



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE ALIMENTOS  
TESE DE DOUTORADO

**EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE UXI (*Endopleura uchi*) COM CO<sub>2</sub>  
SUPERCRÍTICO: PARÂMETROS DE PROCESSO E QUALIDADE  
FUNCIONAL**

RAFAEL HENRIQUE HOLANDA PINTO

**BELÉM/PA  
2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE ALIMENTOS  
TESE DE DOUTORADO

**EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE UXI (*Endopleura uchi*) COM CO<sub>2</sub>  
SUPERCRÍTICO: PARÂMETROS DE PROCESSO E QUALIDADE  
FUNCIONAL**

RAFAEL HENRIQUE HOLANDA PINTO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Raul Nunes de Carvalho Jr

**BELÉM/PA  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da  
Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados  
fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

P659e Pinto, Rafael Henrique Holanda.  
Extração do óleo de uxi (Endopleura uchi) com  
CO2 Supercrítico: Parâmetros de processo e  
qualidade funcional / Rafael Henrique Holanda  
Pinto. — 2022.  
98 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Raul Nunes de Carvalho Junior  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e Tecnologia de  
Alimentos, Belém, 2022.

1. Amazônia. 2. Endopleura  
uchi. 3. tecnologia supercrítica. I.  
Título.

CDD 664.022

---

**EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE UXI (*Endopleura uchi*) COM CO<sub>2</sub>  
SUPERCRÍTICO: PARÂMETROS DE PROCESSO E QUALIDADE  
FUNCIONAL**

Por

RAFAEL HENRIQUE HOLANDA PINTO

DATA:

CONCEITO:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Raul Nunes de Carvalho Junior (Orientador - PPGCTA/UFPA)

---

Prof. Dr. Rosinelson da Silva Pena (Membro Interno - PPGCTA/UFPA)

---

Prof. Dr. Renan Campos Chisté (Membro Interno - PPGCTA/UFPA)

---

Prof. Dr. Nélio Teixeira Machado (Membro Externo – UFPA)

---

Profa. Dra. Cleidilane Sena Costa (Membro Externo – UFPA)

---

Profa. Dra. Alessandra Santos Lopes (Suplente Interno - PPGCTA/UFPA)

---

Prof. Dr. Edinaldo Teixeira (Suplente Externo – UNIFESSPA)

**BELÉM/PA  
2022**

Dedico a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

“O meu mais sincero agradecimento...

A Deus por me fortalecer todos os dias e permitir a conquista de vitórias;

A Nossa Senhora pela intercessão de meus pedidos a Deus;

A minha mãe, Roselene do Socorro Holanda Pinto, a minha avó Maria Consuelo Holanda Pinto e a minha tia Rosinele de Fátima Pinto dos Santos.

Mulheres que sempre estiveram ao meu lado, me aconselhando e contribuindo de várias maneiras para minha formação pessoal e profissional;

A minha esposa Larisse Santos Campelo Holanda, companheira de todos os dias, por todo o amor, carinho, paciência, estímulo e força;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raul Nunes de Carvalho Junior, pela oportunidade, pelos ensinamentos, paciência, e principalmente por acreditar no meu trabalho;

Aos Professores Doutores Renan Chisté, Rosinelson Pena, Nélcio Teixeira, Edinaldo Teixeira e Professoras Doutoradas Cleidilane Sena e Alessandra Lopes pelas participações na banca examinadora e contribuições para o melhoramento deste trabalho;

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos e da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Pará, pela ajuda durante todos esses anos de doutorado permitindo utilizar os laboratórios para o desenvolver experimentos;

Aos professores, técnicos e discentes do Laboratório de Óleos da Amazônia da Universidade Federal do Pará por contribuir no desenvolvimento do trabalho acerca do preparo da matéria-prima e análise de termogravimetria;

Aos professores da Faculdade de Ciências Farmacêuticas da UFPA por contribuir no desenvolvimento do trabalho a partir da realização da análise de DSC;

A professora Eloísa Helena de Aguiar Andrade pela parceria e oportunidade de realização da análise por cromatografia gasosa no Museu Paraense Emílio Goeldi, além de outros trabalhos desenvolvidos no período de Doutorado;

Aos meus colegas de Doutorado e Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, em especial, os amigos do Laboratório de Extração (LABEX) da Universidade Federal do Pará, pelo trabalho em equipe, compartilhamento de conhecimento, incentivo e momentos de alegria durante esse período;

Aos amigos colaboradores que estiveram comigo no desenvolvimento de artigos científicos, capítulos de livros e trabalhos de congressos;

A CAPES pela concessão de minha Bolsa de Doutorado;

A Universidade Federal do Pará que foi minha segunda casa por muitos anos.

“A persistência é o menor caminho do êxito”  
Charles Chaplin

## RESUMO

O uxi (*Endopleura uchi*) é uma espécie nativa da Amazônia brasileira, com frutos consumidos pela população local nas formas *in natura* ou como polpa. Outra forma de consumo alimentício inclui a utilização do caule para a produção de chá fitoterápico. No entanto, o interesse pela madeira desta espécie pela construção civil e naval contribui para a derrubada de árvores, o que prejudica o ecossistema. A fim de contribuir para a valorização e consequente conscientização para a preservação da espécie, bem como promover a aplicação da matéria-prima vegetal no cenário industrial, este trabalho teve como objetivo realizar a extração do óleo de uxi (*Endopleura uchi*) com CO<sub>2</sub> supercrítico a fim de identificar os melhores parâmetros de processo, além de caracterizar o produto obtido (óleo de uxi) e potencializar possíveis aplicações como um alimento funcional a partir da composição química. O processo de extração do óleo de uxi com CO<sub>2</sub> supercrítico foi realizado nas temperaturas de 40 e 60 °C e pressões de 200, 300 e 400 bar utilizando polpa liofilizada. A melhor condição de extração foi observada em 40°C e 300 bar, com alto rendimento global, menor consumo energético e menor trabalho realizado pela bomba. A composição química do óleo apresentou predomínio de ácidos graxos insaturados, com destaque para os ácidos oleico (n-9) e linoleico (n-6). Carotenóides também foram quantificados no produto obtido. Os índices de aterogenicidade (IA), trombogenicidade (IT) e a razão de hipocolesterolêmicos/hipercolesterolêmicos (H/H) indicaram que o óleo de uxi possui boa qualidade funcional.

**Palavras-chave:** Amazônia, *Endopleura uchi*, tecnologia supercrítica

## ABSTRACT

The uxi (*Endopleura uchi*) is a native species of the Brazilian Amazon, with fruits consumed by the local population in natura forms or as pulp. Another form of food consumption includes the use of the stem for the production of herbal tea. However, the interest in the wood of this species by civil and naval construction contributes to the felling of trees, which harms the ecosystem. In order to contribute to the appreciation and consequent awareness for the preservation of the species, as well as to promote the application of the vegetable raw material in the industrial scenario, this work aimed to extract the uxi oil (*Endopleura uchi*) with supercritical CO<sub>2</sub> at in order to identify the best process parameters, in addition to characterizing the product obtained (uxi oil) and potentializing possible applications as a functional food from the chemical composition. The uxi oil extraction process with supercritical CO<sub>2</sub> was carried out at temperatures of 40 and 60 °C and pressures of 200, 300 and 400 bar using lyophilized pulp. The best extraction condition was observed at 40°C and 300 bar, with high overall yield, lower energy consumption and less work done by the pump. The chemical composition of the oil showed a predominance of unsaturated fatty acids, especially oleic (n-9) and linoleic (n-6) acids. Carotenoids were also quantified in the obtained product. The indices of atherogenicity (AI), thrombogenicity (TI) and the ratio of hypocholesterolemic/hypercholesterolemic (H/H) indicated that uxi oil has good functional quality.

**Keywords:** Amazon, *Endopleura uchi*, supercritical technology

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	21
Figura 2: Ácidos graxos presentes no uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	26
Figura 3: Fitoesteróis presentes no uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	28
Figura 4: $\alpha$ -tocoferol (vitamina E).....	29
Figura 5: $\beta$ -caroteno.....	31
Figura 6: Bergenina.....	32
Figura 7: Diagrama de fases para um componente puro.....	37
Figura 8: Representação do processo de obtenção de extratos via tecnologia supercrítica.....	39
Figura 9: Curva típica de processo de extração com fluido supercrítico apresentado os três períodos característicos: Taxa de extração constante (CER), taxa de extração decrescente (FER) e período difusional (DC).....	42
Figura 10: Polpa de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ) liofilizada.....	44
Figura 11: Processo de extração do óleo de uxi com CO <sub>2</sub> supercrítico...	46
Figura 12: Disposição da polpa de uxi no interior da célula de extração.....	47
Figura 13: Isotermas de rendimento global de óleo de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ) extraído com CO <sub>2</sub> supercrítico.....	55

Figura 14: Solubilidade do óleo de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ) em CO <sub>2</sub> supercrítico.....	59
Figura 15 Óleo de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	61
Figura 16: Comportamento termogravimétrico do óleo de uxi extraído com CO <sub>2</sub> supercrítico a 40°C/300 bar.....	67
Figura 17: Calorimetria exploratória diferencial ou Differential scanning calorimetry (DSC) para o óleo de uxi extraído CO <sub>2</sub> supercrítico a 40°C/300 bar.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição nutricional dos frutos de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	22
Tabela 2. Compostos bioativos do uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	25
Tabela 3. Propriedades críticas de componentes puros.....	38
Tabela 4. Parâmetros de interação binária.....	56
Tabela 5. Propriedades termofísicas calculadas por metodologia de contribuição de grupos.....	57
Tabela 6. Composição de ácidos graxos do óleo de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ).....	62
Tabela 7. Composição de triglicerídeos do óleo de uxi ( <i>Endopleura uchi</i> ) calculada.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AGS</b>	Ácidos Graxos Saturados
<b>AGI</b>	Ácidos Graxos Insaturados
<b>AGMI</b>	Ácidos Graxos Monoinsaturados
<b>AGPI</b>	Ácidos Graxos Poliinsaturados
<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>CG</b>	Cromatografia Gasosa
<b>DSC</b>	Calorimetria Exploratória Diferencial
<b>DTA</b>	Análise Térmica Diferencial
<b>DTG</b>	Termogravimetria Derivada
<b>EM</b>	Espectrometria de Massa
<b>EMAG</b>	Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos
<b>FO</b>	Função Objetivo
<b>H/H</b>	Razão de Hipo/Hipercolesterolêmicos
<b>IA</b>	Índice de Aterogenicidade
<b>IT</b>	Índice de Trombogenicidade
<b><math>m_a</math></b>	Massa de amostra
<b><math>m_o</math></b>	Massa de óleo
<b>MM</b>	Massa Molar
<b>MMV</b>	Válvula Micrométrica
<b>P</b>	Pressão

$P_c$	Pressão Crítica
$R$	Constante universal dos gases
$R_o$	Rendimento global de óleo
$T$	Temperatura
<b>TAG</b>	Triglicerídeos
$T_b$	Temperatura de Ebulição
$T_c$	Temperatura Crítica
<b>TG</b>	Termogravimetria
$U_a$	Umidade da amostra
$V$	Volume
<b>VBA</b>	Visual Basic for Application
$X$	Número de Carbonos
$x^c_i$	Fração de Líquido Calculado
$x^e_i$	Fração de Líquido Experimental
$Y$	Número de Ligações Duplas
$y^c_i$	Fração de Gás Calculado
$y^e_i$	Fração de Gás Experimental
$\varepsilon$	Porosidade
$\rho_a$	Densidade Aparente
$\rho_r$	Densidade Real
$\omega$	Fator acêntrico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	19
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.UXI (<i>Endopleura uchi</i>).....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.1. Características botânicas.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.2. Composição nutricional.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA.....</b>	<b>23</b>
3.2.1. Ácidos graxos.....	23
3.2.2. Fitoesteróis.....	26
3.2.3. Tocoferóis.....	29
3.2.4. Carotenóides.....	30
3.2.5. Compostos fenólicos.....	31
3.2.6. Aromas e compostos voláteis.....	33
<b>3.3.PRODUTOS E APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. EXTRAÇÃO COM FLUIDO SUPERCRÍTICO.....</b>	<b>36</b>
3.4.1. Tecnologia Supercrítica.....	36

<b>3.4.2. Extração com CO<sub>2</sub> Supercrítico.....</b>	<b>38</b>
3.4.2.1.Pressão e Temperatura.....	39
3.4.2.2.Densidade e Solubilidade.....	40
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1. AQUISIÇÃO E PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3. DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA.....</b>	<b>45</b>
<b>4.4. EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE UXI COM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO....</b>	<b>45</b>
<b>4.5. CÁLCULO DA SOLUBILIDADE DO ÓLEO DE UXI EM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO.....</b>	<b>47</b>
<b>4.6. CROMATOGRAFIA GASOSA E ESPECTROMETRIA DE MASSA (CG/EM).....</b>	<b>49</b>
<b>4.7. QUALIDADE FUNCIONAL DO ÓLEO DE UXI.....</b>	<b>50</b>
<b>4.8. CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS DO ÓLEO DE UXI.....</b>	<b>51</b>
<b>4.9. ESTUDO TERMOANALÍTICO.....</b>	<b>51</b>
<b>4.9.1. Termogravimetria (TG-DTG).....</b>	<b>51</b>
<b>4.9.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....</b>	<b>52</b>
<b>4.10. DETERMINAÇÃO DE CAROTENÓIDES TOTAIS.....</b>	<b>52</b>
<b>4.11. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>52</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA POLPA DE UXI LIOFILIZADA.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2. RENDIMENTO GLOBAL DO ÓLEO DE UXI.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3. SOLUBILIDADE DO ÓLEO DE UXI EM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO CALCULADA.....</b>	<b>56</b>
<b>5.4. PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS.....</b>	<b>59</b>
<b>5.5 QUALIDADE FUNCIONAL.....</b>	<b>63</b>
<b>5.6 COMPOSIÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS CALCULADA.....</b>	<b>64</b>
<b>5.7 ESTUDO TERMOANALÍTICO.....</b>	<b>65</b>
<b>5.8 CAROTENÓIDES TOTAIS.....</b>	<b>68</b>

<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os frutos da floresta amazônica são considerados boas fontes de nutrientes (vitaminas e minerais) e principalmente compostos bioativos (ácidos graxos insaturados, carotenóides, tocoferóis, fitoesteróis e flavonóides). Essas espécies são frequentemente associadas a atividades biológicas antiinflamatórias, antimicrobianas, antiproliferativas, antiparasitárias, antioxidantes, cardioprotetoras, anticancerígenas e neuroprotetoras. Por essa razão, cresce o interesse pelo cultivo e processamento de matrizes vegetais amazônicas, a fim de elaborar produtos alimentícios com potenciais nutricionais e funcionais, e características sensoriais desejáveis (NERI-NUMA et al., 2018; GUPTA e PRAKASH, 2014; GUPTA e PRAKASH, 2009).

Entre as espécies do bioma amazônico brasileiro, o uxi (*Endopleura uchi* Cuatrec.) destaca-se em razão do alto consumo pela população local na forma *in natura*. Em ilhas próximas a cidade de Belém, Pará, Brasil, comunidades agrícolas realizam o manejo da espécie para comercialização dos frutos no mercado local (SHANLEY e CARVALHO, 2005). Embora seja uma espécie conhecida na região amazônica, poucos são os estudos sobre a extração de compostos bioativos lipídicos da polpa do uxi, ou referentes à caracterização química de óleos e suas propriedades funcionais. Pesquisas dão ênfase a outras partes da espécie *Endopleura uchi* (cascas do caule) pela presença de compostos bioativos polares a exemplo da bergenina (SILVA e TEIXEIRA, 2015). Entretanto sabe-se que a polpa de uxi contém ácidos graxos insaturados, fitoesteróis e tocoferóis os quais possuem atividades cardioprotetoras, anticancerígenas e antioxidantes (BERTO et al. 2015).

O conhecimento da natureza das matérias-primas vegetais oleaginosas, como do uxi, por si não é suficiente para a obtenção de compostos bioativos em elevados rendimentos. A qualidade dos extratos lipídicos depende de fatores do processo de extração, como tempo, temperatura, natureza do solvente, relação solvente/matéria-prima, disponibilidade de oxigênio e composição do extrato. Um bom solvente deve ter baixo ponto de ebulição, baixa toxicidade, não contribuir para processos de degradação e ter alto poder de solubilidade. Os métodos convencionais com solvente orgânico líquido e por maceração, embora possibilitem altos rendimentos, são demorados, expondo as matérias-primas a processos de rancidez hidrolítica e oxidativa (PINTO et al., 2018). Outro agravante associado ao uso de solventes orgânicos líquidos incide na necessidade de etapas de evaporação. Por esse motivo, o interesse de pesquisadores acadêmicos e das indústrias de alimentos por métodos de extração verde vem aumentando, além da necessidade do atendimento a normas de legislação ambiental e de saúde, cada vez mais exigentes (CARVALHO et al., 2005). Outro fator que acrescenta a busca por metodologias limpas é a elaboração de produtos isentos de aditivos sintéticos de conservação, para aumento da vida de prateleira (DA SILVA, ROCHA-SANTOS e DUARTE, 2016).

A extração com fluido supercrítico é um exemplo de tecnologia verde e considerado um método alternativo e consolidado para obtenção de extratos de boa qualidade. Em estado supercrítico, os solventes apresentam alta difusividade e densidade, favorecendo maior solubilidade dos solutos. Essas características podem ser facilmente ajustadas através das propriedades temperatura e pressão. Outras vantagens da técnica consistem na possibilidade do uso de solventes não-tóxicos e não-inflamáveis, como é o caso do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e obtenção de extratos isentos de resíduos

de solvente. Durante etapa de despressurização, o CO<sub>2</sub> retorna ao estado gasoso natural em condição ambiente, sem necessidade de processos de separação solvente/soluto subsequentes à extração (HERRERO et al., 2013; TRIANA-MALDONADO, TORIJANO-GUTIÉRREZ e GIRALDO-ESTRADA, 2017).

## 2.OBJETIVOS

### 2,1 OBJETIVO GERAL

Determinar os parâmetros de processo da extração do óleo da polpa de uxi (*Endopleura uchi*) liofilizada com CO<sub>2</sub> supercrítico e avaliar a qualidade funcional do produto obtido.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a polpa de uxi liofilizada;
- Estudar os parâmetros de extração do óleo da polpa de uxi com CO<sub>2</sub> supercrítico;
- Calcular a solubilidade do óleo de uxi em CO<sub>2</sub> supercrítico;
- Determinar a composição de ácidos graxos do óleo de uxi;
- Mensurar a composição de triglicerídeos do óleo de uxi;
- Avaliar a qualidade funcional do óleo de uxi;
- Realizar o estudo termoanalítico do óleo de uxi.
- Determinar a concentração de carotenóides totais no óleo de uxi.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 UXI (*Endopleura uchi*)

##### 3.1.1 Características botânicas

O uxi, de nome científico *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec. [sin. *Sacoglottis uchi* Huber], é uma espécie pertencente à família Humiriaceae, originária do bioma amazônico brasileiro, encontrada em áreas de terra firme, estando dispersa por toda a região. Esta espécie é popularmente conhecida como uxi, uxi liso e uxi amarelo (ALBUQUERQUE et al., 2014; SILVA et al., 2009). A árvore, denominada uxizeiro, pode atingir de 25 a 30 m de comprimento, com diâmetro de tronco de 0,6 a 1 m. Esta espécie pode ser encontrada no estuário do Estado do Pará, Brasil, nas regiões (Bragantina, Guamá, Capim e Furos), e parte ocidental da Ilha do Marajó. Em regiões de floresta fechada, a densidade de árvores de uxi é inferior a 1 unidade por hectare (0,8 inds/ha). Em áreas de manejo, localizadas em ilhas próximas à cidade de Belém, Pará, Brasil, é possível encontrar de 19 a 35 árvores por hectare (19–35 inds/ha). O período de floração ocorre entre os meses de outubro e novembro, e a colheita dos frutos de fevereiro a maio (SHANLEY et al., 2012; SHANLEY e MEDINA, 2005).

O fruto (Figura 1) é uma drupa elipsóide oblonga de 5 a 7 cm de comprimento e 3 a 4 cm de diâmetro, pesando entre 50 e 70 g, verde-amarelado ou marrom-escuro quando maduro (MAGALHÃES et al., 2007; BEZERRA, PEREIRA e FERREIRA, 2006). De acordo com Shanley et al. (2012) a produção varia de 500 a 1530 frutos/árvore. Shanley e Medina (2005) relatam que amostras de 24 árvores analisadas durante 5 anos, produziram 80% dos frutos a cada ano, mostrando uma espécie com menor

quebra de produção, em comparação com outras frutíferas da região amazônica. A germinação ocorre de 10 a 16 meses, com crescimento lento na sombra ou até 1 m quando exposta ao sol. Nas plantações, a produção dos frutos inicia-se em um período de 7 a 10 anos. A caracterização biométrica dos frutos de *E. uchi* revelou que 49% do peso corresponde à polpa (epicarpo + mesocarpo); e 51% para a semente (endocarpo) (ALBUQUERQUE et al., 2014).



Figura 1: Uxi (*Endopleura uchi*). (a) uxizeiro, (b) frutos e (c) sementes.

### 3.1.2 Composição nutricional

Embora existam poucas publicações sobre a composição nutricional do uxi, é possível descrever que a polpa do fruto é altamente calórica (302,56 kcal/100 g), sendo uma excelente fonte de óleo vegetal (BERTO et al., 2015). A Tabela 1 apresenta os dados referentes à composição nutricional do fruto de *E. uchi*. Os teores de lipídios da polpa são maiores do que na semente. O teor de carboidratos da semente é superior ao encontrado na polpa, porém não há dados sobre o perfil de açúcar da semente. Os dados mostram que cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), sódio (Na) e ferro (Fe) são os minerais mais comumente encontrados na polpa da fruta, enquanto Mg, Na, P, Mn e Fe são os principais elementos da semente. A frutose é o monossacarídeo mais encontrado na polpa.

Tabela 1: Composição nutricional dos frutos de uxi (*Endopleura uchi*)

Composição nutricional (%)			Aminoácidos		
	Polpa	Semente	(mg/100g)	Polpa	Semente
Umidade	37,50-		Ácido		
	48,92	28,66	glutâmico	9,00	n.a.
Lipídeos	14,81-		Leucina	5,88	n.a.
	20,48	3,60	Valina	4,63	n.a.
Proteínas	0,88-2,38	1,55	Fenilalanina	4,63	n.a.
	25,79-		Serina	4,50	n.a.
Carboidratos	27,18	65,64			
	10,80-				
Fibras	21,44	n.a.			

Cinzas	1,04-1,13	0,55	Tirosina	3,88	n.a.
<b>Carboidratos (g/100g)</b>					
Pectina	2,88	n.a.	Alanina	3,63	n.a.
Frutose	2,00	n.a.	Treonina	3,63	n.a.
Glucose	1,43	n.a.	Prolina	3,00	n.a.
Amido	0,80	n.a.	Isoleucina	2,75	n.a.
Sucrose	0,13	n.a.	Lisina	2,50	n.a.
<b>Minerais (mg/100g)</b>					
Magnésio (Mg)			Asparagina	1,88	n.a.
	70-80,77	81,46	Glicina	1,63	n.a.
Cálcio (Ca)	96	n.a.	Glutamina	1,50	n.a.
Fósforo (P)	10,82-39	6,32	Arginina	1,25	n.a.
Sódio (Na)	9,01	9,90	Histidina	0,38	n.a.
Ferro (Fe)	1,20-2,44	2,27	Metionina	0,25	n.a.
Manganês (Mn)			Ácido $\gamma$ -aminobutírico	8,62	n.a.
	0,76-1,40	2,53	Ácido $\alpha$ -aminoadípico	Traço	n.a.
Zinco (Zn)	0,76-0,79	0,85			
Cobre (Cu)	0,52	1,75			
Selênio (Se)	0,036	n.a.			

Fonte: Marx et al. (2002), Berto et al. (2015) e Shanley e Medina (2005).  
Onde: n.a. não analisado.

### 3..2 COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA

#### 3.2.1 Ácidos graxos

Os ácidos graxos insaturados de cadeia longa, constituintes da estrutura dos triacilgliceróis, apresentam papel fisiológico na regulação da pressão arterial, função plaquetária, coagulação sanguínea, concentração plasmática, função vascular, frequência cardíaca, doenças inflamatórias (aterosclerose, osteoartrite, psoríase, lúpus, asma, fibrose, dermatite e neurodegenerativa), função imunológica, ganho de peso e insulina sensibilidade (CALDER, 2012; CALDER e YAQOOB, 2009). Os benefícios do consumo de ácidos graxos mono e poliinsaturados na aterosclerose e o tratamento da osteoartrite permitem a redução dos sintomas e do uso de drogas antiinflamatórias não esteroidais. Esses ácidos graxos têm importantes funções metabólicas na membrana celular, responsáveis pela redução da expressão de citocinas pró-inflamatórias. O consumo desses compostos bioativos em determinados níveis permite a redução da probabilidade do desenvolvimento de doenças crônico-degenerativas a exemplo de hipertensão, trombose, hipertrigliceridemia, arritmia cardíaca, obesidade, diabetes tipo II e determinados tipos de câncer (CALDER e YAQOOB, 2009; GUPTA e PRAKASH, 2014).

Como visto na seção anterior, os frutos de uxi (*E. uchi*) são boas fontes de óleos vegetais, cuja composição consiste principalmente em ácidos graxos insaturados (AGI), com destaque para o ácido oleico (18:1 n-9). O ácido linoleico (18:2 n-6) e o ácido linolênico (18:3 n-3) também estão presentes na fração lipídica. Entre os ácidos graxos saturados (AGS), o ácido palmítico (16:0) é o composto majoritário, seguido de ácido esteárico (18:0). Os ácidos graxos que compõem a maioria da espécie *E. uchi* são mostrados na Figura 2. Dados da literatura indicam que de 55,5 a 70% da fração lipídica da espécie são constituídos por (18:1 n-9), 20,7–28,5% de (16:0), 4,8–7,3% de (18:0), 0,81–4,99% de (18:2 n-6) e 2,1–3,4% de (18:3 n-3) (BERTO et

al., 2015; MARX et al., 2002). As concentrações de ácidos graxos em termos de (g/100 g de frutos) são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Compostos bioativos do uxi (*Endopleura uchi*)

<b>Compostos</b>	<b>Polpa</b>	<b>Semente</b>
<b>Ácidos graxos (g/100g)</b>		
Ácido palmítico 16:0	3,78-4	0,85
Ácido esteárico 18:0	0,93-0,97	0,19
Ácido oleico 18:1 (n-9)	7,38-13,51	1,78
Ácido linoleico 18:2 (n-6)	0,16-0,66	0,35
Ácido linolênico 18:3 (n-3)	0,4	0,03
<b>Fitoesteróis (mg/100g)</b>		
$\beta$ -Sitosterol	88*-109	n.a.
Brassicasterol	19	n.a.
Stigmasterol	12-12,22	n.a.
Campesterol	5-8	n.a.
<b>Tocoferóis (mg/100g)</b>		
$\alpha$ -tocoferol (Vitamin E)	1-16,72	n.a.
$\gamma$ -tocoferol	33,75	n.a.
<b>Carotenóides (mg/100g)</b>		
$\alpha$ -caroteno	Traço	n.a.
$\beta$ -caroteno	1,66	n.a.

Fonte: Berto et al. (2015), Da Costa et al. (2010), Marx et al. (2002), Magalhães et al. (2007). Onde: \* $\beta$ -Sitosterol+sitostanol e n.a. não analisado.

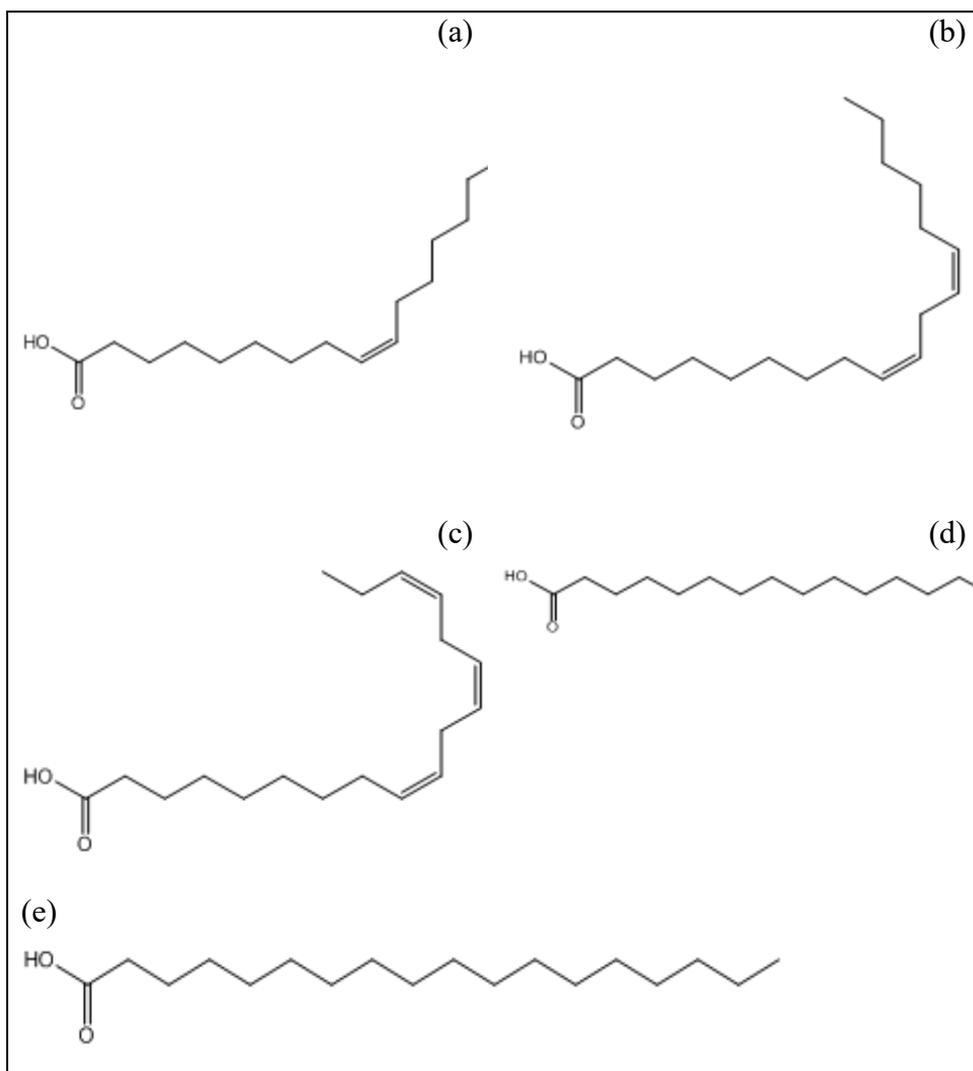


Figura 2: Ácidos graxos presentes no uxi (*Endopleura uchi*). (a) ácido oleico, (b) ácido linoleico, (c) ácido linolênico, (d) ácido palmítico, (e) ácido esteárico.

### 3.2.2 Fitoesteróis

Os fitoesteróis (Figura 3) são subprodutos da biossíntese de isoprenóides via esqualeno, através de acetil-coenzima-A, de estrutura tetracíclica ciclopenta ( $\alpha$ ) fenantreno, semelhante ao colesterol, constituída

como componentes estruturais da membrana celular, responsáveis pela regulação da fluidez e permeabilidade, bem como processos metabólicos (BOT et al., 2018; FAKIH et al., 2018; TRAUTWEIN e DEMONTY, 2007; SHAHZAD et al., 2017). Os benefícios do consumo de fitoesteróis incluem a prevenção do desenvolvimento de doenças crônicas, como cardiovasculares, hepáticas, diabetes e câncer (SHAHZAD et al., 2017). Por causa da similaridade estrutural, os fitoesteróis reduzem a absorção de colesterol por solubilização competitiva com lipoproteínas de baixa densidade (LDL), que são adsorvidas pelas células epiteliais (enterócitos) no intestino delgado (ZYCHOWSKI et al., 2017).

O perfil de fitoesteróis do uxi é mostrado na Tabela 2. Investigações científicas relatam a presença de  $\beta$ -sitosterol, seguido de estigmasterol, brassicasterol e campesterol na polpa do fruto (Figura 3). De acordo com Da Costa et al. (2010) o teor total de fitoesteróis na polpa do uxi não excede 360 mg/100g. No estudo desenvolvido por Marx et al. (2002) o conteúdo total de esteróides encontrado na polpa do uxi foi 204,08 mg/100 g, o que potencializa o fato da espécie *E. uchi* ser rica em fitoesteróis, com o teor de  $\beta$ -sitosterol igual a 736 mg/100 g de óleo, estigmasterol igual a 82,5 mg/100 g de óleo e campesterol igual a 33,75 mg/100 g de óleo. Os dados mostram que a polpa do uxi pode ser considerada como uma boa fonte de fitoesteróis, podendo ser inserida na dieta, contribuindo para atingir os índices recomendados para ingestão (1–3 g) (KEYS et al., 1957). Abreu et al. (2013) identificaram uma mistura de fitoesteróis (sitosterol e estigmasterol) em casca do caule de *E. uchi* por Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN).

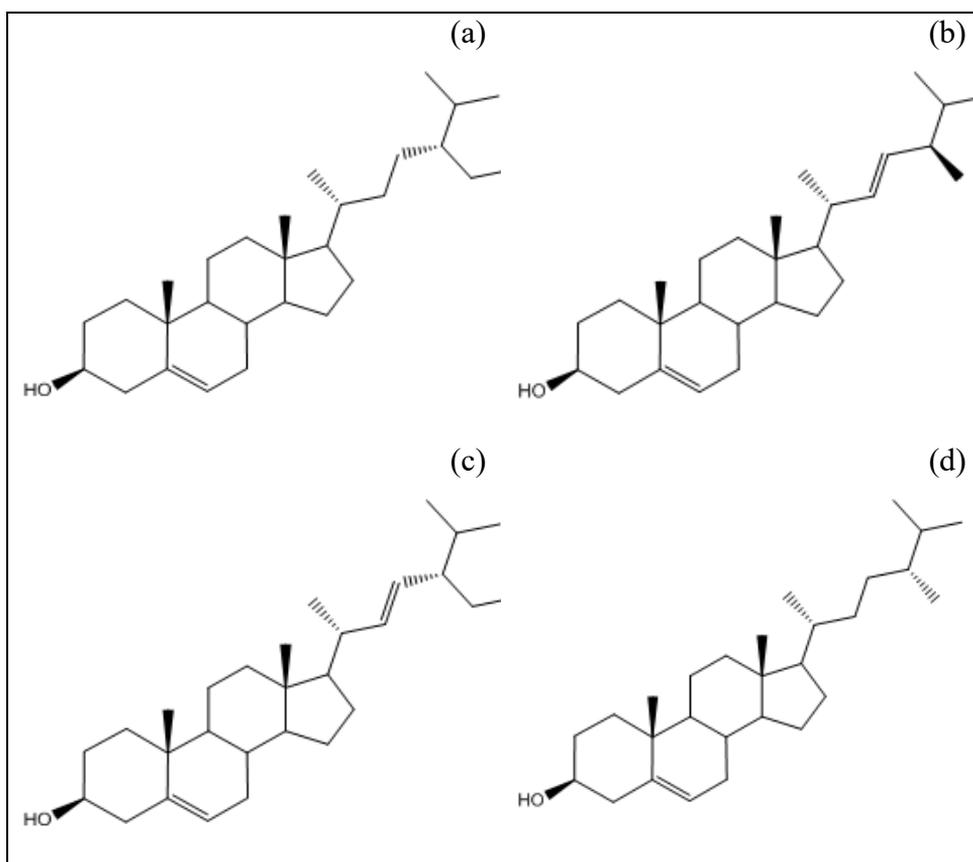


Figura 3: Fitoesteróis presentes no uxi (*Endopleura uchi*). (a)  $\beta$ -sitosterol, (b) brassicasterol, (c) estigmasterol, (d) campesterol.



### 3.2.4 Carotenóides

Os carotenóides são pigmentos naturais hidrofóbicos, sintetizados por plantas, algas e certos grupos de bactérias. Para os humanos, a única maneira de obter essas substâncias é através da dieta (EGGERSDORFER e WYSS, 2018; NGAMWONGLUMLERT e DEVAHASTIN, 2018). A síntese de carotenóides em plantas ocorre pela via do metileritritol 4-fosfato, onde moléculas de geranyl difosfato se condensam, transformando-se em um intermediário 15-cis-fitoeno, na presença da enzima fitoeno sintase. Eles são classificados em dois grupos: aqueles que contêm oxigênio como grupo funcional, chamados xantofilas (zeaxantina e luteína) e aqueles apenas com cadeias de hidrocarbonetos conhecidas como carotenos ( $\beta$ -caroteno e licopeno) (KHALID, BILAL e IQBAL, 2019). Estudos mostram que os carotenóides têm propriedades anticancerígenas e atividades cardioprotetoras. No entanto, sua principal função está relacionada à atividade da vitamina A, contribuindo para prevenção de catarata (MARIUTTI e MERCADANTE, 2018).

Magalhães et al. (2007) determinaram a presença de carotenóides com atividades pró-vitamina A ( $\beta$ -caroteno e  $\alpha$ -caroteno) em frutos de uxi. As concentrações médias de  $\beta$ -caroteno (Figura 5) e  $\alpha$ -caroteno são mostradas na Tabela 2. São relatados isômeros de  $\beta$ -caroteno, com predominância de trans- $\beta$ -caroteno (89,3%), seguido por 13-cis- $\beta$ -caroteno e 9-cis- $\beta$ -caroteno, com médias (8% e 3%), respectivamente. De acordo com taxa de conversão estabelecida pelo National Research Council (NCR, 1989), 12  $\mu$ g de  $\beta$ -caroteno correspondem a 1 Equivalente-retinol (ER), o que demonstra que 100 g de polpa de *E. uchi* podem contribuir com 14% da ingestão diária necessidade de vitamina A (100  $\mu$ g/g/ER) para um homem adulto.

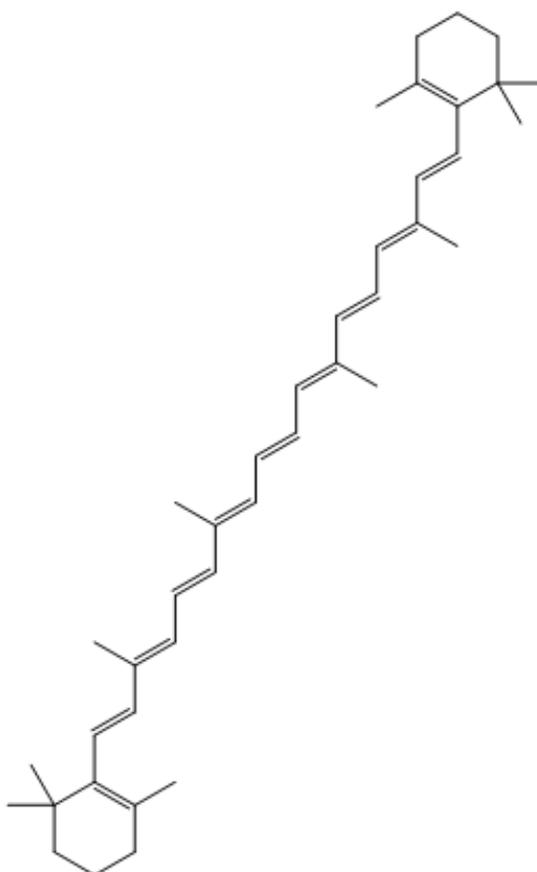


Figura 5:  $\beta$ -caroteno.

### 3.2.5 Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos são os metabólitos secundários mais abundantes em plantas. Estas estruturas compreendem um anel aromático com um ou mais substituintes hidroxila, e podem ser divididos em várias classes (flavonóides, ácidos fenólicos, taninos, estilbenos e lignanas). A bergenina (Figura 6), um C-glicosídeo do ácido 4-O-metilgálico, é uma isocumarina e tanino hidrolisável, encontrado comercialmente como um sólido cristalino de fórmula molecular  $C_{14}H_{16}O_9$  e massa molar igual a 328,27 g/mol (CONG-CONG et al., 2017). Esta molécula tem baixa

solubilidade em água, com fácil degradação em solução alcalina, tendo sua estabilidade dependente das condições de armazenamento (GUAN et al., 2014; BAJRACHARYA, 2015). As propriedades terapêuticas são atribuídas a bergenina, como antioxidante, antimicrobiano, antihepatotóxico, antiulcerogênico, anti-HIV, antiarrítmico, neuroprotetoras, anti-inflamatórias e imunomoduladoras (PATEL et al., 2012; NAZIR et al., 2011).

Neves et al. (2015) analisaram amostras de frutas de *E. uchi* armazenadas a 15°C e 95% de umidade relativa (UR) durante 12 dias. Os resultados desta pesquisa mostraram que o teor de fenólicos totais aumentou ao longo do tempo, com 138,3 mg EAG/100 g (b.s.) valores no dia 0, 150,2 mg EAG/100 g (b.s.); no dia 3, 178,4 mg EAG/100 g (b.s.) no dia 9 e 213,2 mg EAG/100 g (b.s.) no dia 12. Magalhães et al.(2007) identificaram a presença de bergenina na polpa do fruto de *E. uchi* por Espectroscopia de Infravermelho (IR) e (RMN). De Abreu et al. (2008) identificaram bergenina na casca do caule de *E. uchi* por IR, cromatografia gasosa (GC) e RMN. Da Silva et al.(2009) identificaram a presença de bergenina na casca do caule de *E. uchi* por RMN.

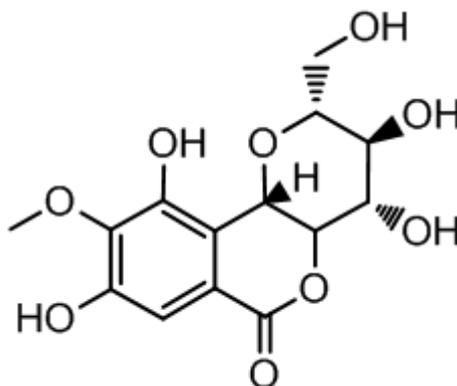


Figura 6: Bergenina.

### 3.2.6 Aromas e compostos voláteis

Os aromas e compostos voláteis são itens indispensáveis para avaliações sensoriais de alimentos, sendo decisivos na aceitação do consumidor. (SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ et al., 2019). O perfil de aromas e compostos voláteis da polpa de *E. uchi* foi determinado por Marx et al. (2002) com a identificação e quantificação de pelo menos 42 substâncias. 3,3-Dimetil-2-butanol e Eugenol foram os compostos majoritários, respectivamente (18,8 e 14,0%). Os ésteres metílicos de derivados de ácidos graxos também foram identificados. As porcentagens de cis-3-hexen-1-ol e etil-9-octadecenoato foram de 5,8% para cada composto. Outros compostos encontrados foram etilhexadecanoato (4,9%), 1-hexanol (4,5%), hexanal (4,3%),  $\alpha$ -ilangene (3,9%), 2-pentanol (2,9%), trans-2-hexenal (2,7%), metil-6-octadecenoato (2,6%), metilpalmitato (2,3%) e 4-metil-2-pentanol (2,2%), isopropil 2-metil-propanoato (1,4%), etil-octadecanoato (1,2%),  $\alpha$ -copaeno (1,0%), metil-estearato (0,9%), 2,3-dimetil-3-hexanol (0,7%), felandral (0,6%), nonanal, naftaleno e hexadecano (0,4% cada), cis-ocimeno, geraniol, 2,4-decadienal,  $\alpha$ -gurjuneno, iso-cariofileno, (E,E)-farnesol, ácido palmítico, etil-9,12-octadecadienoato (0,3% cada), fenilacetaldeído, trans-2-decenal, 1,2,3-trimetoxibenzeno, trans-2-undecenal,  $\beta$ -cariofileno,  $\beta$ -sesquifelandreno,  $\delta$ -cadineno, heptadecano e etiltetradecanoato (0,2% cada), 2-metil-tetra-hidrofurano e octadecano (0,1% cada).

### 3.3 PRODUTOS E APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

Devido às suas características nutricionais, químicas e biológicas, o uxi (*Endopleura uchi*) possui potencial para o desenvolvimento de novos produtos que podem ser aplicados nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. É possível destacar polpas, sucos naturais, sorvetes, doces e licores como produtos alimentícios derivados do uxi. Nos meses correspondentes à entressafra, as indústrias estocam polpa de uxi congelada para suprir a demanda da produção de sorvete, considerado como um dos sabores preferidos por suas características sensoriais. O sorvete de uxi é o produto mais industrializado e comercializado em unidades de 60 g, cuja informação nutricional indica valor energético igual a 120 Kcal/porção. Com esse cenário, os alimentos derivados dos frutos de *E. uchi* têm potencial de comercialização, com possibilidade de verticalização dos processos de forma sustentável (SHANLEY e GAIA, 2004). Ainda na área alimentícia, considerando a composição química da fração lipídica dos frutos, a espécie *E. uchi* apresenta potencial para síntese de alimentos funcionais, com a aplicação de mecanismos de extração para a produção de óleo, com características de consumo semelhante ao azeite de oliva, ou para fins de fritura/cozimento similares aos óleos de canola, girassol, milho e soja.

Os extratos obtidos dos frutos e da casca do uxi, também apresentam potencial para o desenvolvimento de produtos farmacêuticos, tais como: fitoterápicos e alopatícos. A produção de fármacos pode ser realizada com o uso da bergenina, composto amplamente relatado na espécie *E. uchi*. Essa substância tem sido descrita na área devido ao seu potencial como antibacteriano, antiviral, antifúngico, antiparasitário, inseticida, antiinflamatório, cicatrizante, anticancerígeno, antidiabético, neuroprotetor, entre outros (BAJRACHARYA, 2015; BARAI et al., 2019). Na indústria

cosmética, devido à atividade biológica que seus compostos apresentam o *E. uchi* pode ser aplicado na produção de sabonetes, hidratantes e protetores solares (SHANLEY e MEDINA, 2005; MONGE-FUENTES et al., 2017; VERMAAK et al., 2011).

## 3.4 EXTRAÇÃO COM FLUIDO SUPERCRÍTICO

### 3.4.1 Tecnologia Supercrítica

Um componente puro é considerado como supercrítico quando suas variáveis de processo apresentam valores iguais ou superiores aos encontrados no seu ponto crítico (temperatura e pressão críticas), respectivamente de seu diagrama de fases (Figura 7). Nessas regiões, alterações das propriedades termodinâmicas do fluido podem provocar intensas reações sobre reagentes e solutos. Um fluido supercrítico possui características particulares, com propriedades que se assemelham a um líquido e um gás simultaneamente. O aumento da pressão contribui para o aumento da densidade do fluido supercrítico, alcançando níveis de um líquido, enquanto que o aumento da temperatura contribui para redução da viscosidade, equivalendo-se a um gás, o que favorece mecanismos de transferência de massa. O poder de solubilidade de um fluido supercrítico pode ser alterado em função de suas propriedades termodinâmicas, de acordo com o composto bioativo de interesse a ser solubilizado, sem a necessidade de múltiplos solventes orgânicos (BRUNNER, 1987; BRUNNER, 2005). A Tabela 3 mostra alguns componentes puros e suas propriedades críticas.

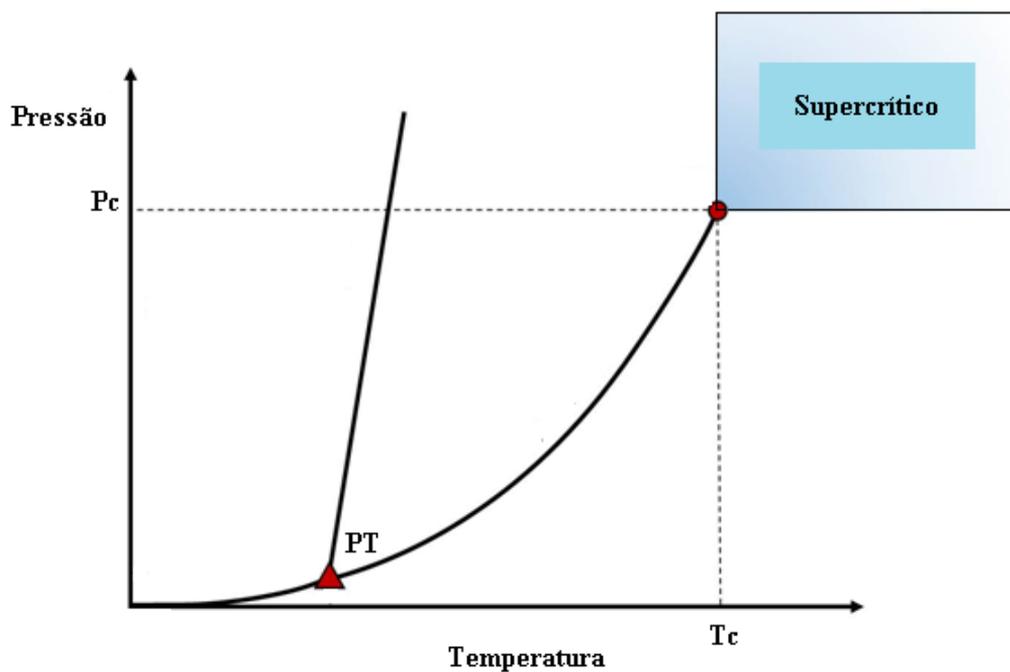


Figura 7: Diagrama de fases para um componente puro.  
Onde:  $P_c$  é pressão crítica,  $T_c$  é temperatura crítica e PT é Ponto Triplo.

Tabela 3: Propriedades críticas de componentes puros

<b>Fluido</b>	<b>T<sub>c</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>c</sub> (bar)</b>	<b>ρ (kg/m<sup>3</sup>)</b>
CO <sub>2</sub>	31,0	72,0	470
N <sub>2</sub> O	36,5	70,6	450
Etano	32,3	47,6	200
Propano	96,7	42,4	220
<i>n</i> -pentano	196,6	32,9	230
Amônia	132,5	109,8	230
Trifluorometano	26,0	46,9	520
SF <sub>6</sub>	45,5	38,0	-
Água	374,2	214,8	320

Fonte: Adaptada de Turner, King e Mathiasson (2001). Onde: T<sub>c</sub> temperatura crítica, P<sub>c</sub> pressão crítica e ρ densidade.

### 3.4.2 Extração com CO<sub>2</sub> Supercrítico

Nota-se que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresenta propriedades críticas interessantes para sua escolha como solvente, uma vez que sua temperatura crítica é relativamente baixa em comparação a outros componentes puros. Embora a pressão crítica do CO<sub>2</sub> seja maior em relação a propano e etano é interessante destacar que o CO<sub>2</sub> é um componente não-tóxico, não-inflamável, não-corrosivo e, portanto, seguro para uso em processos de extração que demandam alta pressão. Outros fatores que contribuem para a escolha do CO<sub>2</sub> como solvente é a característica apolar desta substância, que permite a extração de compostos lipídicos, sem a necessidade de solvente auxiliar (co-solvente) e que durante a etapa de despressurização, a evaporação do CO<sub>2</sub> ocorre sem a necessidade de aplicação de aquecimento,

considerando que esse componente é gasoso em condições ambientes. (TURNER, KING e MATHIASSEN, 2001; DE MELO, SILVESTRE e SILVA, 2014). As etapas do processo de obtenção de extratos com aplicação da tecnologia supercrítica são mostradas na figura 8.

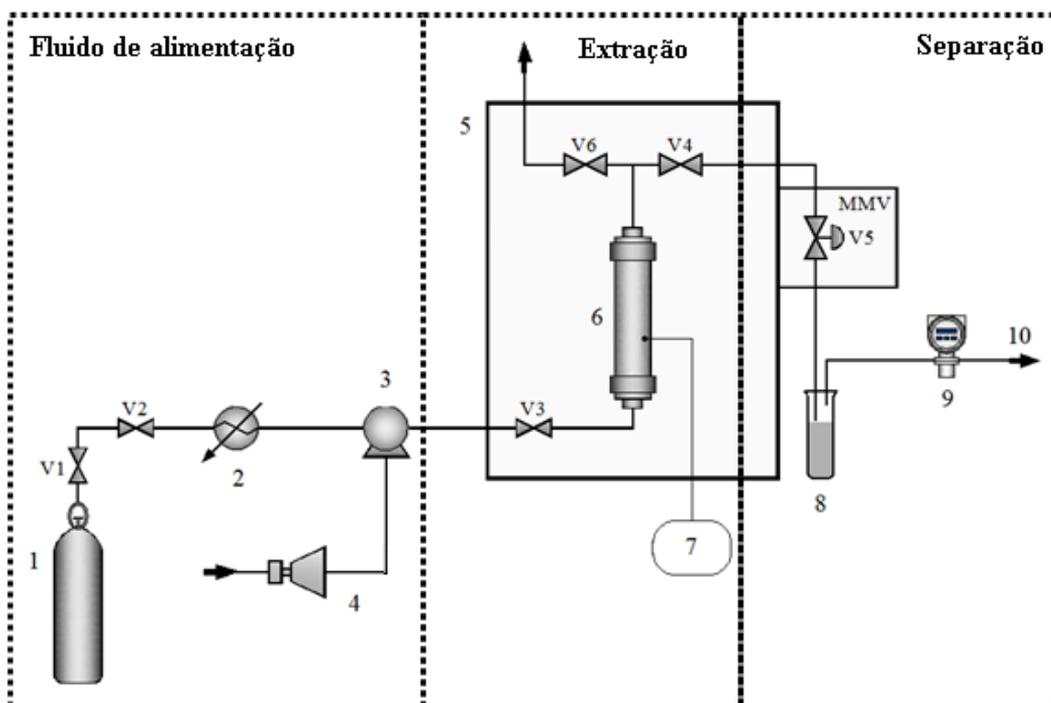


Figura 8: Representação do processo de obtenção de extratos via tecnologia supercrítica.

Onde: (1) cilindro contendo  $\text{CO}_2$ , (2) sistema com fluido refrigerante, (3) bomba, (4) compressor, (5) forno, (6) vaso de extração, (7) coletor de extrato, (8) medidor de vazão, (9) saída de  $\text{CO}_2$ ,  $V_1$ - $V_6$  válvulas de controle de fluxo e MMV Válvula Micrométrica (sistema de aquecimento).

#### 3.4.2.1 Pressão e Temperatura

A extração com fluido supercrítico é considerada como uma tecnologia de alta pressão e este parâmetro é fundamental na análise de processos, principalmente relacionados a aspectos técnicos e econômicos. Variações de pressão afetam significativamente a densidade e por consequência o poder de solubilidade do solvente. A pressão é a variável preferencial para ajustes, pois oferece margens de processo maiores em comparação a temperatura. Enquanto a temperatura se restringe a uma janela de até três vezes os valores usuais, a pressão pode ser ajustada em até dez vezes os valores mínimos investigados para extração de compostos bioativos. O aumento da temperatura de um fluido supercrítico contribui para a redução de sua densidade, e por consequência poder de solubilidade, entretanto contribuem para o aumento da pressão de vapor dos solutos, durante a extração. Esse fenômeno pode ser observado em isotermas que apresentam pontos de inflexão ou pontos de cruzamentos. Esse caso dependerá sempre da interação do fluido supercrítico e a natureza dos solutos contidos nas matérias-primas (DE MELO, SILVESTRE e SILVA, 2014).

#### 3.4.2.2 Densidade e Solubilidade

A densidade é uma propriedade intensiva, cujo valor representa a quantidade de massa ocupada em um volume de determinado composto, correspondendo aos caminhos livres médios dos átomos ou moléculas. O poder de solubilidade de um fluido supercrítico é diretamente relacionado com a densidade, que por sua vez é controlada por alterações nos níveis de temperatura e, em principalmente, da pressão. Através do controle da densidade, é possível simular propriedades dos solventes orgânicos (BOTELHO, 2014; GOODSHIP et al., 2004). A interdependência entre as variáveis, temperatura, pressão e densidade, sugerem a utilização de

equações de estado para a determinação dos valores de densidade do solvente e/ou da mistura soluto/solvente (BRUNNER, 1994). Pinto (2016) relata que a equação de Peng – Robinson (1976) é aplicada por apresentar bons resultados para o cálculo de densidade do fluido no estado supercrítico.

O processo de extração supercrítica é graficamente representado por curvas globais de extração (Overall Extraction Curve) ou (OEC), que consistem na função entre a massa de extrato acumulada e massa de solvente utilizada ou tempo de extração. Uma das informações obtidas através da curva é o tempo necessário para uma batelada (ciclo de extração). Uma OEC (Figura 9) mostra o comportamento característico de extração com fluido supercrítico, onde são fornecidas informações sobre o comportamento cinético do processo, possibilitando a determinação do tempo de ciclo mais viável. Observa-se que se desenvolve um período de taxa de extração constante nas primeiras horas, que representa a extração de substratos que são de fácil acesso ao solvente. Em seguida, observa-se que a taxa de extração diminui progressivamente com o tempo, que representa a extração de substratos que são de difícil acesso ao solvente (BRUNNER, 1994).

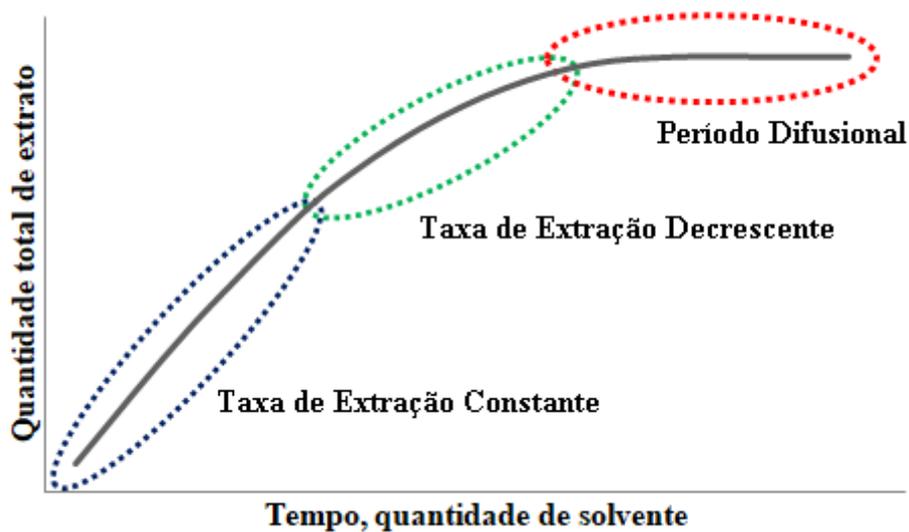


Figura 9: Curva típica de processo de extração com fluido supercrítico apresentado os três períodos característicos: Taxa de extração constante, taxa de extração decrescente e período difusional.

## 4.MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AQUISIÇÃO E PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

Os frutos de uxi foram coletados no município de Bujaru/PA, Brasil (-01°64 09 S, -48°02 73 W), em março de 2018. Após 48 h de amadurecimento, o material foi transportado para o Laboratório de Extração da Universidade Federal do Pará, onde foi realizado o despulpamento manual. A polpa foi congelada em ultrafreezer a -80°C por 24 h. A desidratação foi realizada em liofilizador (Alpha, 2–4 LD Plus, Alemanha) por 72 h. A polpa desidratada foi triturada em processador (Croydon, LR03, Brasil) e armazenada em embalagem de polietileno, mantida a vácuo, à temperatura de 5 °C, por cinco meses, até análises e extração do óleo.

### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A densidade real foi determinada utilizando picnômetro automático com gás Hélio (He) (Quantachrome Ultrapyc 1200e). A densidade aparente foi determinada pela razão matemática entre a massa e o volume da polpa, conforme a equação 1. A porosidade do leito foi determinada pela equação 2. O diâmetro médio das partículas foi determinado a partir de análise granulométrica usando peneiras Tyler 14–32, conforme metodologia ASAE (1998). A matéria-prima é representada na figura 10.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (1)$$

Onde:  $\rho_a$  é densidade aparente da amostra,  $m_a$  massa da amostra e  $V_a$  volume da amostra.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (2)$$

Onde:  $\varepsilon$  é porosidade do leito e  $\rho_r$  é densidade real da amostra.



Figura 10: Polpa de uxi (*Endopleura uchi*) liofilizada.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA

A caracterização físico-química da polpa de uxi desidratada foi determinada pela análise de umidade, cinzas, lipídios, proteínas e carboidratos, segundo métodos descritos pelo Instituto Adolpho Lutz (IAL, 2008). O teor de umidade foi determinado por secagem da amostra em estufa a 105°C, até peso constante. A porcentagem de cinzas foi determinada pela incineração das amostras em mufla aquecida a 550°C. O teor de lipídios foi determinado pelo método de Soxhlet, utilizando-se éter de petróleo como solvente. O teor de proteína foi quantificado pelo método de Kjeldhal, usando o fator 6,25 para conversão de nitrogênio. Os carboidratos totais foram calculados a partir da diferença entre 100 e a soma de umidade, cinzas, lipídios e proteínas.

#### 4.4 EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE UXI COM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO

Os experimentos foram realizados na unidade de extração Spe-ed™ SFE (Modelo 7071, Applied Separations, EUA) equipada com célula de 100 mL (0,0317 m de diâmetro interno e 0,1244 m de altura) e cilindro contendo CO<sub>2</sub> (99 % de pureza, White Martins, Brasil). As isotermas de rendimento global foram determinadas através de testes com 20 g de polpa de uxi (5,05 cm de altura do leito no interior da célula). As extrações ocorreram em temperaturas de 40 e 60°C e pressões de 200, 300 e 400 bar. O período de extração foi dividido em duas etapas: período estático de 1800s e período dinâmico de 10.800s. A vazão mássica de CO<sub>2</sub> foi de  $8,85 \times 10^{-5} \pm 2,95 \times 10^{-6}$  kg/s. A densidade de CO<sub>2</sub> supercrítico foi determinada utilizando a plataforma do National Institute of Standards and Technology (NIST), com aplicação da equação de estado desenvolvida por Span e Wagner (1996). O

rendimento global de óleo em base seca (b.s.) foi determinado usando a equação 3. Cada condição foi realizada em duplicata. O processo de extração é representado na figura 11. A disposição da polpa de uxi no interior da célula de extração é representada na figura 12.

$$R_{o(\% \text{ b.s.})} = \left( \frac{m_o}{m_a \left( 1 - \frac{U_a}{100} \right)} \right) 100 \quad (3)$$

Onde:  $R_{o(\% \text{ b.s.})}$  é o rendimento global de óleo em base seca,  $m_o$  é a massa de óleo,  $m_a$  é massa de matéria-prima e  $U_a$  a umidade da matéria-prima.

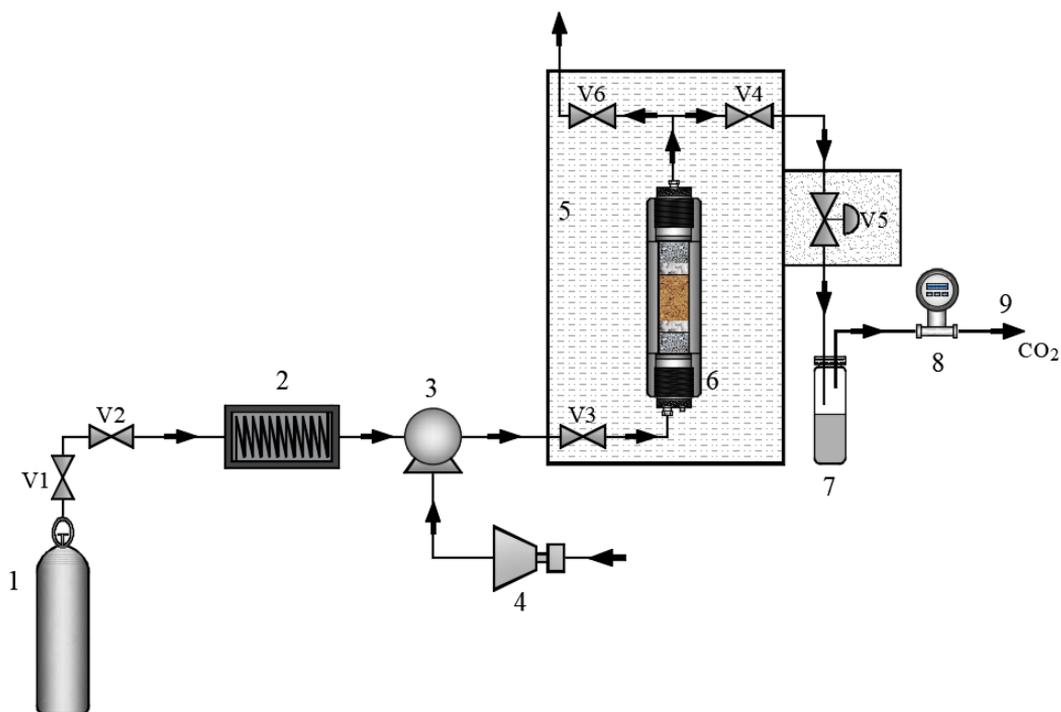


Figura 11: Processo de extração do óleo de uxi com CO<sub>2</sub> supercrítico.

Onde: (1) cilindro com CO<sub>2</sub>, (2) sistema de refrigeração, (3) bomba, (4) compressor, (5) forno, (6) célula de extração, (7) coletor de óleo, (8) medidor de vazão, (9) saída de CO<sub>2</sub>. V1-V6 válvulas de controle de fluxo.



Figura 12: Disposição da polpa de uxi no interior da célula de extração.

#### 4.5 CÁLCULO DA SOLUBILIDADE DO ÓLEO DE UXI EM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO

A solubilidade do óleo de uxi em dióxido de carbono supercrítico foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Cunha et al. (2019). A solubilidade do óleo de uxi em CO<sub>2</sub> em um sistema pressurizado foi calculada usando a equação de estado cúbica de Peng-Robinson (1976) (equação 4) combinada com a regra de mistura quadrática de Van der Waals. Para as misturas, os parâmetros  $a$  e  $b$  foram obtidos através das propriedades físicas das substâncias puras e do uso de uma regra de mistura, sendo as interações entre os componentes da mistura representadas pelos parâmetros de interação binária. Neste trabalho foi utilizada a regra de mistura de Van der Waals com dois parâmetros de interação binária, representados pelas equações 5-8. Os símbolos são os parâmetros da interação binária. Para

estimar os parâmetros de interação binária, foi utilizado o software computacional EDFLASH como na pesquisa realizada por Araújo e Meireles (2000). Este software utilizou o procedimento flash PT e o método matemático Simplex modificado por Nelder e Mead (1965) para minimizar a função objetivo (FO) (equação 9). Os símbolos  $x_i^e$ ,  $x_i^c$ ,  $y_i^e$ ,  $y_i^c$  representam a fração de líquido experimental no sistema, fração de líquido calculado, fração de gás experimental no sistema e fração de gás calculado, respectivamente.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (4)$$

$$a_m = \sum \sum x_i x_j a_{ij} \quad (5)$$

$$b_m = \sum \sum x_i x_j b_{ij} \quad (6)$$

$$a_{ij} = (a_{ii} a_{jj}) \frac{1}{2} (1 - K_{ij}) \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{(b_{ii} + b_{jj})}{2} (1 - \lambda_{ij}) \quad (8)$$

$$FO = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i^e - x_i^c}{x_i^e} \right)^2 + \left( \frac{y_i^e - y_i^c}{y_i^e} \right)^2} \quad (9)$$

A solubilidade requer informações específicas sobre cada constituinte do óleo, como temperatura crítica ( $T_c$ ), pressão crítica ( $P_c$ ) e fator acêntrico ( $\omega$ ). Para o cálculo das propriedades críticas ( $T_c$ ,  $P_c$ ), foi utilizado o método de Ashour e Wennensten (1989) e Constantinou e Gani (1994), enquanto o cálculo do fator acêntrico foi feito pelo método de Wagner (1973) e Tu (1994). A função objetivo correlaciona a diferença entre o valor teórico e o valor experimental. Dados experimentais de balanço de ácidos graxos foram

obtidos da literatura (MAHESHWARI et al., 1992; ZOU et al., 1990 e YAU et al., 1992). A solubilidade (S) foi calculada de acordo com a equação 10, e os resultados foram expressos em mg de óleo/g CO<sub>2</sub>.

$$S = \frac{\sum M_i z_i}{M_{CO_2} z_{CO_2}} 1000 \quad (10)$$

Onde:  $z_i$  é a fração molar do componente i na fase gasosa e  $M$  é a massa molar de cada componente.

#### 4.6 CROMATOGRAFIA GASOSA E ESPECTROMETRIA DE MASSA (CG/EM)

A composição de ácidos graxos do óleo de uxi foi determinada usando ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG) de acordo com a metodologia sugerida por Khan e Scheinmann (1978) com modificações. Os EMAG foram identificados por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (CG-EM), utilizando o equipamento QP-2010-Plus (Shi-madzu) por meio de coluna capilar de sílica (RTX-5 MS, 30 m × 0,25mm × 0,25 m) com o auxílio do software MS Solution e dados da literatura (MONDELLO, 2011; NIST, 2011; ADAMS, 2007). As condições de análise foram: temperatura do forno programada a 100°C (5 min.) com gradiente de 4°C/min até 260°C (20 min); hélio (1,2 mL/min) como gás transportador; injeção sem divisão de 1 µL de amostra; ionização por impacto de elétrons a 70eV. Os compostos foram identificados comparando seus índices de retenção e espectros de massa com os ácidos graxos padrões disponíveis na literatura.

#### 4.7 QUALIDADE FUNCIONAL DO ÓLEO DE UXI

A qualidade funcional do óleo de uxi foi determinada com base nas proporções de ácidos graxos, de acordo com os respectivos perfis lipídicos, avaliados em três índices de composição: Índice de Aterogenicidade (IA), representado na equação 11; Índice de Trombogenicidade (IT), Eq. 12, seguindo a metodologia proposta por Ulbricht e Southgate (1991); e relação de Hipocolesterolêmico/Hipercolesterolêmico (H/H), equação 13, sugerido por Santos-Silva et al. (2002).

$$IA = \frac{(12:0)+4(14:0)+(16:0)}{(\sum AGMI)+(\sum n-6)+(\sum n-3)} \quad (11)$$

$$IT = \frac{(14:0)+(16:0)+(18:0)}{0,5(\sum AGMI)+0,5(\sum n-6)+3(\sum n-3)+\left(\frac{\sum n-3}{\sum n-6}\right)} \quad (12)$$

$$H/H = \frac{(18:1n-9)+(18:2n-6)+(20:4n-6)+(18:3n-3)+(20:5n-3)+(22:5n-3)+(22:6n-3)}{(14:0)+(16:0)} \quad (13)$$

Onde: 12:0 ácido láurico, 14:0 ácido mirístico, 16:0 ácido palmítico, 18:0 ácido esteárico, 18:1 ácido oleico, 18:2 ácido linoleico, 18:3 ácido linolênico 18:3, 20:5 ácido eicosapentaenóico, 22:5 ácido docosapentaenóico e 22:6 ácido docosahexaenóico. AGMI Ácidos Graxos Monoinsaturados.

## 4.8 CÁLCULO DA COMPOSIÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS DO ÓLEO DE UXI

A identificação dos possíveis triglicerídeos foi realizada por meio da metodologia desenvolvida por Norris e Mattil (1947). Esta teoria aborda a distribuição aleatória dos ácidos graxos que compõem as moléculas de triglicerídeos (TAG), e neste aspecto, é possível verificar que as moléculas de  $N^3$  TAG são possíveis, considerando a identificação de  $N$  ácidos graxos presentes no óleo de uxi e a presença de isômeros das moléculas de triglicerídeos. Nesse contexto, uma alternativa para essa determinação foi desenvolver uma planilha Excel, aplicando conhecimentos de análise combinatória para determinar todas as combinações possíveis entre os ácidos graxos que constituem uma molécula de triglicerídeo. Essa metodologia resulta em um grande número de TAG, e os resultados foram descritos por grupos de TAG (X:Y), onde X é o número de carbonos, descontando três átomos de carbono do glicerol, e Y é o número de duplas ligações. Grupos com menos de 1% da concentração total foram ignorados. A análise combinatória foi aplicada e desenvolvida na linguagem de programação Visual Basic for Application (VBA).

## 4.9 ESTUDO TERMOANALÍTICO

### 4.9.1 Termogravimetria (TG-DTG)

A análise do TG-DTG foi realizada em termobalança Shimadzu (DTG-60 H) de acordo com os seguintes parâmetros: fluxo de gás em 50 mL/min, taxa de rampa de aquecimento de 10°C/minuto e faixa de temperatura de 30–600°C. Foram utilizados cadinhos de alumínio e massa de amostra de  $7 \pm 0,5$  mg. Esta análise foi realizada para a melhor condição de rendimento de massa global de óleo de uxi.

#### 4.9.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de DSC foi realizada no equipamento Shimadzu DSC-60A (oxidação induzida) de acordo com os seguintes parâmetros: fluxo de nitrogênio de 50 mL/min, taxa de rampa de aquecimento de 10°C e temperatura de 20 a 600°C. Foram utilizados cadinhos de alumínio e massa de amostra de  $5 \pm 0,5$  mg. A análise DSC foi realizada para a melhor condição de rendimento de massa global de óleo de uxi.

#### 4.10 DETERMINAÇÃO DE CAROTENÓIDES TOTAIS

A concentração de carotenóides totais no óleo de uxi extraído com CO<sub>2</sub> supercrítico foi determinada a partir da metodologia sugerida por Rodriguez-Amaya (1999). A leitura foi realizada em espectrofotômetro UV-VIS, utilizando éter de petróleo como referência, em comprimento de onda de 450 nm. A concentração de carotenóides totais no óleo de uxi foi expressa em micrograma de carotenóide por grama de óleo ( $\mu\text{g/g}$ ) a partir da equação 14:

$$\text{Carotenóides totais} = \frac{AV(10^4)}{E_{1cm}^{1\%}m} \quad (14)$$

Onde: A absorbância do extrato em 450 nm, V volume do balão volumétrico (mL), m massa de óleo (g) e  $E_{1cm}^{1\%}$  coeficiente de extinção para  $\beta$ -caroteno (2592).

#### 4.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os ensaios experimentais de extração de óleo foram realizados em duplicata. Para verificar a existência de diferença significativa entre as condições, as médias dos resultados foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%, utilizando o software STATISTIC®7.1 (Statsof, Inc., Tulsa, EUA).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

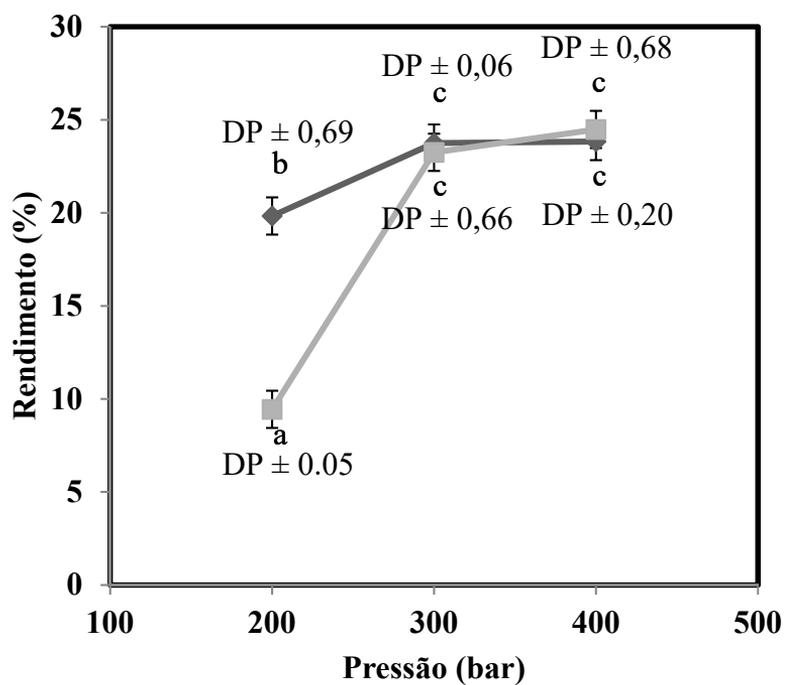
### 5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA POLPA DE UXI LIOFILIZADA

A densidade real da polpa de uxi foi de  $1200 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ , enquanto a densidade aparente foi igual a  $504,48 \pm 9,36 \text{ kg/m}^3$ . A porosidade do leito foi de  $0,58 \pm 0,01$ . O diâmetro médio das partículas de polpa foi de  $0,82 \pm 0,02 \text{ mm}$ . A composição centesimal da polpa desidratada apresentou umidade igual a  $6,96 \pm 0,02 \%$ ; teor de cinzas de  $1,49 \pm 0,01\%$ ; teor de lipídios igual a  $25,61 \pm 0,02\%$ ; teor de proteínas de  $3,87 \pm 0,05\%$  e carboidratos totais de  $62,07\%$ .

### 5.2 RENDIMENTO GLOBAL DO ÓLEO DE UXI

O desempenho de extração e os rendimentos globais do óleo de uxi são mostrados na Figura 13. O rendimento equivalente a  $24,48 \pm 0,20\%$  (b.s.) foi obtido na condição de  $60^\circ\text{C}$  e 400 bar, enquanto que o rendimento igual a  $9,44 \pm 0,05\%$  (b.s.), foi observado na condição de  $60^\circ\text{C}$  e 200 bar. Os resultados obtidos no sistema  $\text{CO}_2$  + óleo de uxi mostraram uma relação direta entre rendimento, pressão e densidade do  $\text{CO}_2$ . A  $60^\circ\text{C}/400 \text{ bar}$  a densidade de  $\text{CO}_2$  apresentou um valor de  $890,14 \text{ kg/m}^3$ , causando maior poder de solubilidade do  $\text{CO}_2$ , contribuindo para maior eficiência do processo de extração, contrariando a condição de  $60^\circ\text{C}/200 \text{ bar}$ , com densidade de  $\text{CO}_2$  igual a  $723,68 \text{ kg/m}^3$ . Esse comportamento foi observado nas pesquisas realizadas por Pinto et al. (2018) e Batista et al. (2016). Altos rendimentos também foram observados a  $40^\circ\text{C}/300 \text{ bar}$  ( $23,75 \pm 0,06\%$ ),  $40^\circ\text{C}/400 \text{ bar}$  ( $23,83 \pm 0,68\%$ ) e  $60^\circ\text{C}/300 \text{ bar}$  ( $23,25 \pm 0,66\%$ ) em base seca. Esses resultados são estatisticamente iguais aos encontrados a  $60^\circ\text{C}/400 \text{ bar}$ . Considerando esses resultados, a melhor condição observada

neste estudo foi de 40 °C/300 bar, pois permite a extração do óleo com menor consumo de energia e menor trabalho realizado pela bomba.



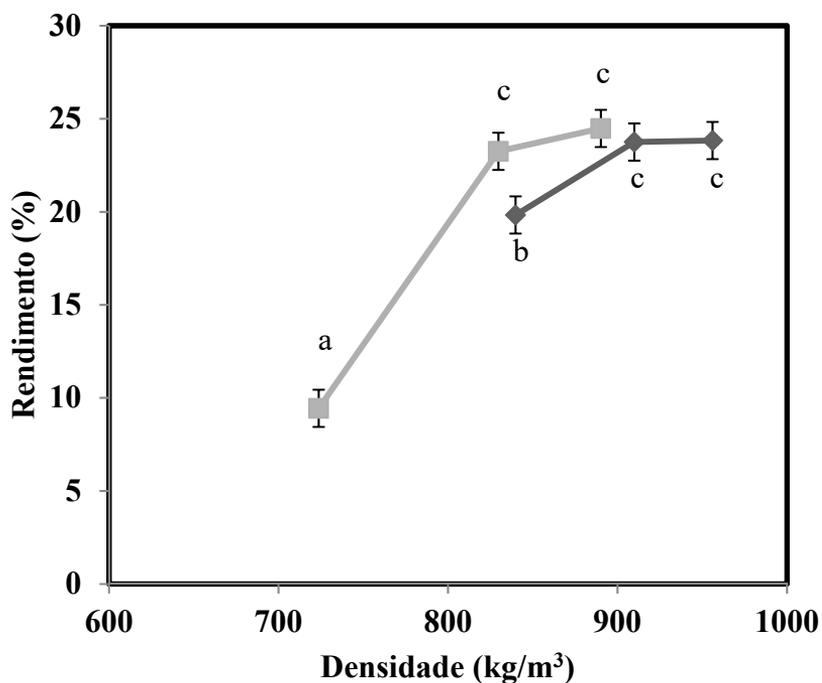


Figura 13: Isotermas de rendimento global de óleo de uxi (*Endopleura uchi*) extraído com CO<sub>2</sub> supercrítico. 13.1. Rendimento *versus* pressão e 13.2. Rendimento *versus* densidade. Losangos representam isoterma de 40°C e quadrados, isoterma de 60°C. DP Desvio Padrão.

### 5.3 SOLUBILIDADE DO ÓLEO DE UXI EM CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO CALCULADA

Os valores de solubilidade calculados estão de acordo com os rendimentos de extração obtidos experimentalmente, pois se verifica que a solubilidade entre o óleo de uxi e o solvente supercrítico foi maior na temperatura de 60°C e pressão de 400 bar. No entanto, as condições operacionais de extração de 40°C/300 bar, 40°C/400 bar e 60°C/300bar também apresentaram altos valores de solubilidade. Os parâmetros de interação binária são mostrados na Tabela 4. A Tabela 5 mostra os valores calculados para as propriedades físicas, bem como indica os métodos utilizados para os cálculos. A Figura 14 mostra a solubilidade calculada e expressa em mg de óleo/g CO<sub>2</sub>. Nesse aspecto, pode-se observar que ambas as isotermas apresentaram efeito dominante sobre a densidade do solvente durante o processo de extração/separação do óleo, pois verificou-se um aumento da solubilidade à medida que a pressão aumentou.

Tabela 4: Parâmetros de interação binária

Ácidos graxos	Parâmetros	
	$K_{ij}$	$\lambda_{ij}$
16:0	-0,017277716	-0,02322057
18:0	0,084396659	-0,00171055
18:1	0,090523308	-0,00181091

Os parâmetros foram obtidos de acordo com Peng-Robinson (1976). Onde: 16:0 ácido palmítico, 18:0 ácido esteárico e 18:1 ácido oleico.

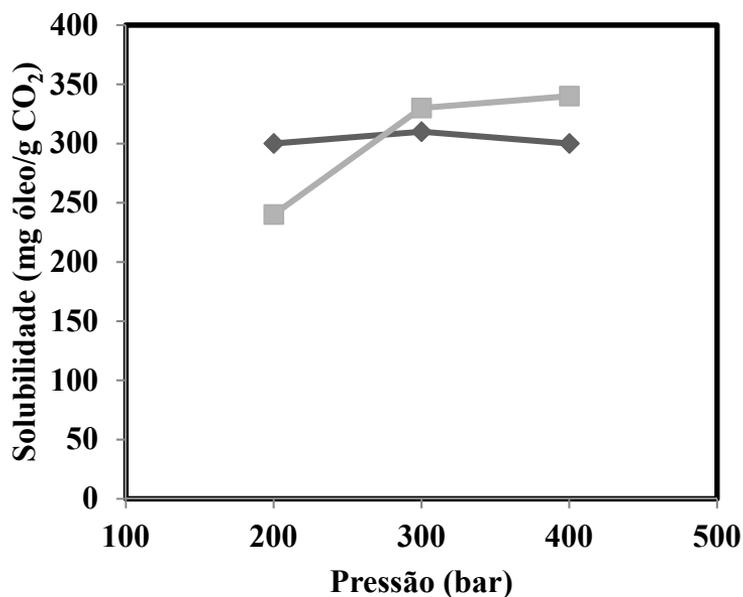
Tabela 5: Propriedade termofísicas calculadas por metodologia de contribuição de grupos

Ácidos graxos	MM (g/mol)	T <sub>b</sub> (K)	T <sub>c</sub> (K)	P <sub>c</sub> (bar)	ω
			780,3814*	14,1765*	
16:0	256,42	608,4731*	*	*	1,0104***
		626,8235*	796,6483*	12,4403*	
18:0	284,48	*	*	*	1,0861***
		626,8074*	797,5042*	12,6837*	0,9245***
18:1	282,46	*	*	*	*

Onde: MM Massa Molar, T<sub>b</sub> Temperatura T<sub>c</sub> Temperatura crítica, P<sub>c</sub> Pressão crítica e ω Fator acêntrico, \*Ashour e Wennesten (1989), \*\*Constantinou e Gani (1994), \*\*\*Wagner (1973), \*\*\*\*Tu (1994). Onde: 16:0 ácido palmítico, 18:0 ácido esteárico e 18:1 ácido oleico.

A solubilidade ou poder de solvatação de um solvente é determinado através de sua densidade, e esta propriedade aumenta em sistemas isotérmicos com o aumento da pressão, enquanto em sistemas isobáricos a densidade aumenta com a diminuição da temperatura (SILVA et al., 2019). A Figura 14 mostra que o poder de solubilidade do CO<sub>2</sub> aumentou com o aumento da pressão de 200 para 400 bar, na isoterma de 60°C. O comportamento do poder de solvatação do CO<sub>2</sub> na isoterma de 40°C aumentou de 200 para 300 bar. No entanto, permaneceu quase inalterado de 300 a 400 bar. Esses dados confirmam o desempenho de extração observado através dos resultados referentes aos rendimentos globais, considerando que os valores foram estatisticamente iguais. Os dados de previsão de solubilidade mostram o ponto de cruzamento entre as isotermas. Acima do

ponto de cruzamento, a pressão de vapor dos compostos do óleo uxi é predominante. Os altos rendimentos obtidos a 40°C/300 bar e 40°C/400bar ocorreram em razão à alta densidade de CO<sub>2</sub>, enquanto os rendimentos observados a 60°C/300 bar e 60°C/400 bar são explicados pelo aumento da pressão de vapor dos compostos lipídicos na polpa do uxi. Antes do ponto de cruzamento, a densidade do CO<sub>2</sub> era predominante e, após esse ponto, a pressão de vapor passou a ser predominante.



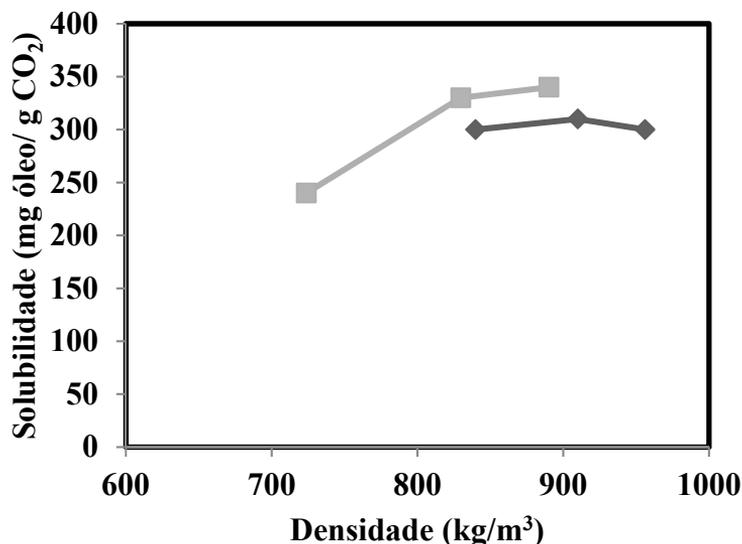


Figura 14: Solubilidade do óleo de uxi (*Endopleura uchi*) em CO<sub>2</sub> supercrítico. 14.1. Solubilidade *versus* pressão. 14.2. Solubilidade *versus* densidade. Losangos representam isoterma de 40°C e quadrados, isoterma de 60°C.

#### 5.4 PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS

O perfil de ácidos graxos do óleo de uxi (Figura 15) sob diferentes condições de temperatura e pressão não se alterou em termos qualitativos. Os resultados podem ser vistos na Tabela 6. A composição química do óleo de uxi apresentou predominância de ácidos graxos insaturados (AGI) com concentração de 58,09-59,86 g/100 g de óleo, com destaque para o ácido oleico (n-9) e linoleico (n-6). Entre os ácidos graxos saturados (AGS), o ácido palmítico e o ácido esteárico foram a maioria. A concentração de ácido oleico (n-9) variou de 52,32 a 54,59 g/100 g de óleo, enquanto para ácido linoleico (n-6) o teor ficou entre 2,27 e 5,59 g/100 g de óleo. A concentração de ácido palmítico variou de 22,07 a 24,30 g/100 g de óleo, enquanto o ácido

esteárico apresentou um teor de 13,21 a 14,49 g/100 g de óleo. A soma dos ácidos graxos insaturados nesta pesquisa atingiu um valor próximo ao encontrado por Berto et al. (2015) para extrato lipídico de polpa de uxi.

Os efeitos do ácido oleico (n-9) incluem sua atividade no hipotálamo, região que controla a homeostase energética. O hipotálamo combina a ingestão energética com o gasto energético para prevenir a obesidade por meio de sinais de saciedade (leptina) e hormônios (insulina). Ao detectar o ácido graxo insaturado, o hipotálamo reduz a ingestão alimentar e, conseqüentemente, a ingestão de glicose (PALOMER et al., 2018).

Os ácidos graxos poliinsaturados (AGPI) são considerados ácidos graxos essenciais, pois os humanos não possuem a capacidade de dessaturar ligações do tipo n-3 e n-6, e por isso devem ser obtidos através da alimentação. Os ácidos graxos n-6 são amplamente consumidos na forma de ácido linoleico, principalmente a partir de óleos vegetais. Os AGPI são precursores dos eicosanóides, que são potentes mediadores lipídicos, desempenhando um papel importante na regulação inflamatória (JÓZWIAK et al., 2020). De acordo com o Banco de Dados de Alimentos e Nutrientes para Estudos Dietéticos (FNDDS), os AGPI apresentam altas concentrações em nozes, sementes e óleos de origem vegetal, como linhaça, soja e girassol. De acordo com o Instituto de Medicina dos Estados Unidos (IOM), o consumo de ácido linoleico (n-6) deve ser de 11,1 a 22,2 g/dia, considerando uma dieta de 2.000 kcal/dia, equivalente de 5 a 10% de macronutrientes dietéticos específicos à idade (ZIRNHELD et al., 2019).



Figura 15: Óleo de uxi (*Endopleura uchi*)

Tabela 6: Composição de ácidos graxos do óleo de uxi (*Endopleura uchi*)

Ácidos Graxos	g de ácido graxo/100g óleo ou %					
	40°C	40°C	40°C	60°C	60°C	60°C
	200 bar	300 bar	400 bar	200 bar	300 bar	400 bar
14:0	0,24	0,12	0,06	0,36	0,18	0,05
16:0	23,90	22,84	24,19	24,30	23,21	22,07
16:1	0,76	0,42	0,23	0,97	0,64	0,16
17:0	0,65	0,38	0,23	0,77	0,59	0,16
18:0	14,70	14,36	14,71	13,21	14,49	14,04
18:1 (n-9)	54,59	52,67	53,69	52,32	53,35	53,69
18:2 (n-6)	2,27	4,69	5,59	3,72	3,77	5,16
20:1	1,04	0,64	0,35	1,08	0,92	0,27
24:0	0,12	0,15	0,12	0,24	0,37	0,00
$\Sigma AG$	98,27	96,27	99,17	96,97	97,52	95,60
$\Sigma AGS$	39,61	37,85	39,31	38,88	38,84	36,32
$\Sigma AGI$	58,66	58,42	59,86	58,09	58,68	59,28
$\Sigma AGMI$	56,39	53,73	54,27	54,37	54,91	54,12
$\Sigma AGPI$	2,27	4,69	5,59	3,72	3,77	5,16
IA	0,42	0,40	0,41	0,44	0,41	0,38
IT	1,32	1,28	1,30	1,30	1,29	1,22
H/H	2,36	2,50	2,44	2,27	2,44	2,66

Onde: 14:0 ácido mirístico, 16:0 ácido palmítico, 16:1 ácido palmitoleico, 17:0 ácido margárico, 18:0 ácido esteárico, 18:1 ácido oleico (n-9), 18:2 ácido linoleico (n-6), 20:1 ácido gondoico, 24:0 ácido lignocérico,  $\Sigma AG$  somatório de ácidos graxos,  $\Sigma AGS$  somatório de ácidos graxos saturados,  $\Sigma AGI$  somatório de ácidos graxos insaturados,  $\Sigma AGMI$  somatório de ácidos

graxos monoinsaturados,  $\sum AGPI$  somatório de ácidos graxos poliinsaturados, IA índice de aterogenicidade, IT índice de trombogenicidade e H/H razão de hipo e hipercolesterolêmicos. O desvio padrão para todos os ácidos graxos foi inferior a 1,8%.

## 5.5 QUALIDADE FUNCIONAL

Considerando a composição majoritária de ácidos graxos insaturados e suas propriedades funcionais, o óleo de uxi extraído com CO<sub>2</sub> supercrítico pode ser caracterizado como alimento funcional devido ao índice de aterogenicidade (IA) e índice de trombogenicidade (IT), além da correlação entre compostos hipo e hipercolesterolêmicos (H/H). Os resultados mostraram que IA variou de 0,38 a 0,44, enquanto IT variou de 1,22 a 1,32, e H/H de 2,36 a 2,66. Os resultados da IA foram semelhantes aos encontrados por Cunha et al. (2019) que avaliaram a qualidade funcional do óleo de bacaba-de-leque (*Oenocarpus distichus*) e Silva et al. (2019) que avaliaram o óleo de açaí (*Euterpe oleracea*), ambos produtos extraídos com CO<sub>2</sub> supercrítico. As informações de IA e IT em menores valores nas dietas são parâmetros desejáveis para revelar uma melhor composição nutricional e funcional dos óleos, principalmente por atuar na prevenção de distúrbios cardiovasculares. Por outro lado, os valores de H/H devem ser analisados de forma inversamente proporcional ao IA e IT, pois H/H está relacionado aos benefícios das lipoproteínas de alta densidade (HDL) no metabolismo. Assim, valores de H/H mais altos são desejáveis em produtos lipídicos para consumo humano (ULBRICHT e SOUTHGATE, 1991; SANTOS-SILVA, BESSA e SANTOS-SILVA, 2002).

## 5,6 COMPOSIÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS CALCULADA

Para mensurar a composição dos triglicerídeos (TAG), foram considerados apenas aqueles que estariam presentes no óleo em quantidade superior a 1% do total de moléculas. As previsões foram realizadas por meio de um aplicativo computacional em Excel/VBA desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Extração da Universidade Federal do Pará (UFPA). Os triglicerídeos mais representativos na composição do óleo de uxi foram OOO, POO, SOO e PSO, cujas quantidades somam mais de 70% da composição. O perfil de TAG do óleo de uxi é mostrado na Tabela 7. Outros óleos que também possuem uma quantidade comprovada de ácidos graxos similarmente apresentaram uma quantidade elevada de trioleína e outras moléculas de triglicerídeos encontradas neste estudo (OLLIVIER et al., 2006; AMARAL, MAFRA e OLIVEIRA, 2010).

Tabela 7: Composição de triglicerídeos do óleo de uxi (*Endopleura uchi*) calculada

		g triglicerídeos/100g óleo						
		40°C			60°C			
TAG	X:Y	MM	200 bar	300 bar	400 bar	200 bar	300 bar	400 bar
PPP	48:0	806	1,44	1,34	1,45	1,57	1,35	1,23
PPS	50:0	834	2,65	2,52	2,65	2,57	2,52	2,35
PPO	50:1	832	9,86	9,24	9,66	10,16	9,30	8,98
PPLi	50:2	830	-	-	1,01	-	-	-
PSS	52:0	862	1,63	1,58	1,61	1,40	1,58	1,49
PSO	52:1	860	12,13	11,62	11,75	11,05	11,61	11,42
PSLi	52:2	858	-	1,03	1,22	-	-	1,10
POO	52:2	858	22,52	21,30	21,45	21,89	21,37	21,84
POLi	52:3	856	1,87	3,79	4,47	3,11	3,02	4,20
SSO	54:1	888	3,73	3,65	3,57	3,00	3,62	3,63
SOO	54:2	886	13,85	13,39	13,04	11,90	13,34	13,90
SOLi	54:3	884	1,15	2,39	2,72	1,69	1,89	2,67
OOO	54:3	884	17,14	16,38	15,87	15,71	16,37	17,71
OOLi	54:4	882	2,14	4,37	4,96	3,35	3,47	5,11

Onde: X é número de carbonos, Y dupla ligação, MM massa molar, P ácido palmítico, S ácido esteárico, O ácido oleico e Li ácido linoleico.

## 5,7 ESTUDO TERMOANALÍTICO

O grau de insaturação dos ácidos graxos constituintes representa o principal parâmetro para determinação das qualidades nutricionais e funcionais do óleo de uxi. A presença majoritária de ácidos graxos

insaturados indica menor estabilidade na presença de certos fatores extrínsecos que podem contribuir para processos oxidativos, como temperatura e atmosfera, que representam elementos deletérios dos óleos, como pode ser visto na Figura 16. O perfil termogravimétrico do óleo de uxi elucidada seu comportamento em relação ao aumento gradual da temperatura e da atmosfera inerte. As análises termogravimétricas e termogravimétricas derivadas (TG/DTG) mostram estabilidade de até 300°C para o óleo de uxi extraído com CO<sub>2</sub> supercrítico a 40°C/300 bar, com acentuada perda de massa a 380°C. A perda de massa do óleo de uxi aumenta com o aumento da temperatura. Os níveis de temperatura observados representam valores acima do usual para preparo de alimentos. Acima de 380°C, a amostra se degrada sucessivamente, com perda de massa até a decomposição completa em 600°C.

A curva DTG confirma a decomposição mais pronunciada do óleo em níveis de temperatura próximos a 380°C, mantendo um padrão linear de mudanças comportamentais, resistindo à ação de um fator oxidativo, como a temperatura, que manteve inerte a atmosfera aplicada nesta investigação. A dinâmica exibida pelas curvas TG e DTG indicam mudanças no óleo de uxi extraído via CO<sub>2</sub> supercrítico quando submetido ao aumento de temperatura, em atmosfera de nitrogênio. Os resultados desta investigação demonstram os efeitos da oxidação do óleo vegetal em reações exotérmicas, de forma semelhante aos resultados obtidos por Santos et al. (2019) em pesquisa realizada com óleo de sapucaia (*Lecythispisonis* Camb.) obtido via CO<sub>2</sub> supercrítico. Santos et al. (2013) também encontraram resultados semelhantes em um estudo realizado para o óleo de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*).

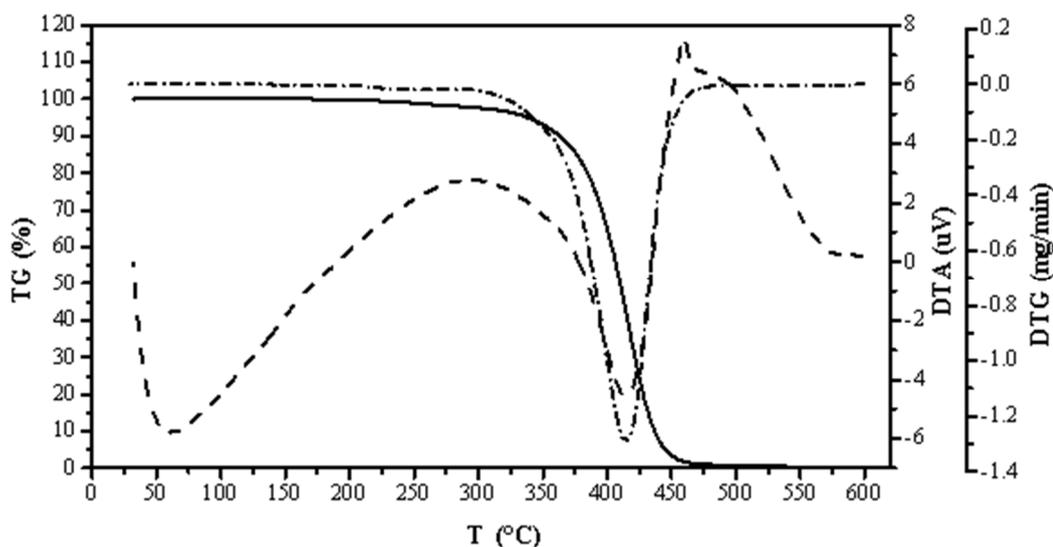


Figura 16: Comportamento termogravimétrico do óleo de uxi extraído com  $\text{CO}_2$  supercrítico a 40 °C/300 bar. Onde: Análise Térmica Diferencial (DTA); Termogravimetria Derivada (DTG); Termogravimetria (TG) e Temperatura (T)

A curva DSC (Figura 17) mostra o comportamento de perda de massa de compostos característicos do óleo de uxi, com um grande pico de oxidação a um nível de temperatura próximo a 400°C. Essa dinâmica confirma os resultados observados para as curvas TG e DTG, pois nesse valor de temperatura há uma grande liberação de energia resultante da grande decomposição dos compostos lipídicos do óleo.

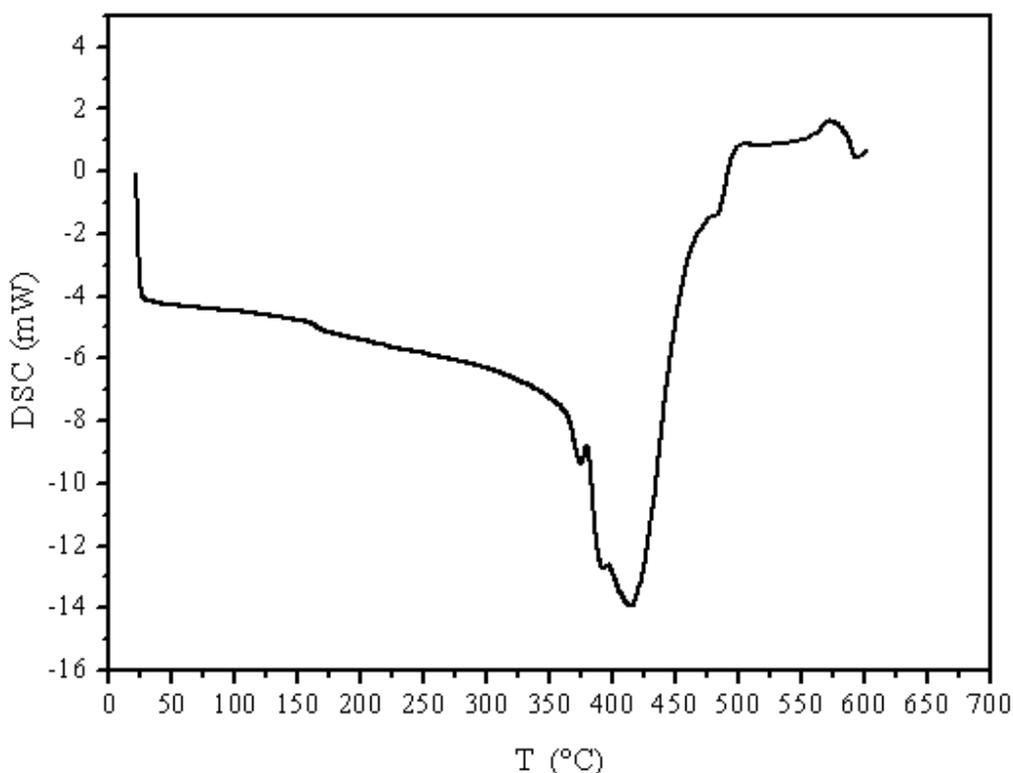


Figura 17: Calorimetria exploratória diferencial ou Differential scanning calorimetry (DSC) para o óleo de uxi extraído CO<sub>2</sub> supercrítico a 40 °C/300 bar.

## 5.8 CAROTENÓIDES TOTAIS

O teor de carotenóides totais no óleo de uxi extraído com CO<sub>2</sub> supercrítico na temperatura de 40°C e 300 bar foi de  $27,16 \pm 1,28$  µg carotenóides/g óleo. O estudo desenvolvido por Espinosa-Pardo et al. (2014) identificou que extratos lipídicos de pupunha (*Bactris gasipaes*) obtidos via CO<sub>2</sub> supercrítico à 40°C e 300 bar apresentaram maior concentração de carotenóides. De acordo com França et al. (1999) a extração de óleo de buriti (*Mauritia flexuosa*) com CO<sub>2</sub> supercrítico a 40°C e 200 bar possibilitou a retirada de aproximadamente 80% de β-caroteno em relação ao total

encontrado no extrato obtido por método convencional com solvente orgânico líquido (hexano). A vazão mássica de CO<sub>2</sub> supercrítico e a umidade da matéria-prima também podem influenciar na extração de carotenóides, como mostra o estudo desenvolvido por Mezzomo et al. (2013). Os autores observaram que o teor de astaxantina em extrato lipídico de camarão rosa (*P. brasiliensis* and *P. paulensis*) foi maior com fluxo mássico de CO<sub>2</sub> de  $2,22 \times 10^{-4}$  kg/s e umidade da matriz igual a 11,21%.

## 6 CONCLUSÃO

A caracterização da polpa de uxi liofilizada foi fundamental para o dimensionamento dos procedimentos de extração supercrítica. Os parâmetros de processo analisados neste trabalho mostraram que a densidade de CO<sub>2</sub> supercrítico foi o principal fator para a obtenção de alto rendimento mássico de óleo de uxi (*Endopleura uchi*), com a utilização de temperatura próxima ao ponto crítico de CO<sub>2</sub>, o que contribuiu para a qualidade do produto obtido. Os perfis de ácidos graxos e triglicerídeos e o estudo termogravimétrico mostraram que o óleo de uxi possui qualidade funcional interessante devido à composição majoritária de ácidos graxos insaturados, além de carotenóides, que podem ser utilizados para prevenir o desenvolvimento de doenças crônicas e degenerativas. Os índices de aterogenicidade (IA), trombogenicidade (IT) e a razão entre os compostos hipocolesterolêmicos e hipercolesterolêmicos (H/H) expressam que o óleo de uxi pode ser consumido na dieta humana. Também pode ser aplicado na produção de alimentos funcionais ou como produto fitoterápico no tratamento de doenças coronarianas e cardiovasculares à base de n-9 e n-6. Esse contexto evidencia que o uxi apresenta potencial nutricional e funcional e pode ser utilizado pelas indústrias de alimentos. Essa relação impulsiona a verticalização de investigações científicas acerca dos efeitos benéficos da espécie a partir do produto obtido, o que pode contribuir de forma positiva para a região amazônica.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, Viviane Gomes da Costa et al. Pentacyclic triterpenes and steroids from the stem bark of uchi (*Sacoglottis uchi*, Humiriaceae). **Acta Amazonica**, v. 43, p. 525-528, 2013.
- ADAMS, Robert P. et al. **Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry**. Carol Stream: Allured publishing corporation, 2007.
- ALBUQUERQUE, Eucinete et al. Biometria de frutos de uxi, em vegetação nativa de Capitão Poço-PA. **Enciclopédia biosfera**, v. 10, n. 19, 2014.
- AMARAL, Joana S.; MAFRA, Isabel; OLIVEIRA, M. Beatriz PP. Characterization of three Portuguese varietal olive oils based on fatty acids, triacylglycerols, phytosterols and vitamin E profiles: application of chemometrics. In: **Olives and olive oil in health and disease prevention**. Academic Press, 2010. p. 581-589.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE), Method of Determining and Expressing Particle Size of Chopped Forage Materials by Screening -Standards S424.1, St. Joseph. MI: ASAE, 1998.
- ARAÚJO, Marilena Emmi; MEIRELES, M. Angela A. Improving phase equilibrium calculation with the Peng–Robinson EOS for fats and oils related compounds/supercritical CO<sub>2</sub> systems. **Fluid Phase Equilibria**, v. 169, n. 1, p. 49-64, 2000.
- ASHOUR, Ibrahim; WENNERSTEN, Ronald. Modified Carnahan-Starling-Soave equation for the calculation of vapor pressures for saturated fatty acids. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 2, n. 2-3, p. 73-79, 1989.

BAJRACHARYA, Gan B. Diversity, pharmacology and synthesis of bergenin and its derivatives: Potential materials for therapeutic usages. **Fitoterapia**, v. 101, p. 133-152, 2015.

BARAI, Priyal et al. Neuroprotective effects of bergenin in Alzheimer's disease: Investigation through molecular docking, in vitro and in vivo studies. **Behavioural Brain Research**, v. 356, p. 18-40, 2019.

BATISTA, Camila de Cássia Rodrigues et al. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of açai (*Euterpe oleracea*) berry oil: Global yield, fatty acids, allelopathic activities, and determination of phenolic and anthocyanins total compounds in the residual pulp. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 107, p. 364-369, 2016.

BELURY, Martha A. et al. Linoleic acid, glycemic control and Type 2 diabetes. **Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids**, v. 132, p. 30-33, 2018.

BERTO, Alessandra et al. Proximate compositions, mineral contents and fatty acid compositions of native Amazonian fruits. **Food Research International**, v. 77, p. 441-449, 2015.

BEZERRA, Valéria Saldanha; PEREIRA, S. S. C.; FERREIRA, L. A. M. Características físicas e físico-químicas do uxi (*Endopleura uchi* Cuatrec).

BOT, Arjen. Phytosterols. In: **Reference Module in Food Science**. Elsevier, 2018.

BOTELHO J.R.S. Extratos de sementes de gergelim preto (*Sesamum indicum* L) obtidos via CO<sub>2</sub> supercrítico: Isotermas de rendimento global, dados cinéticos e ajustes, ácidos graxos totais, fitosteróis e efeitos neuroprotetores. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. 2014.

- BRUNNER, G. Stofftension mit überkritischen Gasen (Gasextraktion). **Chemie Ingenieur Technik**. v. 59, p. 12-22, 1987.
- BRUNNER, G. Gas extraction. An introduction to fundamentals of supercritical fluids and applications to separations process. New York, NY. Springer, 1994.
- BRUNNER, G. Supercritical fluids: technology and application to food processing. **Journal of Food Engineering**. v. 67, p. 21-33, 2005.
- CALDER, Philip C.; YAQOOB, Parveen. Understanding omega-3 polyunsaturated fatty acids. **Postgraduate medicine**, v. 121, n. 6, p. 148-157, 2009.
- CALDER, Philip C. Mechanisms of action of (n-3) fatty acids. **The Journal of nutrition**, v. 142, n. 3, p. 592S-599S, 2012.
- CARVALHO JR, Raul N. et al. Supercritical fluid extraction from rosemary (*Rosmarinus officinalis*): Kinetic data, extract's global yield, composition, and antioxidant activity. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 35, n. 3, p. 197-204, 2005.
- CONSTANTINOU, Leonidas; GANI, Rafiqul. New group contribution method for estimating properties of pure compounds. **AIChE Journal**, v. 40, n. 10, p. 1697-1710, 1994.
- CUNHA, Vânia Maria Borges et al. Bacaba-de-leque (*Oenocarpus distichus* Mart.) oil extraction using supercritical CO<sub>2</sub> and bioactive compounds determination in the residual pulp. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 144, p. 81-90, 2019.
- DA COSTA, Paulo Afonso et al. Phytosterols and tocopherols content of pulps and nuts of Brazilian fruits. **Food Research International**, v. 43, n. 6, p. 1603-1606, 2010.

- DA SILVA, Rui PFF; ROCHA-SANTOS, Teresa AP; DUARTE, Armando C. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 76, p. 40-51, 2016.
- DE ABREU, Heitor A. et al. Antioxidant activity of (+)-bergenin—a phytoconstituent isolated from the bark of *Sacoglottis uchi* Huber (Humireaceae). **Organic & Biomolecular Chemistry**, v. 6, n. 15, p. 2713-2718, 2008.
- DE FRANÇA, Luiz Ferreira et al. Supercritical extraction of carotenoids and lipids from buriti (*Mauritia flexuosa*), a fruit from the Amazon region. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 14, n. 3, p. 247-256, 1999.
- DE MARCO, Iolanda; RIEMMA, Stefano; IANNONE, Raffaele. Life cycle assessment of supercritical impregnation: starch aerogel+  $\alpha$ -tocopherol tablets. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 143, p. 305-312, 2019.
- DE MELO, M. M. R.; SILVESTRE, A. J. D.; SILVA, C. M. Supercritical fluid extraction of vegetable matrices: Applications, trends and future perspectives of a convincing green technology. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 92, p. 115-176, 2014.
- DOS SANTOS, Orquidea Vasconcelos et al. Chemical, chromatographic-functional, thermogravimetric-differential and spectroscopic parameters of the sapucaia oil obtained by different extraction methods. **Industrial crops and products**, v. 132, p. 487-496, 2019.
- EGGERSDORFER, Manfred; WYSS, Adrian. Carotenoids in human nutrition and health. **Archives of biochemistry and biophysics**, v. 652, p. 18-26, 2018.
- ESPINOSA-PARDO, Faber A.; MARTINEZ, Julian; MARTINEZ-CORREA, Hugo A. Extraction of bioactive compounds from peach palm

pulp (*Bactris gasipaes*) using supercritical CO<sub>2</sub>. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 93, p. 2-6, 2014.

FAKIH, Omar et al. Exploring the biophysical properties of phytosterols in the plasma membrane for novel cancer prevention strategies. **Biochimie**, v. 153, p. 150-161, 2018.

GOODSHIP, V.; OGUR, E. O. Polymer processing with supercritical fluids. **Rapra Review Reports** . Vol. 15, Num 8. 2004.

GUAN, Shan et al. Investigation of the mechanisms of improved oral bioavailability of bergenin using bergenin–phospholipid complex. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 40, n. 2, p. 163-171, 2014.

GUPTA, Charu; PRAKASH, Dhan. Phytonutrients as therapeutic agents. **Journal of Complementary and Integrative Medicine**, v. 11, n. 3, p. 151-169, 2014.

HERRERO, Miguel et al. Compressed fluids for the extraction of bioactive compounds. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 43, p. 67-83, 2013.

JÓZWIAK, Michał et al. Anticancer activities of fatty acids and their heterocyclic derivatives. **European Journal of Pharmacology**, v. 871, p. 172937, 2020.

KHALID, Muhammad et al. Biosynthesis and biomedical perspectives of carotenoids with special reference to human health-related applications. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 17, p. 399-407, 2019.

KHAN, Ghulam Rabbani; SCHEINMANN, Feodor. Some recent advances in physical methods for analysis and characterization of polyunsaturated fatty acids. **Progress in the Chemistry of Fats and other Lipids**, v. 15, n. 4, p. 343-367, 1978.

- KEYS, Ancel et al. Prediction of serum-cholesterol responses of man to changes in fats in the diet. **Lancet**, v. 273, p. 959-966, 1957.
- LUTZ, Instituto Adolfo. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. **São Paulo: ANVISA**, 2008.
- MAGALHÃES, Lyege Amazonas M. et al. Identificação de bergenina e carotenóides no fruto de uchi (*Endopleura uchi*, Humiriaceae). **Acta Amazonica**, v. 37, p. 447-450, 2007.
- MAHESHWARI, P. et al. Solubility of fatty acids in supercritical carbon dioxide. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 69, n. 11, p. 1069-1076, 1992.
- MARIUTTI, Lilian RB; MERCADANTE, Adriana Z. Carotenoid esters analysis and occurrence: What do we know so far?. **Archives of biochemistry and biophysics**, v. 648, p. 36-43, 2018.
- MARX, Friedhelm et al. Studies of edible Amazonian plants. Part 5: chemical characterisation of Amazonian *Endopleura uchi* fruits. **European Food Research and Technology**, v. 214, n. 4, p. 331-334, 2002.
- MEZZOMO, Natália et al. Pink shrimp (*P. brasiliensis* and *P. paulensis*) residue: Supercritical fluid extraction of carotenoid fraction. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 74, p. 22-33, 2013.
- MONDELLO, L. FFNSC 2: Flavors and Fragrances of Natural and Synthetic Compounds, Mass Spectral Database, 2011.
- MONGE-FUENTES, Victoria et al. Photodynamic therapy mediated by acai oil (*Euterpe oleracea* Martius) in nanoemulsion: A potential treatment for melanoma. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 166, p. 301-310, 2017.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NCR. *Recommended Dietary Allowances*, 10th ed.; National Academy Press: Washington (DC), 1989.

- NAZIR, Nighat et al. Evaluation of antioxidant and antimicrobial activities of Bergenin and its derivatives obtained by chemoenzymatic synthesis. **European journal of medicinal chemistry**, v. 46, n. 6, p. 2415-2420, 2011.
- NELDER, John A.; MEAD, Roger. A simplex method for function minimization. **The computer journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.
- NERI-NUMA, Iramaia Angélica et al. Small Brazilian wild fruits: Nutrients, bioactive compounds, health-promotion properties and commercial interest. **Food Research International**, v. 103, p. 345-360, 2018.
- NEVES, Leandro Camargo et al. Post-harvest nutraceutical behaviour during ripening and senescence of 8 highly perishable fruit species from the Northern Brazilian Amazon region. **Food Chemistry**, v. 174, p. 188-196, 2015.
- NGAMWONGLUMLERT, L.; DEVAHASTIN, S. Encyclopedia of Food Chemistry. 2019.
- NIST, Mass Spectral Database, in, 2011.
- NORRIS, F. A.; MATTIL, K. F. A new approach to the glyceride structure of natural fats. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 24, n. 8, p. 274-275, 1947.
- OLLIVIER, Denis et al. Differentiation of French virgin olive oil RDOs by sensory characteristics, fatty acid and triacylglycerol compositions and chemometrics. **Food Chemistry**, v. 97, n. 3, p. 382-393, 2006.
- PALOMER, Xavier et al. Palmitic and oleic acid: the yin and yang of fatty acids in type 2 diabetes mellitus. **Trends in Endocrinology & Metabolism**, v. 29, n. 3, p. 178-190, 2018.

- PATEL, D. K. et al. Pharmacological and analytical aspects of berberine: a concise report. **Asian Pacific Journal of Tropical Disease**, v. 2, n. 2, p. 163-167, 2012.
- PENG, Ding-Yu; ROBINSON, Donald B. A new two-constant equation of state. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 15, n. 1, p. 59-64, 1976.
- PINTO, Rafael Henrique Holanda – 1990- Extração do óleo de Bacaba (*Oenocarpus bacaba*) com CO<sub>2</sub> supercrítico: parâmetros de processo, perfil de ácidos graxos e aplicação na síntese de nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Rafael Henrique Holanda Pinto.- 2016.
- PINTO, R. H. H. et al. Extraction of bacaba (*Oenocarpus bacaba*) oil with supercritical CO<sub>2</sub>: Global yield isotherms, fatty acid composition, functional quality, oxidative stability, spectroscopic profile and antioxidant activity. **Grasas y Aceites**, v. 69, n. 2, p. e246-e246, 2018.
- RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. A guide to carotenoids analysis. [s.l.]: International Life Sciences, Institute Press, p. 64, 1999.
- SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Lucía et al. Flavors and aromas. In: **Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables**. Woodhead Publishing, 2019. p. 385-404.
- SANTOS-SILVA, J.; BESSA, R. J. B.; SANTOS-SILVA, FJLPS. Effect of genotype, feeding system and slaughter weight on the quality of light lambs: II. Fatty acid composition of meat. **Livestock production science**, v. 77, n. 2-3, p. 187-194, 2002.
- SANTOS, O. V. et al. Comparative parameters of the nutritional contribution and functional claims of Brazil nut kernels, oil and defatted cake. **Food Research International**, v. 51, n. 2, p. 841-847, 2013.

SHANLEY, Patricia; GAIA, Glória. A “fruta do pobre” se torna lucrativa: a *Endopleura uchi* Cuatrec. em áreas manejadas próximo a Belém, Brasil. **Productos forestales, medios de subsistencia y conservación**, v. 3, p. 219-240, 2004.

SHANLEY, Patricia; MEDINA, Gabriel (Ed.). **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica**. Cifor, 2005.

SHAHZAD, Naiyer et al. Phytosterols as a natural anticancer agent: Current status and future perspective. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 88, p. 786-794, 2017.

SILVA, Saulo L. da et al. Antimicrobial activity of bergenin from *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec. **Acta amazônica**, v. 39, p. 187-191, 2009.

SILVA, Luís R.; TEIXEIRA, Rafaela. Phenolic profile and biological potential of *Endopleura uchi* extracts. **Asian Pacific journal of tropical medicine**, v. 8, n. 11, p. 889-897, 2015.

SILVA, Marcilene P. et al. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of lyophilized Açai (*Euterpe oleracea* Mart.) pulp oil from three municipalities in the state of Pará, Brazil. **Journal of CO<sub>2</sub> utilization**, v. 31, p. 226-234, 2019.

SPAN, Roland; WAGNER, Wolfgang. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. **Journal of physical and chemical reference data**, v. 25, n. 6, p. 1509-1596, 1996.

TRAUTWEIN, Elke A.; DEMONTY, Isabelle. Phytosterols: natural compounds with established and emerging health benefits. **Oléagineux, Corps Gras, Lipides**, v. 14, n. 5, p. 259-266, 2007.

TRIANA-MALDONADO, D. M.; TORIJANO-GUTIÉRREZ, S. A.; GIRALDO-ESTRADA, C. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of oil and omega-3

concentrate from Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) from Antioquia, Colombia. **Grasas y Aceites**, v. 68, n. 1, p. e172-e172, 2017.

TU, Chein-Hsiun. Group-contribution method for the estimation of vapor pressures. **Fluid Phase Equilibria**, v. 99, p. 105-120, 1994.

TURNER, Charlotta; KING, Jerry W.; MATHIASSEN, Lennart. Supercritical fluid extraction and chromatography for fat-soluble vitamin analysis. **Journal of Chromatography A**, v. 936, n. 1-2, p. 215-237, 2001.

ULBRICHT, T. L. V.; SOUTHGATE, D. A. T. Coronary heart disease: seven dietary factors. **The lancet**, v. 338, n. 8773, p. 985-992, 1991.

VERMAAK, Ilze et al. African seed oils of commercial importance—Cosmetic applications. **South African Journal of Botany**, v. 77, n. 4, p. 920-933, 2011.

WAGNER, W. New vapour pressure measurements for argon and nitrogen and a new method for establishing rational vapour pressure equations. **Cryogenics**, v. 13, n. 8, p. 470-482, 1973.

YAU, Jun-Shun et al. Solubilities of carbon dioxide in carboxylic acids under high pressures. **Journal of chemical engineering of Japan**, v. 25, n. 5, p. 544-548, 1992.

ZHANG, Feng et al. Co-encapsulation of  $\alpha$ -tocopherol and resveratrol within zein nanoparticles: Impact on antioxidant activity and stability. **Journal of Food Engineering**, v. 247, p. 9-18, 2019.

ZIRNHELD, Kara H. et al. Dietary fatty acids and bioactive fatty acid metabolites in alcoholic liver disease. **Liver Research**, v. 3, n. 3-4, p. 206-217, 2019.

ZYCHOWSKI, Lisa M. et al. Phytosterol crystallisation within bulk and dispersed triacylglycerol matrices as influenced by oil droplet size and low

molecular weight surfactant addition. **Food chemistry**, v. 264, p. 24-33, 2018.

## PRODUÇÃO CIENTÍFICA (2016 – 2022)

### ARTIGOS PUBLICADOS: PRIMEIRO AUTOR

PINTO, Rafael Henrique Holanda et al. Phytochemical Composition and Functional Potential of Uxi (*Endopleura Uchi*): An Overview. **Food Reviews International**, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926479>

PINTO, Rafael Henrique Holanda et al. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of uxi (*Endopleura uchi*) oil: Global yield isotherms, fatty acid profile, functional quality and thermal stability. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 165, p. 104932, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104932>

### ARTIGOS PUBLICADOS: CO-AUTORIA

FREITAS, Lucas Cantão et al. From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products?. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105466, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>

### CAPÍTULOS DE LIVROS PUBLICADOS: PRIMEIRO AUTOR

PINTO, Rafael Henrique Holanda. Aerogels Envisioning Future Applications. **Materials Research Foundations**, v. 84, 2020. <https://doi.org/10.21741/9781644900994-9>

PINTO, Rafael Henrique Holanda et al. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO ÓLEO ESSENCIAL DE PERPÉTUA-ROXA (*Centratherum punctatum* Cass.) OBTIDO POR HIDRODESTILAÇÃO. Impactos das

Tecnologias na Engenharia Química 2. 1ed.: **Antonella Carvalho de Oliveira**, v. , p. 136-142, 2019.

<https://doi.org/10.22533/at.ed.36419030415>

#### CAPÍTULOS DE LIVROS PUBLICADOS: CO-AUTORIA

BEZERRA, Fernanda Wariss Figueiredo et al. Novel Research on Porous Polymers Using High Pressure Technology. In: **Porous Polymer Science and Applications**. CRC Press, 2022. p. 75-89.

<https://doi.org/10.1201/9781003169604-5>

BARBOSA, Jhonatas Rodrigues et al. Bioaerogels: Synthesis approaches, biomedical applications and cell uptake. **Aerogels II: Preparation, Properties and Applications**, v. 98, p. 43-56, 2021.

<https://doi.org/10.21741/9781644901298-3>

BEZERRA, Fernanda Wariss Figueiredo et al. Supercritical Green Solvent for Amazonian Natural Resources. In: **Advanced Nanotechnology and Application of Supercritical Fluids**. Springer, Cham, 2020. p. 15-31.

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-44984-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44984-1_2)

BEZERRA, F. W. F. et al. Extraction of bioactive compounds. In: **Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science**. Elsevier, 2020. p. 149-167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817388-6.00008-8>

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817388-6.00008-8>

CUNHA, Vânia Maria Borges et al. Carbon dioxide use in high-pressure extraction processes. **Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil**

**Recovery; InTechOpen: London, UK, p. 211-240, 2018.**  
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71151>

DE OLIVEIRA, Mozaniel Santana et al. Potential of medicinal use of essential oils from aromatic plants. **Potential of essential oils**, p. 1-21, 2018.  
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78002>

SILVA, Sebastião Gomes; Cruz et al. ASPECTOS BOTÂNICOS DOS ÓLEOS ESSENCIAIS. Estudos Transdisciplinares nas Engenharias 3. 1ed.: **Atena Editora**, v. , p. 170-181, 2019.  
<https://doi.org/10.22533/at.ed.82919071016>

TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

CORDEIRO, R. M.; BEZERRA, F. W. F. ; PINTO, R. H. H. ; DA COSTA, W. A. ; OLIVEIRA, M. S. . DETERMINAÇÃO DE CAROTENOIDES EM EXTRATOS DE MURICI (BYRSONIMA CRASSIFOLIA L. RICH) OBTIDOS POR EXTRAÇÃO COM FLUIDOSUPERCRÍTICO. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2018, São Paulo. Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2018. p. 2705.

COSTA, W. A.; Bezerra, Fernanda Wariss Figueiredo; OLIVEIRA, M. S. ; BEZERRA, P. N. ; CRUZ, J. N. ; SILVA, S. G. ; SILVA, C. C. E. ; SILVA, A. P. S. ; PINTO, R. H. H. ; CARVALHO JUNIOR, R. N. . COMPOSIÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS DE ÓLEO DE PALMISTE OBTIDO POR EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 2018, SÃO LUÍS. Mega tendências: Desafios e oportunidades para o futuro da Química, 2018.

COSTA, W. A. ; OLIVEIRA, M. S. ; PINTO, R. H. H. ; SANTOS, A. P. M. ; GARCIA, K. C. S. P. ; SILVA, C. J. ; BEZERRA, F. W.F. ; CARVALHO JUNIOR, R. N. ; SOUZA FILHO, A. P. S. . CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E NUTRICIONAL DE FEIJÃO-DA-COLÔNIA (*Vigna unguiculata* L. Walp). In: Encontro de Profissionais da Química da Amazônia, 2017, Belém. Encontro de Profissionais da Química da Amazônia, 2017.

PINTO, R. H. H.; FERREIRA, M. C. R. ; COSTA, W. A. ; CORDEIRO, R. M. ; ANDRADE, E. H. A. ; CARVALHO JUNIOR, R. N. . CHEMICAL CHARACTERIZATION OF PERPÉTUA-ROXA (*Centratherum punctatum* Cass.) ESSENTIAL OIL EXTRACTED BY HYDRODISTILLATION. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2018, São Paulo. Blucher Chemical Engineering Proceedings. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 2861.

PINTO, R. H. H.; MENEZES, E. G. O. ; SILVA, N. J. N. ; CARVALHO JUNIOR, R. N. . DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES CRÍTICAS DE EXTRATOS LIPÍDICOS DE FRUTOS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DE MÉTODOS DE CONTRIBUIÇÃO DE GRUPO. In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2018, Belém. PROCESSAMENTO E ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2018.

TUMA, J. C. ; PINTO, R. H. H. ; CORDEIRO, R. M. ; COSTA, W. A.; SILVA, A. P. S. ; CARVALHO JUNIOR, R. N. . CINÉTICA DE SECAGEM DA POLPA DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*, Mart.). In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2018, Belém. PROCESSAMENTO E ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2018.

## RESUMOS EXPANDIDOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

R.H.H. Pinto; P. N. Bezzera; E. H. A. Andrade ; R. N. Carvalho Junior . Uxi (Endopleura uchi) oil extraction with supercritical CO<sub>2</sub>: global yield isotherms and fatty acid profile. In: V Iberoamerican Conference on Supercritical Fluids (Prosciba), 2019, Campinas. Book of Abstracts, 2019.

## RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

SILVA, R. C. F. ; VIEIRA, E. P. S. ; CORREA, B. S. ; COSTA, M. S. ; CABRERA-PASCA, G. A. ; SENA, C. ; R. H. H. PINTO ; CARVALHO JUNIOR, R. N. SYSTEMATIC STUDY OF COBALT OXIDE NANOPARTICLES THROUGH RAMAN SPECTROSCOPY. In: Encontro de Outono da SBF 2019, 2019, Aracaju. NANOMATERIALS V, 2019.

## **ANEXOS**



## Phytochemical Composition and Functional Potential of Uxi (*Endopleura Uchi*): An Overview

Rafael Henrique Holanda Pinto , Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra ,  
Priscila do Nascimento do Nascimento Bezerra, and Raul Nunes de Carvalho Junior 

Technology Institute, Program of Post-Graduation in Food Science and Technology, Federal University of Pará, Belém, Brazil

### ABSTRACT

*Endopleura uchi* is a native species from the Brazilian Amazon, with fruits consumed by the local population *in natura* or as pulp. The bark of the stem is used for tea production as medicine. However, the interest in this species woods by the civil and naval construction contributes to the felling of trees, which harms the ecosystem. For this reason, this research aims to conduct a general review on *E. uchi* phytochemical composition and biological activities, in order to contribute to the valorization, and consequent, awareness for the species preservation and maintenance.

### KEYWORDS

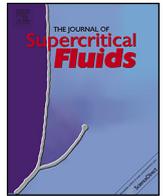
Amazon; bioactive compounds; *Endopleura uchi*; functional foods

### Introduction

Vegetables are important sources of bioactive compounds, which have a high capacity to prevent oxidative stress and chronic degenerative diseases, which can arise with increasing age.<sup>[1]</sup> In recent years, there has been a greater awareness of natural products consumption, aiming to improve the life quality.<sup>[2]</sup>

Food raw material bioactive compounds include fatty acids, phytosterols, liposoluble vitamins (A, D, E and K), colorant groups ( $\beta$ -carotene, lutein and lycopene), phenolic compounds (Bergenin, catechin, gallic acid and anthocyanins), aromas, and volatiles (Eugenol and  $\alpha$ -Ylangene).<sup>[3]</sup> The benefits associated with these compounds consumption attract the food and drug industries attention. Intake of phytosterols and vitamin E, for example, contributes to the cholesterol levels reduction, reducing the risk of cardiovascular disorders.<sup>[4]</sup> Natural pigments, such as carotenoids, have antioxidant, anticancer, and cardioprotective properties.<sup>[5]</sup> Antioxidant compounds are able to minimize free radicals harmful effects, inhibiting oxidative changes.<sup>[2]</sup> Aromas and volatiles are important for foods selection at different maturation levels, which may contribute to byproducts synthesis with high nutritional value and desirable sensorial characteristics.<sup>[6]</sup>

In the search for matrices with nutritional and functional potential, Amazonian fruit have been gaining prominence in the scientific research scenario, for natural and healthy foods production, since they constitute as a good sources of bioactive compounds. These substances are present in Amazonian oleaginous species, with an emphasis on uxi (*Endopleura uchi*).<sup>[7]</sup> This species is native to northern Brazil and its fruits are widely consumed by the locals, *in natura* or as pulp for beverage and ice cream production. In management areas, fruit commercialization represents the income source of families in the Amazon region. The tree trunk bark is widely used in tea preparation as a herbal medicine for arthritis, cholesterol, diabetes, uterine fibroids, and as an anti-inflammatory.<sup>[8,9]</sup>



# Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of uxi (*Endopleura uchi*) oil: Global yield isotherms, fatty acid profile, functional quality and thermal stability

Rafael Henrique Holanda Pinto<sup>a</sup>, Eduardo Gama Ortiz Menezes<sup>a</sup>, Lucas Cantão Freitas<sup>a</sup>, Eloísa Helena de Aguiar Andrade<sup>b</sup>, Roseane Maria Ribeiro-Costa<sup>c</sup>, José Otávio Carréra Silva Júnior<sup>d</sup>, Raul Nunes Carvalho Junior<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Extraction Laboratory, Post-graduate program in Food Science and Technology, Institute of Technology, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá 66075-900, Belém, Pará, Brazil

<sup>b</sup> Adolpho Ducke Laboratory, Post-graduate Program in Biotechnology and Biodiversity, Museu Paraense Emílio Goeldi, Av. Perimetral, 1900, 66077-530, Belém, Pará, Brazil

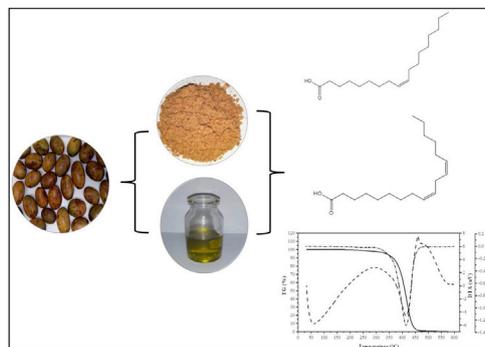
<sup>c</sup> Laboratory of Pharmaceutical Nanotechnology, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá 66075-900, Belém, Pará, Brazil

<sup>d</sup> Laboratory R&D Pharmaceutical and Cosmetic, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá 66075-900, Belém, Pará, Brazil

## HIGHLIGHTS

- Uxi (*Endopleura uchi*) is a native species from the Amazon region.
- The fruits have potential for edible vegetable oil production, due to their chemical composition.
- Uxi oil was obtained with high yields at temperatures of 40 and 60 °C and pressures of 300 and 400 bar.
- The functional quality indices express that uxi oil can be consumed in the human diet as table oil, similarly to olive oil.

## GRAPHICAL ABSTRACT



## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 19 February 2020

Received in revised form 16 May 2020

Accepted 9 June 2020

Available online 13 June 2020

### Keywords:

Amazon  
Functional food  
Supercritical CO<sub>2</sub>  
Bioactive compounds  
Uxi

## ABSTRACT

In this research, uxi (*Endopleura uchi*) oil was obtained via supercritical CO<sub>2</sub> extraction in order to promote the valorization of the species in the industrial scenario, showing the potential of its oil as a functional food. The oil was extracted at temperatures of 40 and 60 °C and pressures of 200–400 bar. The highest yield was obtained at 60 °C / 400 bar (24.48 ± 0.20 %) in db. The oil showed a composition with predominance of oleic acid (n-9), as well as a stable thermal behavior up to 300 °C. The uxi oil obtained via supercritical CO<sub>2</sub> is presented as a potential product for the food industry due to its good functional quality.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Uxi (*Endopleura uchi*) is a native species from the Amazon region, and its fruits are widely consumed by the local population

\* Corresponding author.

E-mail address: [raulncj@ufpa.br](mailto:raulncj@ufpa.br) (R.N. Carvalho Junior).



## Review

## From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products?

Lucas Cantão Freitas, Jhonatas Rodrigues Barbosa, Ana Laura Caldas da Costa, Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra, Rafael Henrique Holanda Pinto, Raul Nunes de Carvalho Junior\*

Extraction Laboratory, Post-Graduate Program in Food Science and Technology, Institute of Technology, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá, 66075-900 Belém, Pará, Brazil



## ARTICLE INFO

## Keywords:

Waste valorization  
Biomaterials  
Green technologies  
Sustainable industry

## ABSTRACT

Demand for food production has been promoting an increase in the generation of agro-industrial wastes. Although in the past these wastes were mainly seen as a big issue, in the current scenario they are seen as the key strategy for the development of sustainable industrial processes. In this context, several new environmentally friendly technologies such as supercritical fluid extraction (SFE), microwave-assisted extraction (MAE) and ultrasound-assisted extraction (UAE) have been studied and applied to obtain products with high added value in order to supply the chemical, pharmaceutical and food industries. Similarly, the energy generation from biomass and production of new biomaterials such as bionanofilms, bioaerogels, hydrogels and nanocomposites have been intensely studied in order to cross the barriers of the laboratory scale. Therefore, this review aims to update the scientific community, industries, governments and society on the sustainable applications, latest advances and trends in the valorization of agro-industrial wastes for new product development, highlighting the new possibilities for the progress of sustainable production.

### 1. Introduction

The sustainable reuse of biomass from agro-industrial wastes envisioning the production of food, drugs, biologically active compounds, biomaterials and sustainable energy generation is, undoubtedly, one of the biggest challenges of the 21st century. Agricultural and food sectors generate a substantial amount of waste, which can be used as raw materials to obtain high added-value products, promoting a range of possibilities for a sustainable production (Ng et al., 2020). The Organization of the United Nations (FAO, 2011) estimates that approximately one-third of all food produced for human nutrition in the world is lost or wasted, which is approximately 1.6 billion tons per year. Moreover, fruits, vegetables, roots and tubers represent about 40–50% of the total quantity of food wasted (Ravindran et al., 2018). In such a framework, the valorization of these wastes has emerged as a key strategy for an environmentally-friendly production.

Agro-industrial wastes such as peels, seeds, pits, pulps, press cakes and leaves are the focus of numerous investigations. These residues are source of a huge spectrum of secondary plant metabolites (Alexandre,

2017), such as phenolic compounds, known as the most significant class of bioactive compounds with antioxidant activity found in fruit tissues (Rossetto et al., 2020). Various studies show that these components have many health benefits, as anti-inflammatory, antidiabetic, antioxidant, anticancer, antimicrobial and antiproliferative activities (Peanparkdee and Iwamoto, 2019; Ballesteros-Vivas et al., 2019; Santos et al., 2019; Tunna et al., 2017).

Agro-industrial wastes from various processing sectors contribute to the increase in biomass, and the vast majority of which are deposited in landfills or simply discarded in inadequate places. The main problems associated with the increase in biomass production are the fuel and microbiological potentials, attributed to the bioavailability of highly energetic organic material such as carbohydrate and fat polymers. The biomass accumulation contributes to fires in regions with a drier climate, leading to large losses of forests and biomes. Also, these wastes serve as food for the proliferation of microorganisms, which although important for decomposition, on a large scale they become a major problem, mainly associated with the production of greenhouse gases, toxic degradation products, and proliferation of pathogenic bacteria and

\* Corresponding author.

E-mail address: [raulncj@ufpa.br](mailto:raulncj@ufpa.br) (R.N. Carvalho Junior).

## Chapter 9

# Aerogels Envisioning Future Applications

Rafael Henrique Holanda Pinto\*, Jhonatas Rodrigues Barbosa, Lucas Cantão Freitas, Ivonete Quaresma da Silva de Aguiar, Flávia Cristina Seabra Pires, Ana Paula de Souza e Silva and Raul Nunes de Carvalho Junior

Extraction Laboratory, Faculty of Food Engineering, Program of Post-Graduation in Food Science and Technology, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá, 66075-900, Belém, Pará, Brazil

\* rafael\_holanda90@hotmail.com

### Abstract

Aerogels are nanoporous structures with low thermal conductivity, specific mass and refractive index. These materials can be divided into organic, inorganic and hybrid groups. The advantages of aerogels include their synthesis with raw materials from different natures, such as macronutrients, metal oxides, polymers, carbon allotropes and transition metals. Prospects for the future applications of aerogels focus on the synthesis of functional foods, medicines, impact absorbing materials, catalytic supports, and aerospace components.

### Keywords

Aerogels, Nanoporous, Structures, Perspectives, Applications

### Contents

<b>1. Introduction.....</b>	<b>215</b>
<b>2. Future applications of bioaerogels.....</b>	<b>216</b>
2.1 Bioaerogels applied as functional foods.....	216
2.2 Bioaerogels applied as thickeners and stabilizers .....	216
2.3 Bioaerogels applied as medicines and scaffolding in tissue repair .....	217
<b>3. Future applications of polymeric aerogel.....</b>	<b>217</b>
3.1 Polymeric aerogel as impact absorbing materials .....	218

## CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO ÓLEO ESSENCIAL DE PERPÉTUA-ROXA (*Centratherum punctatum* Cass.) OBTIDO POR HIDRODESTILAÇÃO

### **Rafael Henrique Holanda Pinto**

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), Laboratório de Extração, Belém, Pará.

### **Maria Caroline Ferreira Rodrigues**

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), Laboratório de Extração, Belém, Pará.

### **Wanessa Almeida da Costa**

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), Laboratório de Extração, Belém, Pará.

### **Renato Macedo Cordeiro**

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), Laboratório de Extração, Belém, Pará.

### **Eloisa Helena de Aguiar Andrade**

Museu Paraense Emílio Goeldi, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biodiversidade (PPG-BIONORTE), Laboratório Adolpho Ducke, Belém, Pará.

### **Raul Nunes de Carvalho Junior**

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA), Laboratório de Extração, Belém, Pará.

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi analisar a composição química do óleo essencial de folhas de perpétua-roxa (*Centratherum punctatum*), cultivadas no Campus de Pesquisa do Museu Paraense Emílio Goeldi. A extração do óleo foi realizada pelo método de hidrodestilação com o uso de Clevenger modificado. O processo de extração ocorreu por 180 minutos. A identificação dos compostos e a quantificação das concentrações foram realizadas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas. O estudo identificou 31 compostos. E-Cariofileno foi o constituinte predominante, seguido pelo Germacreno D,  $\alpha$ -Humuleno e Cis- $\beta$ -Farneseno. O presente estudo observou que a perpétua-roxa, embora disponha de baixo rendimento de óleo essencial, pode ser considerada como uma boa fonte de compostos bioativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Centratherum punctatum*, óleo essencial, hidrodestilação, compostos bioativos.

**ABSTRACT:** The objective of this work was to analyze the chemical composition of the essential oil of perpétua-roxa (*Centratherum punctatum*) leaves, cultivated in the Research Campus of the Museu Paraense Emílio Goeldi. The oil extraction was accomplished through the hydrodistillation method with the use of modified Clevenger. The extraction process

Chapter

## Novel Research on Porous Polymers Using High Pressure Technology

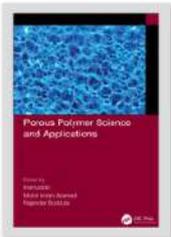
*By Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra, Jhonatas Rodrigues  
Barbosa, Lucas Cantão Freitas, Marieiba de Los Angeles  
Rodríguez Salazar, Rafael Henrique Holanda Pinto, Giselle  
Cristine Melo Aires, Raul Nunes de Carvalho Junior, Jorddy Neves  
da Cruz*

Book [Porous Polymer Science and Applications](#)

Edition	1st Edition
First Published	2022
Imprint	CRC Press
Pages	15
eBook ISBN	9781003109604



Share



## Chapter 3

# Bioaerogels: Synthesis Approaches, Biomedical Applications and Cell Uptake

Jhonatas Rodrigues Barbosa<sup>1\*</sup>, Rafael Henrique Holanda Pinto<sup>1</sup>, Luiza Helena da Silva Martins<sup>2</sup>,  
Raul Nunes de Carvalho Junior<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>LABEX/FEA (Faculty of Food Engineering), Program of Post-Graduation in Food Science and Technology, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá, 66075-900 Belém, Pará, Brazil

<sup>2</sup>Institute of Animal Health and Production - Federal Rural University of Amazonia - Avenida Presidente Tancredo Neves N° 2501; Terra Firme; Cep: 66.077-830 Belém, Pará, Brazil

<sup>3</sup>Program of Post-Graduation in Natural Resources Engineering, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/N, Guamá, 66075-900 Belém, Pará, Brazil

jhonquimbarbosa@gmail.com; Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-6394-299X>

### Abstract

Bioaerogels are a special class of aerogels, produced from natural polymers, are porous structures with promising physicochemical properties for various applications. This chapter focus on the latest bioaerogel findings, addressing the synthesis, impregnation of bioactive compounds, pharmacological applications and aspects of cell uptake, biodegradability and toxicity. Bioaerogels are biomaterials with interesting properties such as high surface area, high thermal and mechanical resistance, low density and dielectric constant. It has been reported that these biomaterials can be used for drug delivery and molecular scaffolding production. Furthermore, it has been shown that bioaerogels are biocompatible, biodegradable, non-toxic, and can be absorbed and degraded by the cellular environment. Finally, bioaerogels are promising, inexpensive, environmentally friendly and versatile materials and can be the basis for the manufacture of new technologies and biomaterials.

### Keywords

Biopolymer, Bioaerogel, Biomaterial, Biodegradability, Cellular Uptake

# Chapter 2

## Supercritical Green Solvent for Amazonian Natural Resources



**Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra** , **Priscila do Nascimento Bezerra**,  
**Vânia Maria Borges Cunha**, **Marielba de Los Angeles Rodriguez Salazar**,  
**Jhonatas Rodrigues Barbosa**, **Marcilene Paiva da Silva**,  
**Mozaniel Santana de Oliveira**, **Wanessa Almeida da Costa**,  
**Rafael Henrique Holanda Pinto**, **Jorddy Neves da Cruz**,  
and **Raul Nunes de Carvalho Junior**

### Contents

2.1 Introduction.....	16
2.2 Green Methods.....	16
2.3 Greener Supercritical (Co)Solvents.....	20
2.4 Biological Compounds Extracted.....	22
2.5 Biological Applications.....	24
2.6 Considerations.....	25
References.....	26

---

F. W. F. Bezerra (✉) · P. do Nascimento Bezerra · V. M. B. Cunha  
M. de Los Angeles Rodriguez Salazar · J. R. Barbosa · M. P. da Silva  
M. S. de Oliveira · R. H. H. Pinto  
Laboratório de Extração (LABEX), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de  
Alimentos, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brazil

W. A. da Costa  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia,  
Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brazil

J. N. da Cruz  
Laboratório Adolpho Ducke, Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, Pará, Brazil

R. N. de Carvalho Junior  
Laboratório de Extração (LABEX), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de  
Alimentos, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brazil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia,  
Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brazil  
e-mail: [raulncj@ufpa.br](mailto:raulncj@ufpa.br)

© Springer Nature Switzerland AG 2020

Inamuddin, A. M. Asiri (eds.), *Advanced Nanotechnology and Application of  
Supercritical Fluids*, Nanotechnology in the Life Sciences,  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-44984-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44984-1_2)

## CHAPTER 8

# Extraction of bioactive compounds

F.W.F. Bezerra<sup>a</sup>, M.S. de Oliveira<sup>a</sup>, P.N. Bezerra<sup>a</sup>, V.M.B. Cunha<sup>a</sup>, M.P. Silva<sup>a</sup>,  
W.A. da Costa<sup>b</sup>, R.H.H. Pinto<sup>a</sup>, R.M. Cordeiro<sup>b</sup>, J.N. da Cruz<sup>c</sup>, A.M.J. Chaves Neto<sup>b,c</sup>,  
R.N. Carvalho Junior<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Technology Institute, Program of Post-Graduation in Food Science, Technology and Engineering, Federal University of Pará, Belém, Brazil

<sup>b</sup>Technology Institute, Program of Post-Graduation in Amazon Natural Resources Engineering, Federal University of Pará, Belém, Brazil

<sup>c</sup>Laboratory of Preparation and Computation of Nanomaterials, Federal University of Pará, Belém, Brazil

### Contents

1. Introduction	149
2. CO <sub>2</sub> as supercritical fluid	150
3. Supercritical carbon dioxide properties	152
3.1 Thermodynamics proprieties	152
3.2 Transport properties	152
4. SC-CO <sub>2</sub> extraction	153
5. Bioactive compounds extraction by SC-CO <sub>2</sub>	154
5.1 Fatty acids	154
5.2 Essential oils	156
5.3 Phenolic compounds	156
5.4 Carotenoids	157
5.5 Applications of bioactive compounds obtained from SC-CO <sub>2</sub>	158
6. Considerations	160
Acknowledgment	161
References	161
Further reading	167

## 1. Introduction

Secondary metabolites, such as antioxidants, vitamins, and minerals, are bioactive compounds produced by different plants species, and are also used as medicines and flavorings. Their antioxidant properties and possible uses in food industry have been investigated in the recent years [1].

Among the various methods of obtaining natural substances, such as maceration, solvent extraction, ultrasound-assisted extraction, and microwave-assisted extraction, the supercritical fluid extraction (SFE) has become an important alternative for food, pharmaceutical, and cosmetic industries. The preparation of solvent-free products is one of the most important advantages of this process. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is the most used solvent in SFE due to its inertness, nontoxicity, high solubility, and perfect conditions for thermosensitive compounds extraction [1, 2].

---

# Carbon Dioxide Use in High-Pressure Extraction Processes

---

Vânia Maria Borges Cunha, Marcilene Paiva da Silva,  
Wanessa Almeida da Costa,  
Mozaniel Santana de Oliveira,  
Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra,  
Anselmo Castro de Melo,  
Rafael Henrique Holanda Pinto,  
Nelio Teixeira Machado, Marilena Emmi Araujo and  
Raul Nunes de Carvalho Junior

Additional information is available at the end of the chapter

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71151>

---

## Abstract

This chapter describes the use of carbon dioxide at high pressures as an alternative for the extraction of bioactive compounds in a more sustainable way, addressing some of its physicochemical properties, such as pressure, temperature, density, solvation, selectivity, and its interaction with the solute when modified by other solvents such as ethanol and water. This extraction process is considered chemically “green,” when compared to conventional extraction processes using toxic organic solvents.

**Keywords:** supercritical CO<sub>2</sub>, high pressure, density, vegetable matrix, bioactive compounds

---

## 1. Introduction

Separation technologies with fluids at high pressures are essentially vital to get new natural products of vegetable or marine origin that have biological activity, so-called bioactive extracts. Among the developed technologies, the supercritical fluid technology offers products free of residual solvent and that typically present high quality, when compared to products obtained by conventional techniques. The extracts of bioactive compounds can be obtained by extraction

---

---

## **Potential of Medicinal Use of Essential Oils from Aromatic Plants**

---

Mozaniel Santana de Oliveira,  
Marcos Martins Almeida,  
Marielba de Los Angeles Rodriguez Salazar,  
Flávia Cristina Seabra Pires,  
Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra,  
Vânia Maria Borges Cunha,  
Renato Macedo Cordeiro,  
Glides Rafael Olivo Urbina, Marcilene Paiva da Silva,  
Ana Paula Souza e Silva,  
Rafael Henrique Holanda Pinto and  
Raul Nunes de Carvalho Junior

Additional information is available at the end of the chapter

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78002>

---

### **Abstract**

The use of medicinal plants rich in essential oils can represent a viable source for the control of some diseases, being able to constitute a possible therapeutic alternative due to its effectiveness. Essential oils are natural volatile fractions extracted from aromatic plants and formed by classes of substances such as esters of fatty acids, mono and sesquiterpenes, phenylpropanoids, aldehyde alcohols and, in some cases, aliphatic hydrocarbons, among others. Essential oils have been used by mankind for medicinal purposes for several centuries, with reports coming from Ancient Egypt. In this sense, the present work aims to approach the biological activities of essential oils such as antioxidant, anticancer, antiprotozoal, antifungal, antibacterial and anti-inflammatory activities of different plant matrices rich in essential oils.

**Keywords:** natural products, essential oils, medicinal application, biological activity

---

## ASPECTOS BOTÂNICOS DOS ÓLEOS ESSENCIAIS

### **Sebastião Gomes Silva**

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Química  
Belém - Pará

### **Jorddy Neves da Cruz**

Embrapa Amazônia Oriental  
Belém - Pará

### **Pablo Luis Baia Figueiredo**

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Química  
Belém - Pará

### **Wanessa Almeida da Costa**

Universidade Federal do Pará, LABEX - FEA  
Belém - Pará

### **Mozaniel Santana de Oliveira**

Universidade Federal do Pará, LABEX - FEA  
Belém - Pará

### **Rafael Henrique Holanda Pinto**

Universidade Federal do Pará, LABEX - FEA  
Belém - Pará

### **Renan Campos e Silva**

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Química  
Belém - Pará

### **Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra**

Universidade Federal do Pará, LABEX - FEA  
Belém - Pará

### **Raul Nunes de Carvalho Junior**

Universidade Federal do Pará, LABEX - FEA  
Belém - Pará

### **Eloisa Helena de Aguiar Andrade**

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Química  
Belém - Pará

**RESUMO:** Os óleos essenciais (OE's) vêm sendo utilizados pelas comunidades mundiais há séculos, em diversas áreas e para diversos fins como medicinais, aromatizantes, em perfumaria, cosméticos, inseticida, fungicida, bactericida, dentre outros. Eles são substâncias naturais e biodegradáveis, geralmente atóxicos ou com baixa toxicidade aos seres humanos. Desse modo, as constantes pesquisas nessa área representam uma alternativa de busca de novos medicamentos mais eficientes e com menores efeitos colaterais, assim como a obtenção de produtos e insumos diversos, além de serem fonte de obtenção de moléculas com grande valor agregado. Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo descrever o aspecto botânico dos OE's.

**PALAVRAS-CHAVE:** óleos essenciais, aspectos botânicos, propriedades medicinais.

### **BOTANICAL ASPECTS OF ESSENTIAL OILS**

**ABSTRACT:** Essential oils (EO's) have been used by the world's communities for centuries,