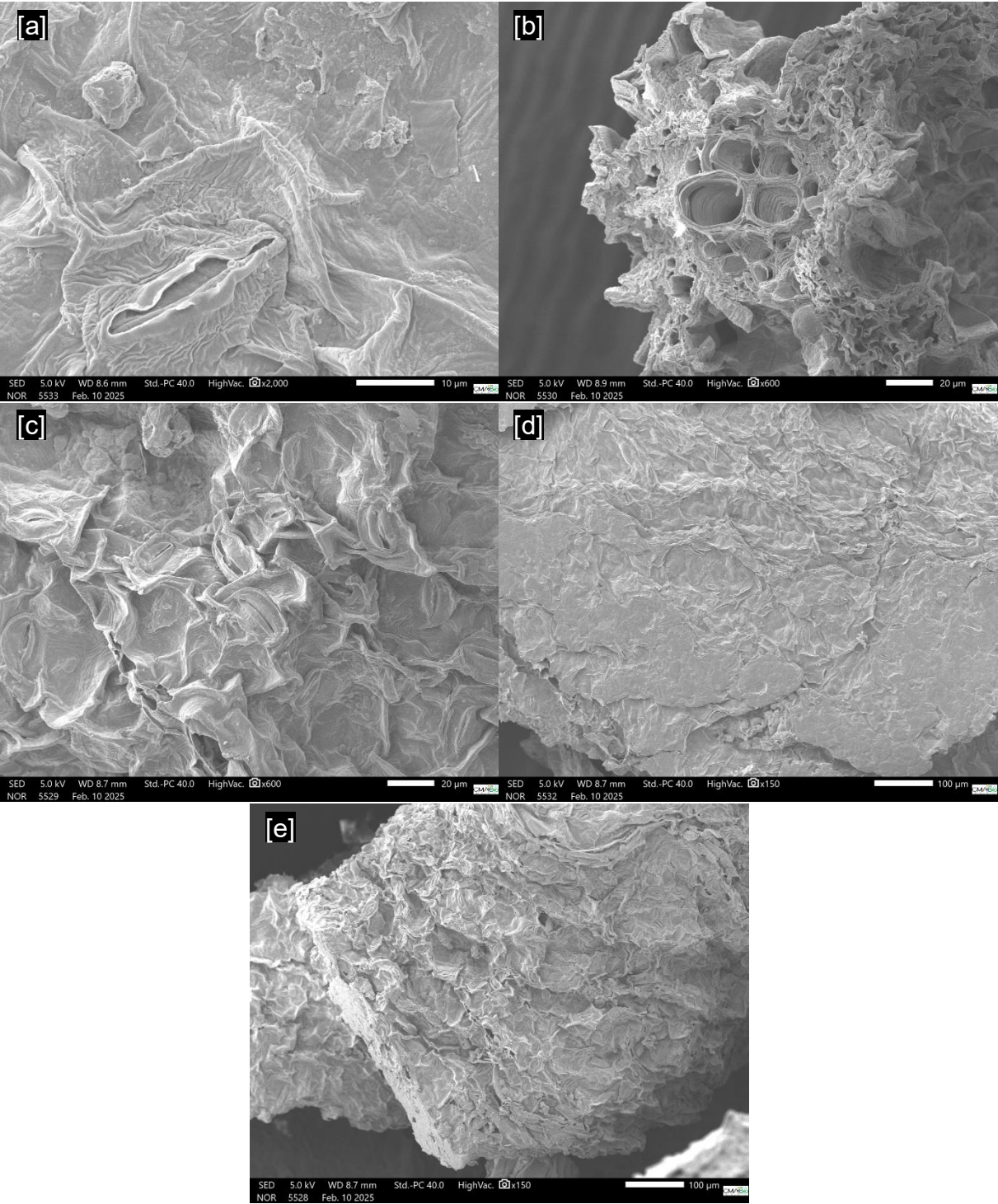


Figura B6: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,3%)

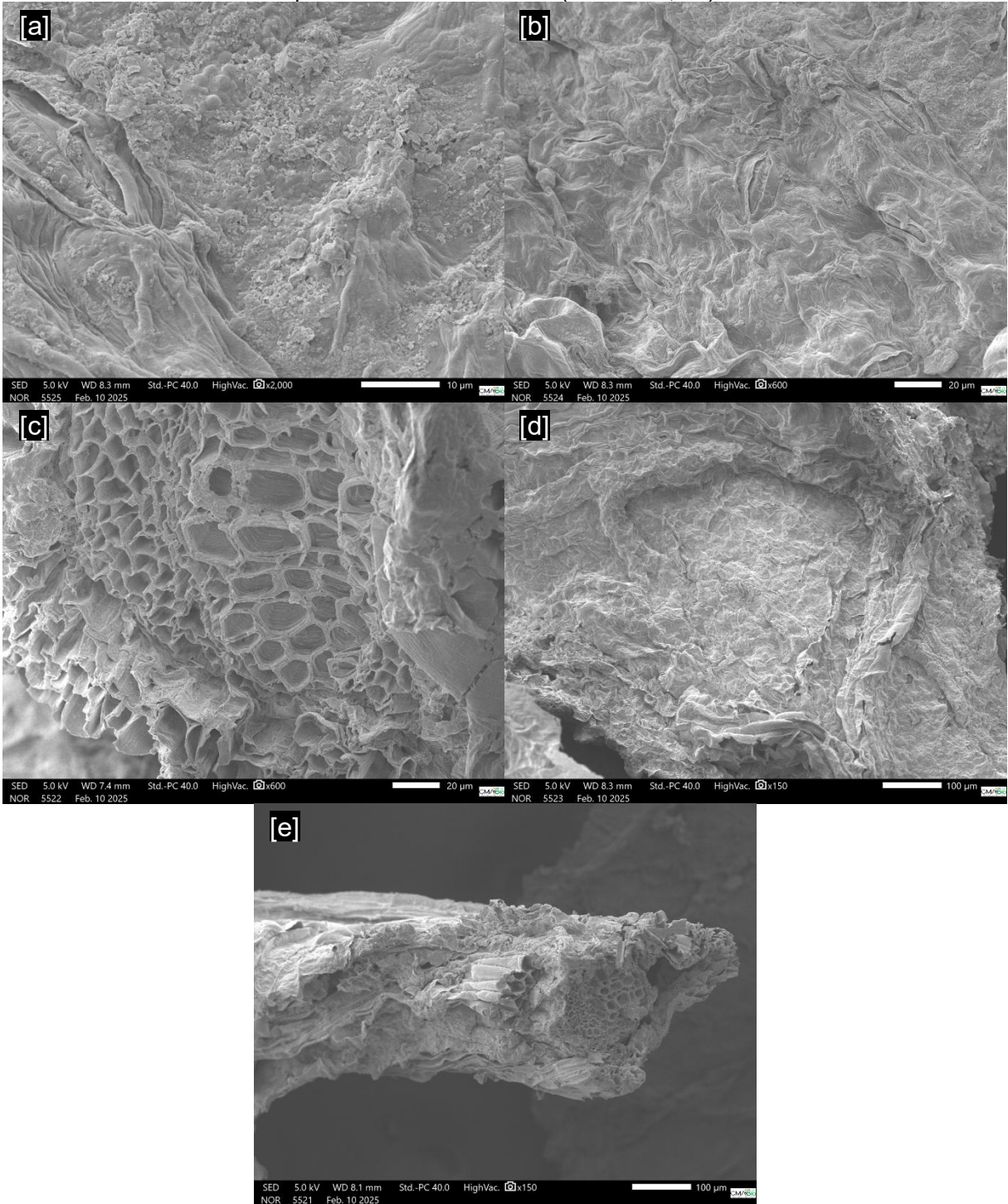


Figura B7: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)

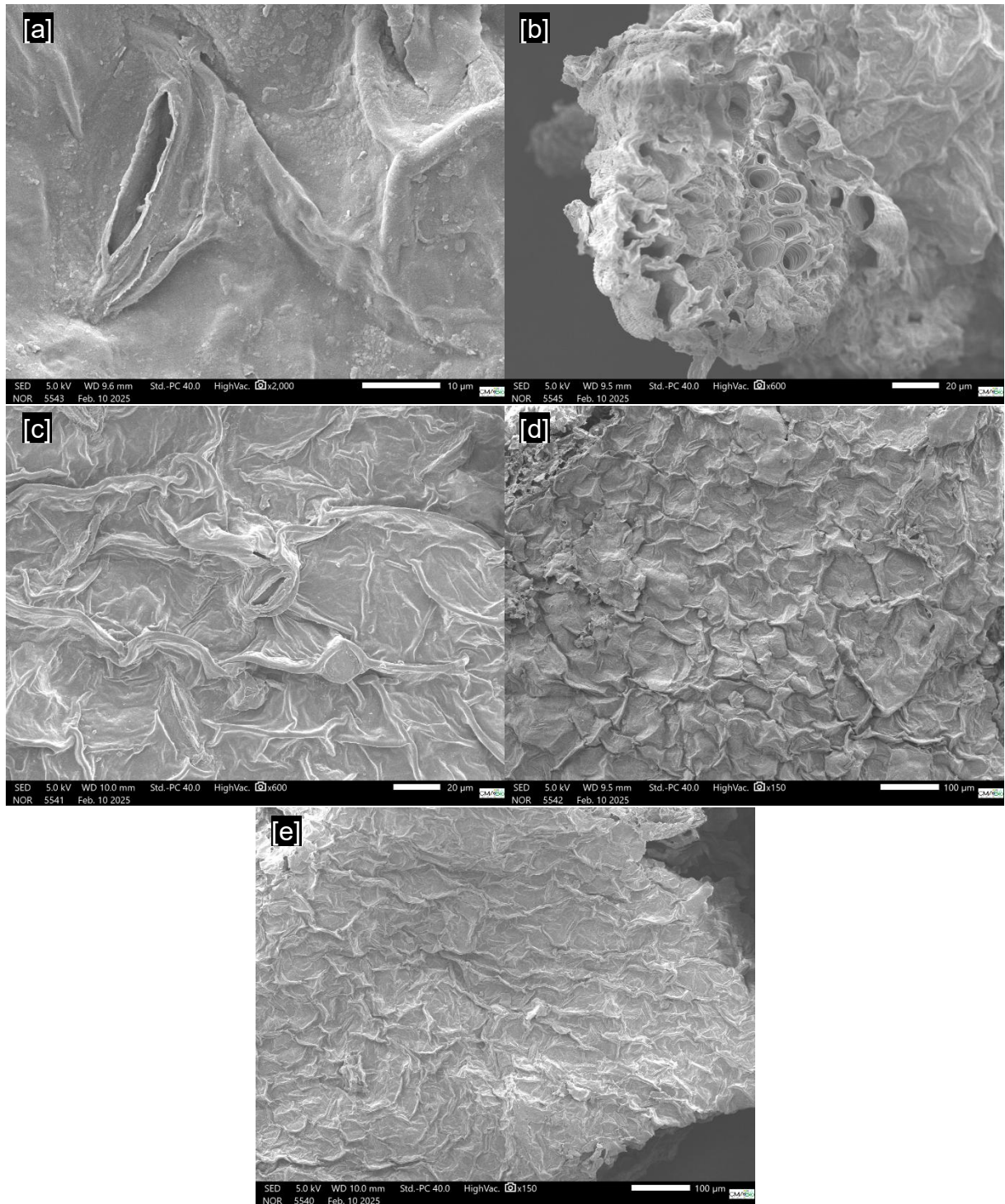


Figura B8: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (celulase 0,5%)

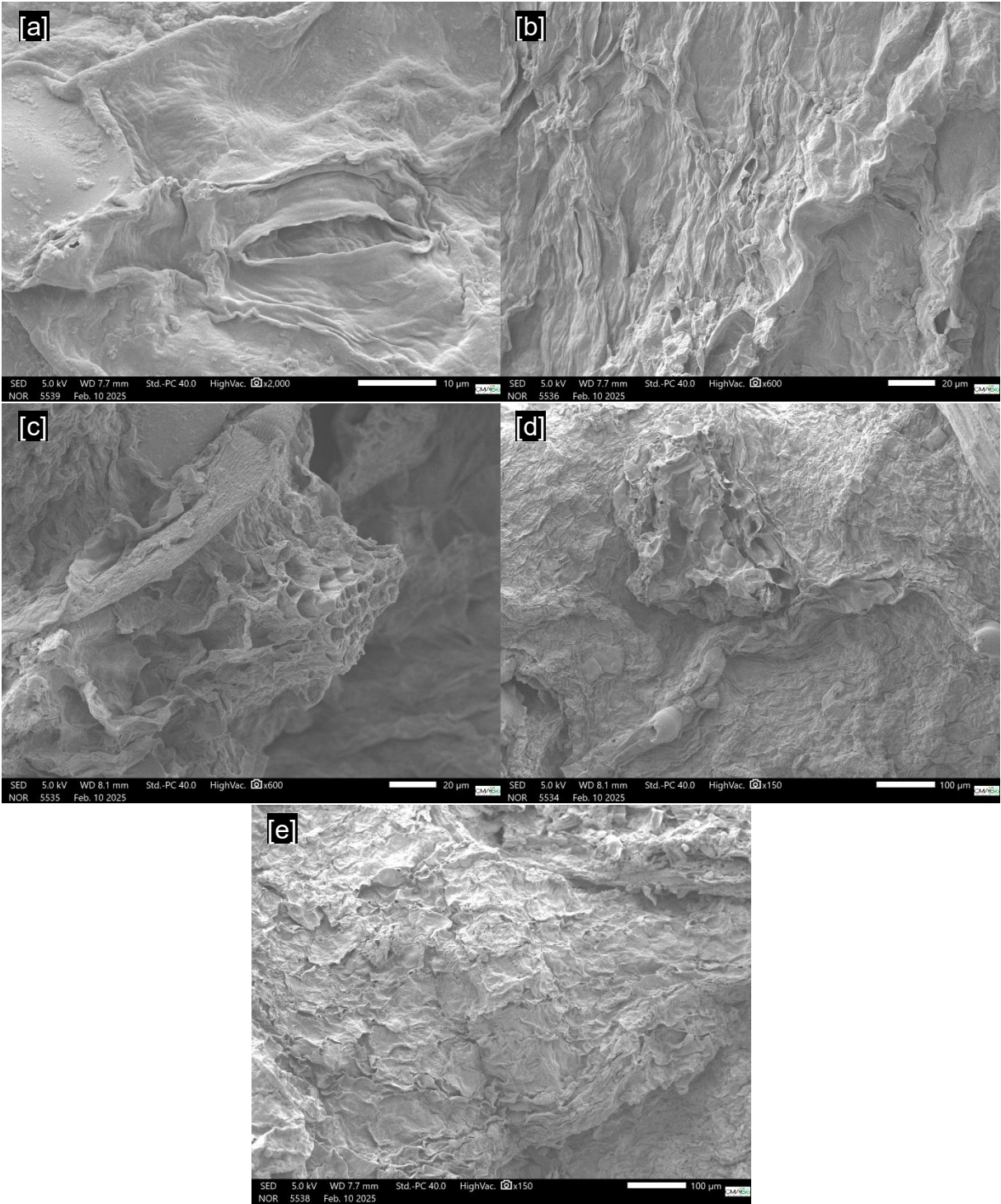


Figura B9: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)

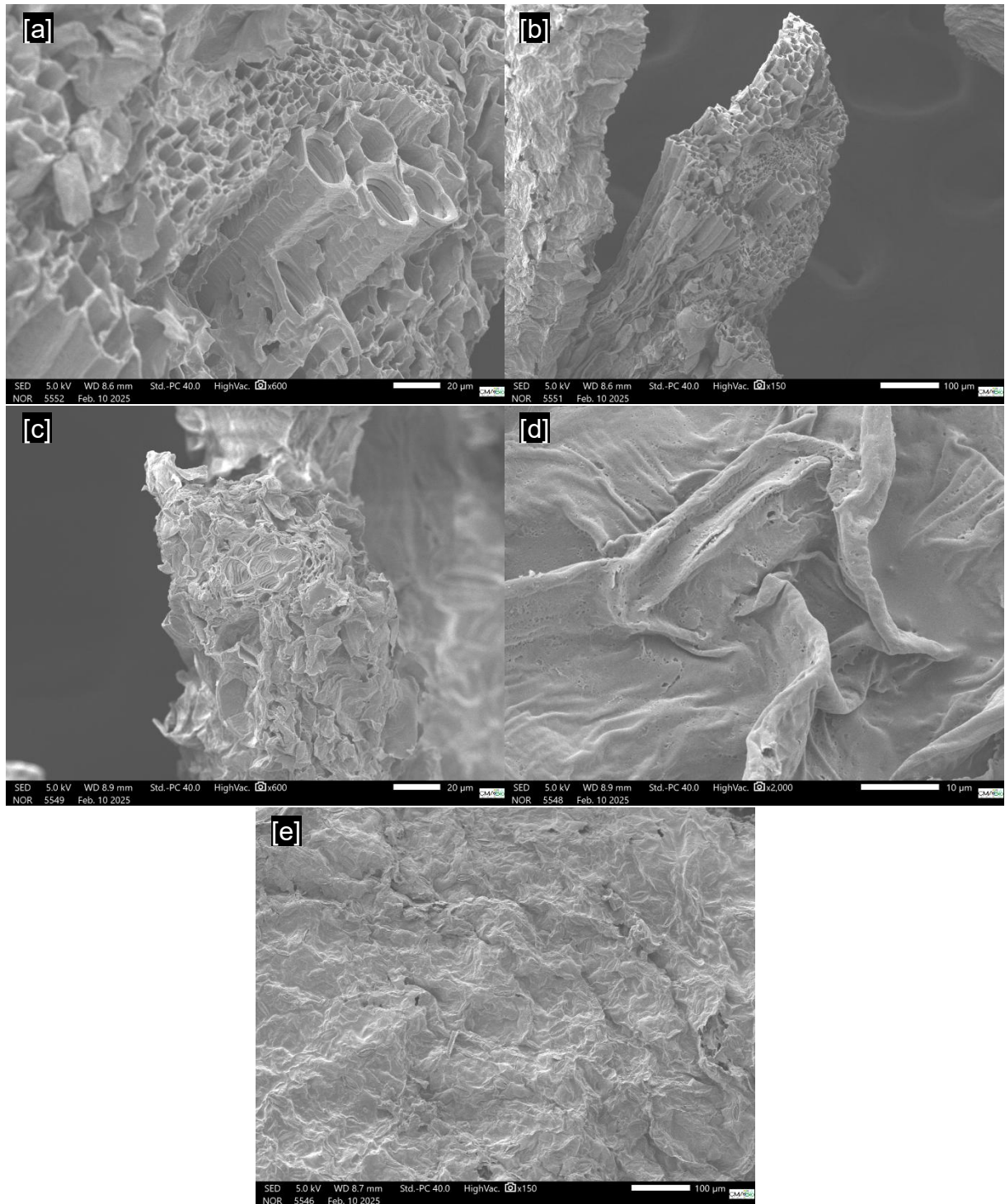


Figura B10: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,1%)

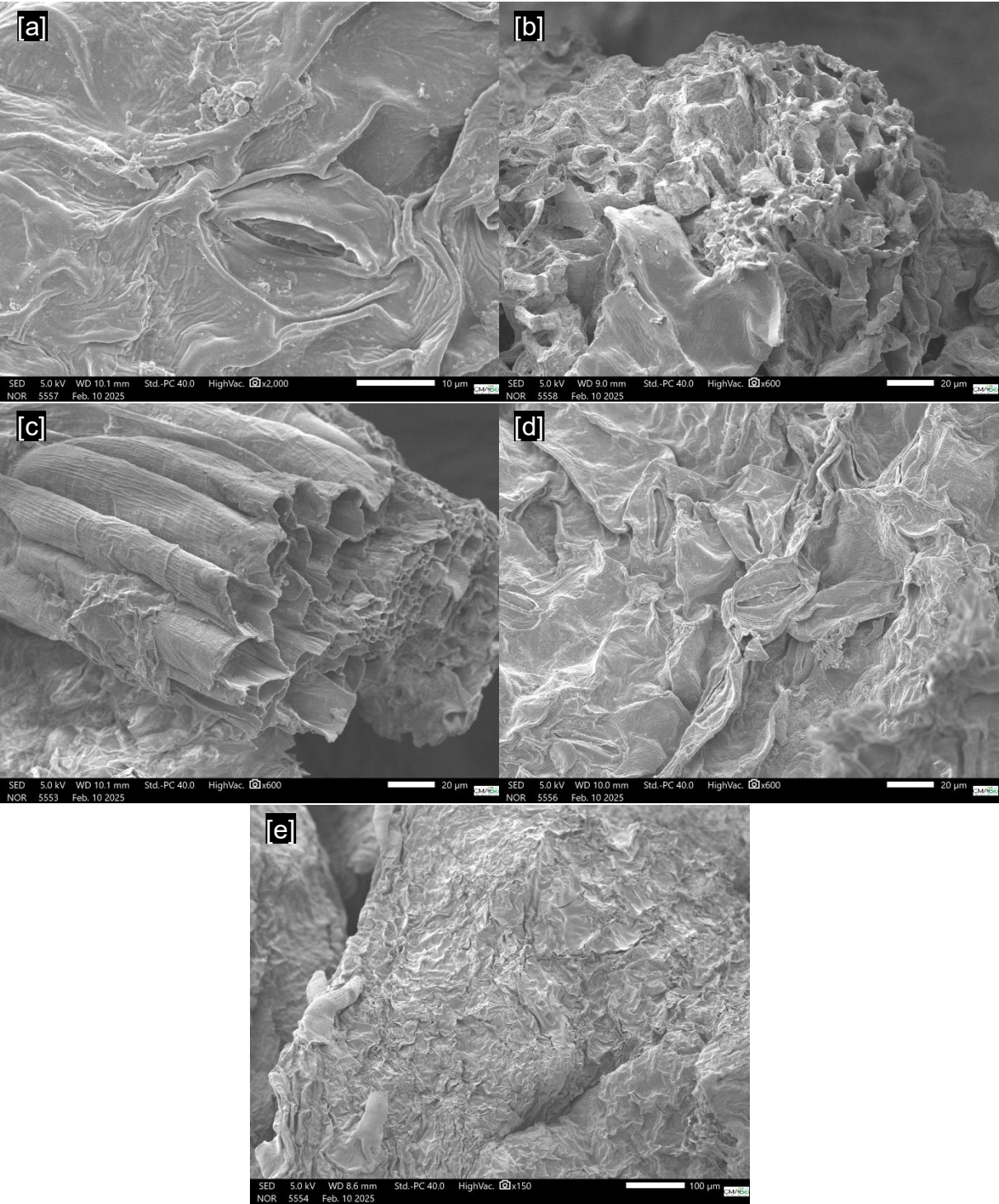


Figura B11: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)

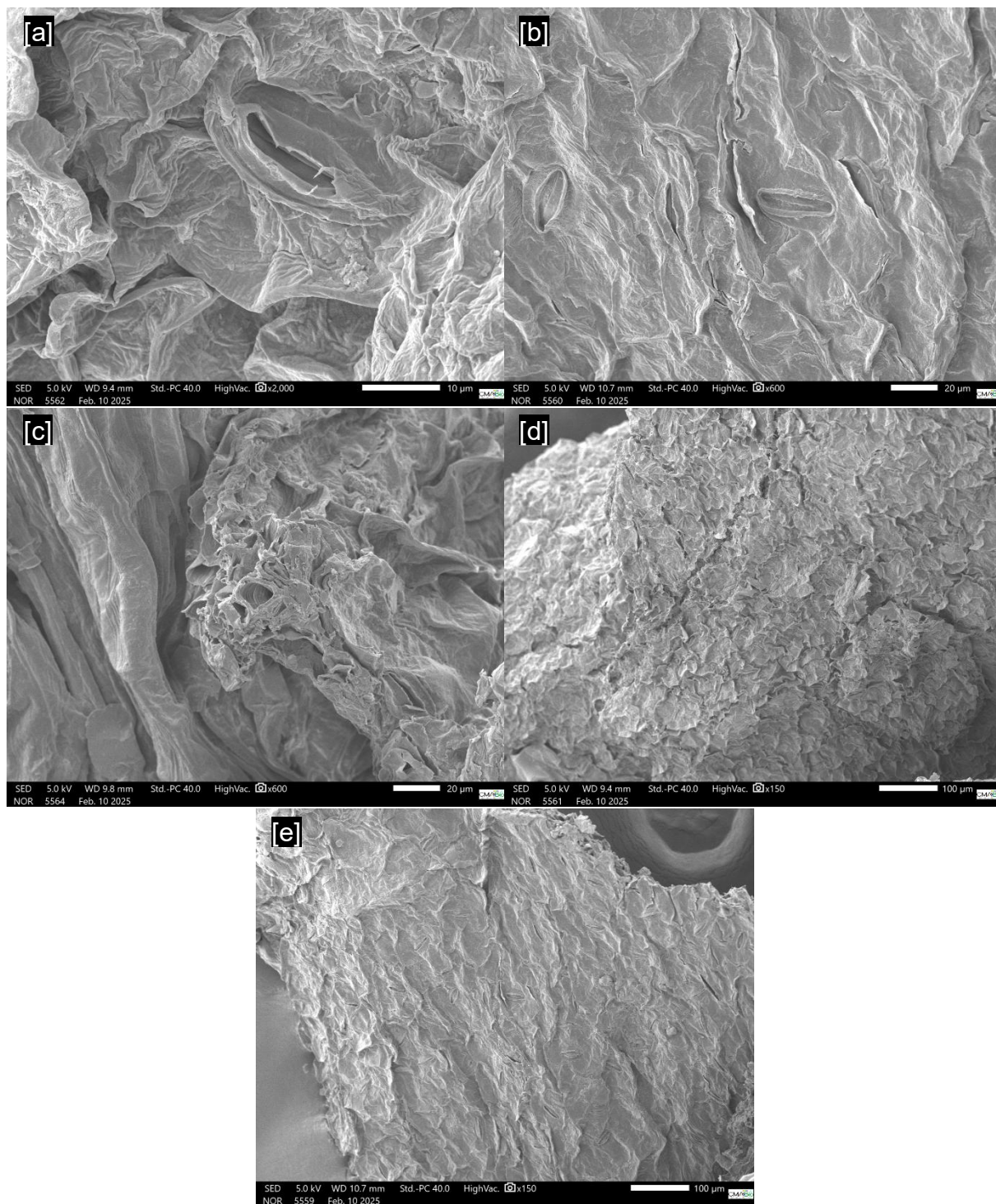


Figura B12: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,3%)

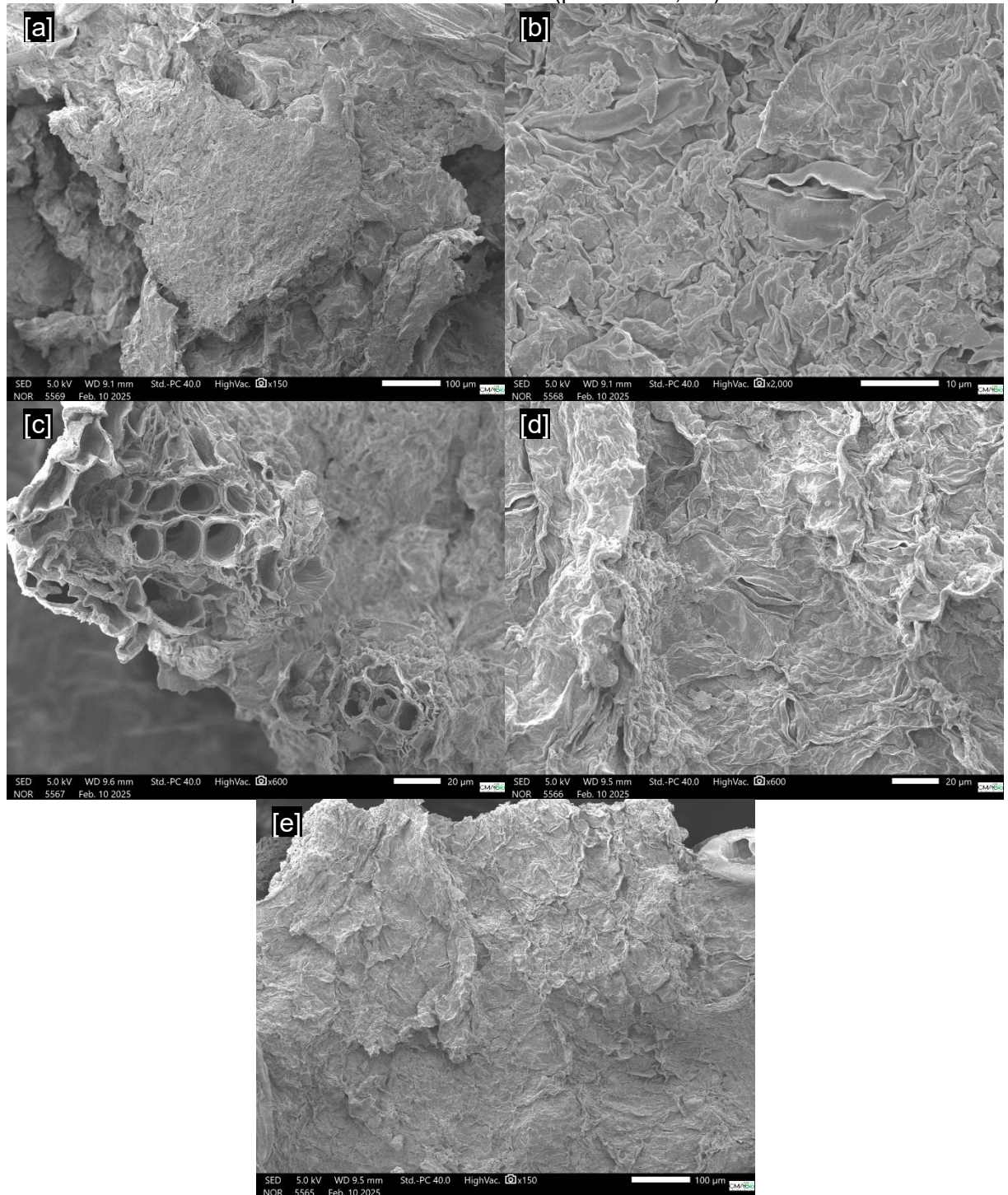


Figura B13: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu antes da hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%)

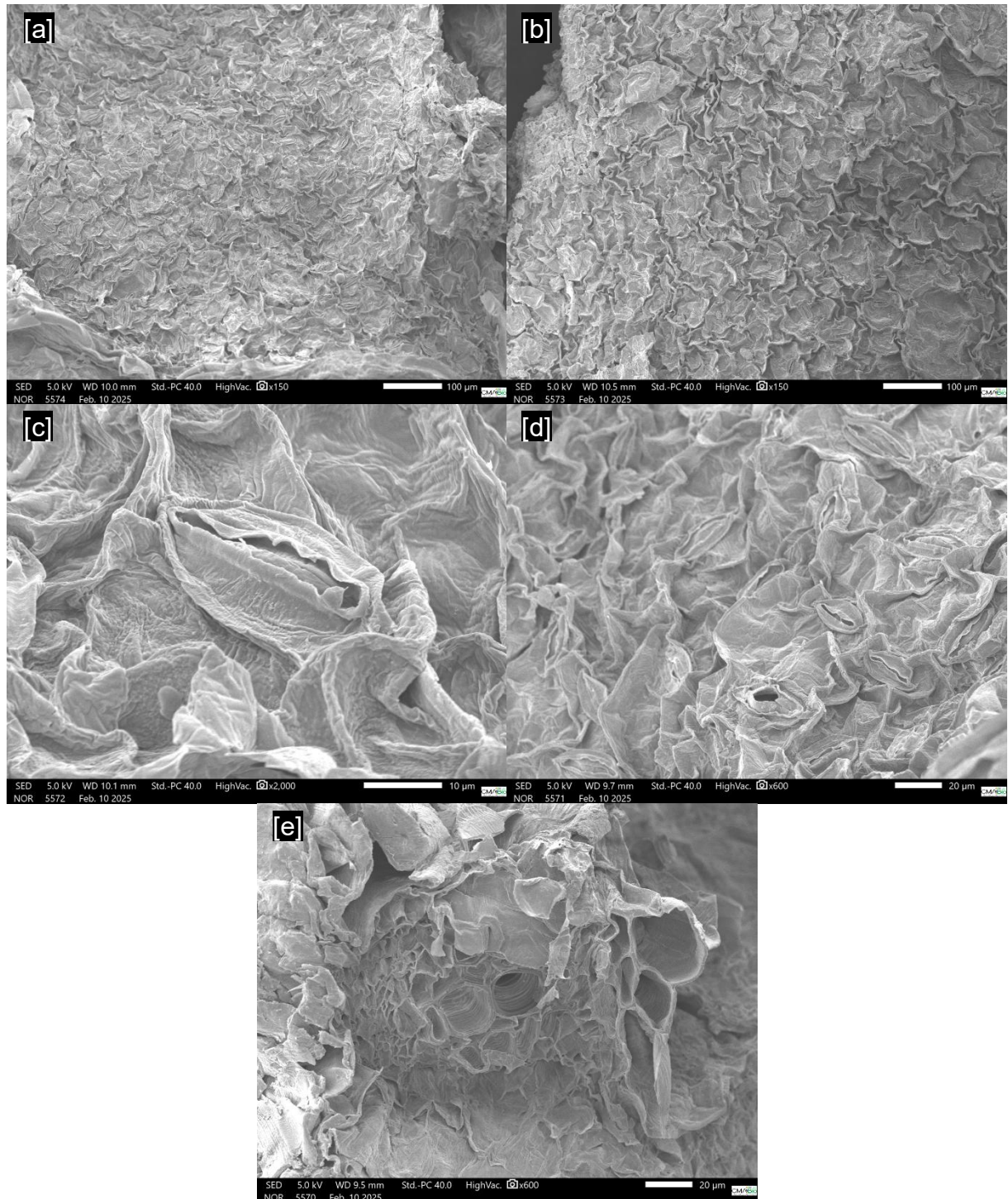
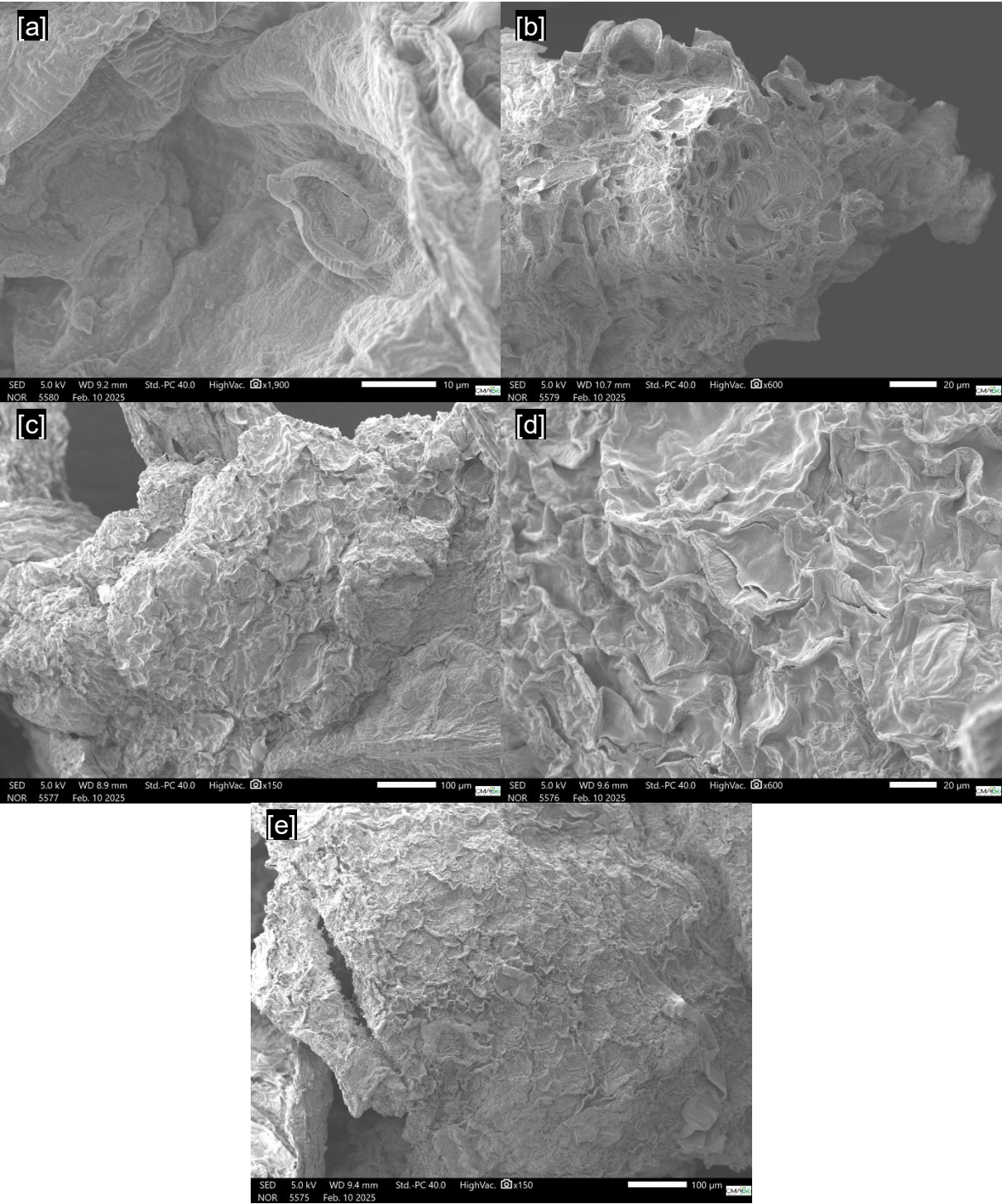


Figura B14: Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da folha de jambu após a hidrodestilação com pré-tratamento enzimático (pectinase 0,5%)



APÊNDICE C – ANOVA

Tabela C1: Análise de variância

Efeito	Grau de Liberdade	SS (AA)	MS (AA)	F	p
Variáveis	83	119941,0	1445,1	1378,6	0,000000
Repetições	1	6,8	6,8	6,5	0,012664
Erro	83	87,0	1,0		
Total	167	120034,8			

$R^2 = 0,999275$

$R^2 \text{ adj.} = 0,998542$