

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia
de Bioprocessos e Biotecnologia - **Campus de Araraquara**

Vinícius Medeiros Momesso

EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÓLEO DE CASTANHA DE SAPUCAIA
(*Lecythis pisonis* Cambess.) VISANDO SUA APLICAÇÃO COMO TRIGLICERÍDEO
DIETÉTICO

Araraquara

2024

Vinícius Medeiros Momesso

**EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÓLEO DE CASTANHA DE SAPUCAIA
(*Lecythis pisonis* Cambess.) VISANDO SUA APLICAÇÃO COMO
TRIGLICERÍDEO DIETÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Araraquara, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientador(a): Prof. Dr. Prof^a Dr^a Ariela Veloso de Paula

Coorientador(a): Prof. Dr. Prof. Dr. André Gonzaga dos Santos.

Araraquara

2024

M732e Momesso, Vinícius Medeiros.
Extração e caracterização de óleo de castanha de sapucaia
(*Lecythis pisonis Cambess.*) visando sua aplicação como
triglicerídeo dietético / Vinícius Medeiros Momesso. – Araraquara,
2024.
56 f. : il.

Orientadora: Ariela Veloso de Paula.
Coorientador: André Gonzaga dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia de
Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Farmacêuticas.

1. Óleo de castanha de sapucaia. 2. Óleo de arilo de sapucaia.
3. Triglicerídeos dietéticos. 4. Acidólise. I. Paula, Ariela Veloso de,
orient. II. Santos, André Gonzaga dos, coorient. III. Título.

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação – Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP Campus de Araraquara

Esta ficha não pode ser modificada

Vinícius Medeiros Momesso

**EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ÓLEO DE CASTANHA DE SAPUCAIA
(*Lecythis pisonis* Cambess.) VISANDO SUA APLICAÇÃO COMO
TRIGLICERÍDEO DIETÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Araraquara, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia.

Área de Concentração:

Data da defesa: 07/11/2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Prof^a Dr^a Ariela Veloso de Paula
UNESP - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - Campus de Araraquara

Prof. Dr. Álvaro de Baptista Neto
UNESP - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - Campus de Araraquara

Prof. Dr. Adriana Candido da Silva Moura
Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara/Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - Campus de Araraquara

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me deu suporte, à minha orientadora e ao co-orientador pelo incentivo e atenção durante a execução, e também aos amigos que conheci na UNESP.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenadoria de Permanência Estudantil (COPE) através da Bolsa COPE CONECTA 2022.

RESUMO

A sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.) é uma planta nativa do Brasil, e seus frutos originam as sementes de sapucaia, que são castanhas oleaginosas conhecidas por parte da população. Embora suas castanhas sejam comestíveis e nutritivas, elas não são amplamente consumidas ou comercializadas como outras castanhas mais populares, como a castanha-do-pará e a castanha de caju, por isso, a sapucaia pode ser considerada uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC). Contudo, essas castanhas apresentam um alto teor de lipídios (51 - 64% m/m) o que determina um alto potencial de produção e também comércio de seu óleo. Já existem estudos sobre as características deste óleo que possui um elevado teor de ácidos graxos insaturados e algumas de suas propriedades benéficas à saúde documentadas como através da redução de doenças cardiovasculares. Devido a essas características do óleo, este estudo teve como objetivo a extração e caracterização do óleo da semente de sapucaia e do óleo de seu arilo funicular, além da utilização do óleo da semente no desenvolvimento de lipídios estruturados e dietéticos do tipo MLM via reação de acidólise. A extração foi realizada por Soxhlet, e o óleo da castanha foi analisado quanto aos índices de acidez, peróxido e iodo, e ambos os óleos foram caracterizados quanto aos seus perfis de ácidos graxos e composição Sn-2. O óleo da semente apresentou um rendimento de extração de 54% m/m sendo sua composição de 85% de ácidos graxos insaturados, principalmente os ácidos oleico e linoleico, enquanto o óleo do arilo funicular mostrou uma composição rica em ácidos oleico e palmítico. Para a síntese dos lipídios estruturados, foi utilizado o modelo de planejamento experimental para avaliar e modelar a incorporação de ácido cáprico (C10) nas posições Sn-1 e Sn-3 dos triglicerídeos do óleo da semente. A melhor condição experimental foi alcançada com uma razão molar de 1:9 (óleo:ácido) e carga enzimática de 10%, resultando em um grau incorporação de 35 a 37%. Análises confirmaram a preservação dos ácidos graxos insaturados de cadeia longa na posição Sn-2 dos triglicerídeos, o que por sua vez pode otimizar sua absorção e proporcionar benefícios à saúde. Com este estudo então, foi possível demonstrar o potencial econômico e científico da sapucaia, sugerindo sua viabilidade como fonte para a produção de triglicerídeos dietéticos, tanto do óleo da semente quanto do arilo funicular.

Palavras-chave: óleo de castanha de sapucaia; óleo de arilo de sapucaia; triglicerídeos dietéticos; acidólise.

ABSTRACT

The sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.) is a native plant of Brazil, and its fruits produce sapucaia seeds, which are oily nuts known to a portion of the population. Although its nuts are edible and nutritious, they are not as widely consumed or marketed as other popular nuts, such as Brazil nuts and cashews, making sapucaia a Non-Conventional Food Plant (PANC). However, these nuts have a high lipid content (51 - 64% w/w), which indicates a strong potential for oil production and commercialization. Studies on this oil already highlight its high content of unsaturated fatty acids and document some of its health benefits, such as reducing cardiovascular disease risk. Due to these characteristics, this study aimed to extract and characterize the oil from sapucaia seeds and the oil from their funicular aril, as well as to use the seed oil in the development of structured and dietary MLM-type lipids through an acidolysis reaction. The extraction was performed using the Soxhlet method, and the nut oil was analyzed for acidity, peroxide, and iodine indices, while both oils were characterized for their fatty acid profiles and Sn-2 composition. The seed oil yielded an extraction rate of 54% w/w and consisted of 85% unsaturated fatty acids, primarily oleic and linoleic acids, whereas the funicular aril oil was rich in oleic and palmitic acids. For the synthesis of structured lipids, an experimental design model was used to evaluate and model the incorporation of capric acid (C10) at the Sn-1 and Sn-3 positions of the seed oil triglycerides. The best experimental condition was achieved with a molar ratio of 1:9 (oil:acid) and an enzyme load of 10%, resulting in an incorporation degree of 35 to 37%. Analyses confirmed the preservation of long-chain unsaturated fatty acids at the Sn-2 position of the triglycerides, which can optimize absorption and provide health benefits. This study thus demonstrated the economic and scientific potential of sapucaia, suggesting its viability as a source for the production of dietary triglycerides from both the seed oil and the funicular aril.

Keywords: sapucaia nut oil; sapucaia aril oil; dietary triglycerides; acidolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturas dos derivados de ácidos graxos	16
Figura 2 – Fruto de castanheira de sapucaia	21
Figura 3 – Dados comparativos de análises centesimais sobre a castanha de sapucaia em diferentes estudos	24
Figura 4 – Dados comparativos de análises dos elementos e minerais presentes na castanha de sapucaia em diferentes estudos	25
Figura 5 – Dados comparativos dos percentuais de ácidos graxos presentes na castanha de sapucaia em diferentes estudos	26
Figura 6 – Dados comparativos dos índices calculados do óleo de castanha de sapucaia em diferentes estudos	27
Figura 7 – Fluxograma das etapas	29
Figura 8 – Projeção do plano de superfície resposta para o grau de incorporação (ID)	44
Figura 9 – Plano de superfície resposta para o grau de incorporação	45
Figura 10 – Grau de Incorporação Predito vs Grau de Incorporação Experimental	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz experimental das reações de acidólise entre o óleo de semente de sapucaia e ácido cáprico (C10)	32
Tabela 2 – Caracterização do óleo de semente de sapucaia	33
Tabela 3 – Perfil de ácidos graxos do óleo da castanha e do arilo sapucaia	35
Tabela 4 – Comparação do perfil de ácidos graxos do óleo da castanha de sapucaia com outros estudos na literatura	35
Tabela 5 – Perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 do óleo da castanha e do óleo de arilo de sapucaia	37
Tabela 6 – Resultados do grau de incorporação do ácido cáprico após reações de acidólise com o óleo de semente de sapucaia	41
Tabela 7 – Coeficientes e Significância Estatística do Modelo DCCR para o Grau de Incorporação (ID)	42
Tabela 8 – Perfil de ácidos graxos do óleo da castanha de sapucaia (Controle) e dos TAGs dietéticos sintetizados (Ensaio 7 e 8)	47
Tabela 9 – Perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 do óleo da castanha de sapucaia (Controle) e do TAG dietético sintetizado (Ensaio 7)	47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	ÓLEOS E GORDURAS	13
2.2.	ÓLEOS VEGETAIS E INDÚSTRIA	14
2.3.	SÍNTESE DE TRIACILGLICERÓIS (TAG) ESTRUTURADOS	16
2.4.	CASTANHEIRA-SAPUCAIA	18
2.4.1.	Propriedades da castanha e do óleo de sapucaia	20
3.	OBJETIVOS	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1.	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS	25
4.2.	COLETA E OBTENÇÃO DAS CASTANHAS E ARILO FUNICULAR	26
4.3.	ANÁLISE DO BIOCATALISADOR	27
4.4.	EXTRAÇÃO DOS ÓLEOS VIA SOXHLET	27
4.5.	CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO	27
4.6.	METILAÇÃO DOS ÓLEOS PARA ANÁLISE DO PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS	27
4.7.	DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS DOS ÓLEOS	28
4.8.	DETERMINAÇÃO DO PERFIL E COMPOSIÇÃO SN-2 NOS ÓLEOS	28
4.9.	SÍNTESE DE TRIGLICERÍDEOS EM BATELADA	28
4.10.	ANÁLISE DOS TAGS DIETÉTICOS SINTETIZADOS	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE SEMENTE DE SAPUCAIA	30
5.2.	PERFIS DE ÁCIDOS GRAXOS DOS ÓLEOS DA CASTANHA E DO ARILO DE SAPUCAIA	31
5.3.	CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL SN-2 DOS ÓLEOS DE SEMENTE E DO ARILO DE SAPUCAIA	34
5.4.	AVALIAÇÃO DO BIOCATALISADOR	36
5.5.	SÍNTESE DE TAGS DIETÉTICOS	36
5.5.1.	Planejamento experimental e modelo delineamento composto central rotacional (DCCR)	37
5.5.2.	Análise e discussão dos TAGs dietéticos sintetizados	42
5.6.	PRODUÇÃO E SUSTENTABILIDADE	46
6.	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.) é uma planta nativa do Brasil e que apresenta frutos semelhantes a pequenos “potes” de barro com paredes grossas e seu interior repleto de sementes (10 - 30 sementes por fruto) e por isso recebe nomes como “cumbuca-de-macaco” e “caçamba-do-mato” (De Souza *et al.*, 2014). Estas sementes dentro do fruto dão origem às castanhas de sapucaia que podem ser consumidas ou utilizadas na preparação de alimentos e, como alguns estudos já identificaram, são excelentes fontes de proteínas, nutrientes, minerais e apresentam um alto teor de lipídios (51 - 64% m/m) (Teixeira, 2018) sendo, portanto, a extração de seu óleo uma atividade com potencial de produção comercial.

Além desse potencial produtivo e nutritivo, as castanhas em geral chamam atenção para novos estudos devido a algumas propriedades benéficas à saúde que os óleos originários destas podem apresentar como a prevenção de diabetes do tipo II, câncer, doenças cardiovasculares e hipertensão, por causa da presença de compostos bioativos em sua composição como ácidos graxos essenciais e compostos fenólicos, por exemplo (Carvalho *et al.*, 2015; Demoliner *et al.*, 2018). Esses estudos trazem visibilidade sobre seu consumo e comércio para a indústria alimentícia e chamam a atenção como alimentos nutraceuticos que são alimentos ou parte de alimentos que são capazes de apresentar benefícios à saúde através da prevenção ou tratamento de doenças (Teixeira, 2018), como por exemplo através da utilização dos óleos destas sementes para a produção de triglicerídeos dietéticos, também chamados de triacilgliceróis (TAG) estruturados. Estes se originam a partir da mudança da composição ou posição dos ácidos graxos que estão ligados ao glicerol que compõem o óleo e essas mudanças resultam na alteração de propriedades físicas, químicas, mas mais importante, nas propriedades nutricionais, através da formação de substitutos de gorduras ou de lipídios funcionais de baixa caloria, o que vai de encontro com a crescente demanda por alimentos mais saudáveis e apresentando então aplicações para indústrias farmacêuticas, nutraceuticas e de alimentos (Bassan, 2017; Causevic *et al.*, 2022).

Na literatura encontram-se estudos sobre as características do óleo de sapucaia que o configuram como um potencial óleo para a produção de TAGs estruturados. Dentre essas características, vale destacar o alto teor de ácidos graxos insaturados, o excelente índice de acidez (0,31 - 1,80 mg KOH/g) e o de

peróxido (0,27 meq/g), o que indica ser um produto sem alterações químicas de hidrólise e de oxidação (Costa e Jorge, 2012; Vallilo *et al.*, 1999 *apud* Teixeira, 2018), propício para essa produção. Adicionalmente, o óleo apresenta um elevado índice de iodo (100,36 - 121,00 g I₂/100g), resultado da maior presença de ácidos graxos insaturados, devido a ligação do iodo a essas insaturações. Seu índice de saponificação (188,83 mg KOH/g) sugere a presença de ácidos graxos de baixa massa molar (Costa e Jorge, 2012; Vallilo *et al.*, 1999, *apud* Teixeira, 2018). Quanto ao perfil de ácidos graxos, os estudos indicam uma predominância do ácido linoleico (C18:2 n6), com uma concentração de 39,93% a 46,85%, seguido pelo ácido oleico (C18:1 n9) com 34,30% a 41,27%, e pelo ácido palmítico (C16:0), que representa de 10,68% a 14,49% do total (Costa e Jorge, 2012; Vallilo *et al.*, 1999, *apud* Teixeira, 2018).

Sabendo então dessas características e do potencial comercial e produtivo do óleo de sapucaia, o presente estudo objetivou a extração e caracterização físico-química do óleo de sapucaia das sementes dos frutos extraídos de árvores presentes no campus da UNESP de Araraquara. Além disso, também foi extraído e caracterizado o óleo presente no arilo funicular da semente, que até o momento é tratado como um resíduo, a fim de estudar e viabilizar um possível novo destino desse componente proveniente da extração das sementes e que não apresenta registros de estudos na literatura. Além disso, devido a maior constituição lipídica do óleo de sapucaia ser de ácidos graxos insaturados, o estudo também objetivou tornar o óleo um alimento nutracêutico através do desenvolvimento de TAGs estruturados via reação de acidólise, para a obtenção de TAGs do tipo MLM, apresentando então ácidos graxos de cadeia média (M) nas posições Sn-1 e Sn-3, e de cadeia longa (L) na posição interna através do uso de lipases comerciais. Este trabalho empregou a metodologia de planejamento de experimentos, através de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Com essa metodologia, foi possível gerar uma superfície de resposta, permitindo explorar e modelar a influência das variáveis experimentais de Razão Óleo:Ácido e a Carga Enzimática, na síntese dos triglicerídeos estruturados, otimizando futuras reações de incorporação dos ácidos graxos desejados.

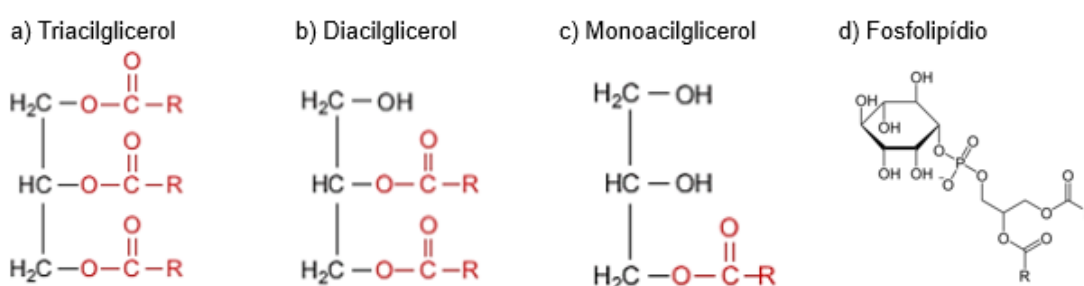
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ÓLEOS E GORDURAS

Óleos e gorduras possuem elevada importância para a alimentação humana e animal, além de apresentar usos e aplicações industriais, como por exemplo, para a produção de biodiesel. São constituídos principalmente por moléculas de triacilgliceróis (TAGs), ácidos graxos livres e pequenas quantidades de fosfolipídios (Vitor, 2017) e o que difere os óleos das gorduras é que os primeiros, devido a composição química com menor ponto de fusão, apresentam-se na forma líquida na temperatura de 25°C enquanto que as gorduras apresentam-se na forma sólida na mesma temperatura (composição com maior ponto de fusão) (Brasil, 2005)

No organismo eles apresentam duas funções principais que são o fornecimento de energia e o transporte de componentes químicos orgânicos solúveis como hormônios e ácidos graxos essenciais (Phuah *et al.*, 2022). Os ácidos graxos em óleos e gorduras podem ser encontrados na forma livre (apenas o ácido graxo) ou ligados a uma molécula glicerol, quando nesta última forma, eles podem ser chamados de derivados de ácidos graxos. Os derivados podem ser encontrados nas seguintes composições: triacilgliceróis, diacilglicerídeos, monoacilglicerídeos, ou como fosfolipídios (Bassan, 2017; Vitor, 2017). Na figura 1 abaixo, encontram-se essas estruturas dos derivados de ácidos graxos:

Figura 1 - Estruturas dos derivados de ácidos graxos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os ácidos graxos se distinguem entre si devido a variações no número de carbonos em suas cadeias, na quantidade e na localização das insaturações, além de suas posições na molécula de glicerol. Essas diferenças influenciam as propriedades físico-químicas e nutricionais dos óleos e das gorduras (Bassan, 2017). Eles podem ser classificados em três categorias: ácidos graxos de cadeia

curta (até 6 carbonos), ácidos graxos de cadeia média (de 7 a 12 carbonos) e ácidos graxos de cadeia longa (mais de 12 carbonos). Além disso, podem ser divididos em dois grupos: os ácidos graxos não essenciais (que o corpo consegue sintetizar) e os ácidos graxos essenciais (que não são produzidos pelo organismo e devem ser adquiridos por meio da dieta) (Hansen *et al.*, 2008). Na nutrição humana, os dois ácidos graxos essenciais são o ácido linoleico (C18:2), conhecido como ômega 6, e o ácido linolênico (C18:3), chamado de ômega 3. O ácido linoleico é encontrado em grande quantidade em óleos vegetais, enquanto o ácido linolênico está presente em peixes e seus óleos (Chowdhury *et al.*, 2012 *apud* Bassan, 2017).

Quanto à disposição dos ácidos graxos em relação ao glicerol na formação dos triglicerídeos (TAGs), eles se organizam nas posições denominadas Sn-1, Sn-2 e Sn-3. Essa configuração resulta em uma variedade de combinações diferentes, considerando também os diversos ácidos graxos disponíveis. Usando a classificação de S (ácidos graxos de cadeia curta), M (ácidos graxos de cadeia média) e L (ácidos graxos de cadeia longa), é possível categorizar os diferentes TAGs (Bassan, 2017). Dentre eles, destacam-se três combinações que geram triglicerídeos de baixa caloria: SLS, MLM e MMM, que se referem à sequência de tipos de ácidos graxos nas posições Sn-1, Sn-2 e Sn-3 da molécula de glicerol (Ijaz e Sanz, 2024). Esses triglicerídeos de baixa caloria, também chamados de triglicerídeos dietéticos são nutricionalmente relevantes, pois a disposição dos ácidos graxos nos TAGs determina as características nutricionais do óleo ou da gordura, além de sua biodisponibilidade para o organismo. Nessas posições, esses triglicerídeos apresentam baixo valor calórico, maior solubilidade, fácil transporte e conversão de energia, além de contribuir para o controle dos níveis de colesterol no sangue. Assim, o consumo de óleos ou gorduras contendo esses tipos de TAGs oferece benefícios à saúde de humanos e animais (Bassan, 2017; Ijaz e Sanz, 2024).

2.2. ÓLEOS VEGETAIS E INDÚSTRIA

No período entre 1993 e 2017 houve um crescimento exponencial de mais de 200% nas exportações de óleos vegetais no Brasil, refletindo a crescente procura por esse produto que foi impulsionado pela demanda global, especialmente após a diminuição do consumo de gorduras de origem animal na dieta humana e, mais

recentemente, pela sua integração na matriz energética global para a produção de biocombustíveis (Magalhães, 2018).

Mundialmente, os óleos de palma, soja e canola continuam se destacando como as principais commodities no setor de óleos vegetais. No Brasil, a soja permanece como a maior fonte de óleo vegetal, amplamente utilizada tanto para consumo humano quanto para exportação. Em 2022, o Brasil exportou aproximadamente 4 bilhões de dólares em óleo de soja, com os principais destinos sendo a Índia, Bangladesh e Irã. Só a Índia foi responsável por importações no valor de 1,58 bilhão de dólares (UN, 2023; OEC, 2023). Em 2023, o Brasil exportou cerca de 1,25 milhão de toneladas de óleo de soja, mantendo-se como um dos principais fornecedores globais (OEC, 2023). Esse processo de industrialização de oleaginosas se destaca então como uma das principais atividades do agronegócio brasileiro, dado o uso versátil desses produtos na formulação de alimentos, cosméticos e fármacos. Recentemente, o interesse governamental, empresarial e acadêmico tem se voltado para a ampliação do uso de óleos vegetais para fins energéticos, estimulando melhorias nos processos de extração e a busca por fontes alternativas deste recurso (Magalhães, 2018).

A soja é reconhecida como a principal oleaginosa do Brasil. Embora seja conhecida principalmente pela sua produção de proteína, o aumento da produtividade do grão tem resultado em uma maior quantidade de óleo como subproduto. Outras espécies não alcançam nem sequer 10% da quantidade de óleo extraída da soja (Dos Santos, 2022). Apesar disso, a produção de óleo tem acompanhado o crescimento da produção de grãos. Destacam-se na safra agrícola a soja, o milho e o caroço de algodão, com produções expressivas em milhões de toneladas. No entanto, em termos de produção de óleo, o óleo de palma ocupa o segundo lugar. Quanto ao uso, a maioria dos óleos é direcionada para indústrias alimentícias, cosméticas e farmacêuticas, com destaque para a soja, óleo de palma e óleo de caroço de algodão, que também são utilizados na produção de biocombustíveis (Dos Santos, 2022).

A busca por alternativas que reduzam o impacto da exploração de recursos fósseis tem impulsionado estudos sobre as espécies oleaginosas como potenciais biomassas industriais. O avanço das pesquisas científicas relacionadas aos óleos vegetais no Brasil pode ser atribuído ao estímulo ao uso desses óleos na produção de biodiesel, especialmente em relação às oleaginosas consideradas "potenciais",

embora isso não signifique que todos os estudos estejam focados apenas no campo de energia e combustíveis. Os benefícios de alguns óleos para a saúde humana, como para a geração de alimentos nutracêuticos, têm motivado também pesquisas agronômicas contínuas e incentivos para a busca de novas e alternativas fontes de óleo vegetal nos últimos anos (Beltrão Júnior, 2019; Magalhães, 2018).

2.3. SÍNTESE DE TRIACILGLICERÓIS (TAG) ESTRUTURADOS

A síntese de TAGs estruturados têm ganhado crescente atenção na indústria alimentícia e no campo da nutrição, principalmente devido às características funcionais e benefícios que esses produtos sintetizados podem proporcionar à saúde humana e animal. Os TAGs são compostos lipídicos formados pela esterificação de glicerol a três ácidos graxos (Figura 1). A modificação da composição e da estrutura desses lipídios pode influenciar positivamente a absorção de ácidos graxos essenciais, além de impactar a digestibilidade e oferecer ainda características sensoriais desejadas, como modificações no sabor e textura do óleo (Hong *et al.*, 2023).

Ao utilizar óleos vegetais, é possível desenvolver produtos alimentícios com perfis lipídicos específicos e de interesse. A escolha cuidadosa dos ácidos graxos a serem incorporados nas posições Sn-1 e Sn-3 do glicerol é crucial, pois essas posições influenciam diretamente a digestão e a absorção dos lipídios. Por exemplo, a inclusão de ácidos graxos de cadeia média, como o ácido cáprico (C10), pode fornecer uma fonte rápida de energia e ajudar na perda de peso (Bassan, 2017). Por outro lado, a incorporação de ácidos graxos insaturados, como o ácido oleico, pode contribuir para a redução do colesterol LDL e promover a saúde cardiovascular (Shramko *et al.*, 2020). Nesse sentido, a produção de TAGs estruturados surge como uma oportunidade valiosa para o desenvolvimento de alimentos funcionais que atendam à demanda crescente por produtos saudáveis.

A acidólise é um processo crucial na produção de TAGs estruturados, caracterizando-se pela reação entre um óleo ou gordura e um ácido graxo, com o auxílio de uma lipase. As lipases são enzimas que desempenham um papel importante na catalisação da hidrólise dos lipídios, facilitando a quebra das ligações éster que conectam os ácidos graxos e glicerol. Essas enzimas são amplamente utilizadas na indústria alimentícia por sua especificidade e eficácia, possibilitando

reações que preservam as qualidades sensoriais e nutricionais dos produtos (Reyes-Reyes; Barranco; Sandoval, 2022).

Durante a acidólise, a lipase catalisa a liberação dos ácidos graxos ligados ao glicerol e promove a re-esterificação, ou seja, a incorporação de novos ácidos graxos do meio a estrutura de glicerol. Esse processo não apenas altera a estrutura dos TAGs, mas também potencializa suas propriedades funcionais, como a solubilidade e a resistência à oxidação. Geralmente, na síntese de TAGs estruturados, são utilizadas lipases de origem microbiana e comerciais, que se destacam por sua eficácia na reação, devido à capacidade de atuar em condições moderadas de temperatura e pH, o que ajuda a preservar as características dos ácidos graxos insaturados presentes no óleo original (Zhang *et al.*, 2022). Além disso, nesse tipo de reação, costuma-se utilizar lipases Sn-1,3-regio específicas que possibilitam a síntese de compostos que não podem ser obtidos por métodos químicos, uma vez que catalisadores químicos não são específicos e atuam de forma aleatória na síntese. Essa regioespecificidade permite então a produção de TAGs estruturados sem alterar o perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 do óleo original para caso esse perfil seja de interesse para a síntese do produto final (Zhang *et al.*, 2022). Como por exemplo, há pesquisas que indicam que quando ácidos graxos insaturados estão na posição Sn-2 nos TAGs, eles podem ser absorvidos mais eficientemente pelo intestino, o que contribui para um melhor aproveitamento pelo corpo e pode beneficiar a saúde cardiovascular, devido aos efeitos positivos desses ácidos na redução do colesterol e da inflamação (Alves *et al.*, 2024), sendo assim, selecionar óleos que possuam ácidos graxos insaturados de interesse na posição Sn-2 (como o ômega-3 ou ômega-6), é interessante para a síntese de TAGs dietéticos uma vez que esse perfil Sn-2 será mantido na síntese via acidólise.

Dessa forma, os TAGs estruturados produzidos pela acidólise emergem como uma solução inovadora e sustentável para o desenvolvimento de alimentos funcionais que não apenas atendem às demandas do consumidor por saúde, mas também possuem potencial para contribuir na redução de doenças crônicas, como as cardiovasculares (Bassan, 2017).

2.4. CASTANHEIRA-SAPUCAIA

Lecythis pisonis Cambess. popularmente conhecida como sapucaia, caçamba-do-mato ou castanheira-sapucaia é uma árvore pertencente à família Lecythidaceae e ao gênero *Lecythis*. Ela ocorre naturalmente em abundância na região da Amazônia brasileira, além de ser registrada em países como Peru, Guiana, Suriname e Venezuela. No Brasil, está presente em vários estados até a região sudeste (Itto, 2018). Esta árvore pode atingir alturas entre 30 e 50 metros e sua frutificação se inicia por volta dos 8 a 10 anos de idade, produzindo as conhecidas sementes ou castanhas de sapucaia, que podem ser colhidas do inverno até o fim da primavera (Leão et al., 2016).

Os frutos de sapucaia (Figura 2) podem apresentar até 5 0cm de diâmetro e pesar até 2 kg e ao ficarem maduros passam por um processo de liberação do opérculo (sua “tampa”) e deixam as sementes expostas e estas vão se soltando naturalmente e caindo em direção ao chão, mas também ficam sujeitas ao consumo pela fauna local, principalmente por macacos e morcegos (Teixeira, 2018). Suas sementes apresentam uma massa média de 5,5 g por fruto e podem ser encontradas de 30-40 unidades que apresentam um tamanho variando de 4-6 cm conectadas a um arilo funicular de coloração amarela. Devido ao formato de “cumbuca”, que na realidade é o pixídio aberto, e a presença de sua “tampa”, que é o opérculo, a sapucaia também é conhecida como cumbuca de macaco (Magalhães, 2018).

Figura 2 - Fruto de castanheira de sapucaia.



Fonte: Teixeira (2018).

Após o período de frutificação, mesmo após a queda de todas as sementes, é comum que alguns pixídios continuem presos às árvores por muito tempo, mas eventualmente e próximos ao período de nova frutificação, acabam se desprendendo (Teixeira, 2018). Esses frutos são os maiores da família Lecythidaceae e a fauna contribui principalmente para a propagação dessa espécie, pois como não conseguem com facilidade quebrar a semente, acabam consumindo apenas a parte basal carnuda do fruto, o arilo, espalhando então as sementes pelos arredores o que ocasiona a formação espontânea de mini florestas de sapucaia (Teixeira, 2018). Uma castanheira é capaz de produzir anualmente até 80 kg de sementes, cujas castanhas possuem coloração amarelada, são macias e comestíveis, apresentando boas características nutricionais e sabor agradável. Além disso, essas castanhas são similares e podem ser alternativas às conhecidas castanhas do Brasil e castanhas do Pará (Teixeira, 2018).

A castanheira apresenta importância econômica e ambiental em suas regiões de abundância. Ela pode ser utilizada para sombreamento em plantações de cacau e como uma árvore de reflorestamento devido à sua fácil propagação. Além disso, suas folhas são conhecidas por suas propriedades fitoterápicas, sendo tradicionalmente utilizadas para aliviar a dor e como antioxidantes. As propriedades farmacológicas investigadas incluem efeitos antinociceptivos, que ajudam na redução dos estímulos de dor, além de propriedades antioxidantes que combatem os radicais livres (Martins, 2016; Demoliner et al., 2019). A produção de suas castanhas é igualmente significativa, pois além de serem comestíveis, podem ser utilizadas para a produção de óleo, dada sua composição rica em lipídios.

Embora suas castanhas sejam comestíveis e nutritivas, elas não são amplamente consumidas ou comercializadas como outras castanhas mais populares, como a castanha-do-pará e a castanha de caju. Por esse motivo, a sapucaia pode ser considerada uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC), destacando-se pelo seu potencial nutricional subutilizado. O aproveitamento de PANCs, como a sapucaia, tem ganhado destaque no contexto da segurança alimentar e das mudanças climáticas, uma vez que o cultivo e consumo de novas espécies vegetais ricas em nutrientes são essenciais para diversificar a dieta e promover uma agricultura mais sustentável (Machado et al., 2021). Em cenários de crescente pressão sobre os sistemas agrícolas tradicionais devido às mudanças climáticas, a introdução de espécies nativas e adaptadas, como a sapucaia, pode

contribuir para a resiliência alimentar e a preservação da biodiversidade. Estudos recentes reforçam que as PANCs têm um papel crucial na adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, oferecendo alternativas alimentares e econômicas mais resistentes às condições adversas (Machado *et al.*, 2021).

Sendo assim, a castanheira de sapucaia oferece diversas utilidades: sua madeira é utilizada na fabricação de instrumentos e construção civil; suas folhas apresentam propriedades medicinais que estão sendo estudadas; seus frutos podem ser utilizados como ornamentos; e suas sementes além de serem comestíveis e nutritivas, podem ser utilizadas para a produção de óleo devido ao seu alto teor de lipídios (Magalhães, 2018). Na literatura não foram encontradas aplicações para o arilo funicular que vem acoplado às sementes, sendo assim, convém estudos para verificar a possibilidade de utilização desse componente do fruto.

2.4.1. Propriedades da castanha e do óleo de sapucaia

Como mencionado, a castanha ou semente de sapucaia é uma excelente fonte nutritiva podendo ser utilizada para consumo ou, devido ao seu alto teor de lipídios, com o propósito de extração de seu óleo (Teixeira, 2018). Também é uma castanha que apresenta um alto teor de proteínas; entretanto, as porcentagens referentes à análise centesimal da composição das castanhas podem variar devido às diferentes condições de clima e solo em que foram cultivadas, além de variações genéticas. Contudo, pode-se afirmar que o teor de proteínas varia em torno de 20% enquanto que seu conteúdo lipídico fica de 50-65% (Demoliner *et al.*, 2019). Abaixo seguem dados comparativos utilizados no estudo de Teixeira (2018) das análises centesimais da castanha de sapucaia (Figura 3):

Figura 3 - Dados comparativos de análises centesimais sobre a castanha de sapucaia em diferentes estudos.

Característica (%)	Vallilo <i>et al.</i> (1998)	Denadai <i>et al.</i> (2007)	Souza <i>et al.</i> (2008)	Carvalho <i>et al.</i> (2008)	Carvalho <i>et al.</i> (2012)	Demolier <i>et al.</i> (2018)
Umidade	4,92	5,04 ± 0,03 ^a	-	3,2 ± 0,16 ^a	10,20 ± 0,68 ^a	4,15-9,15
Cinzas	3,91	3,80 ± 0,01 ^a	3,43 ± 11,16 ^{**}	3,1 ± 0,25 ^a	3,17 ± 0,50 ^a	3,34-3,53
Lipídios	63,03	60,61 ± 0,33 ^a	65,99 ± 4,59 ^{**}	64,0 ± 2,35 ^a	54,80 ± 4,15 ^a	47,99-60,76
Proteínas	19,86	20,47 ± 0,38 ^a	19,62 ± 8,77 ^{**}	18,5 ± 0,97 ^a	26,82 ± 2,60 ^a	15,80-19,49
Fibras totais	-	5,67 ^a	-	7,0 ± 0,77 ^a	-	16,51-22,63 ^b
Carboidratos totais	8,28	-	-	11,1 ± 2,13 ^a	5,01	4,90-6,50
Calorias	684,00	645,05 ± 2,07 ^a	736,87 ± 3,35 ^{**}	-	620,52	414,31-616,57

(kcal 100 g⁻¹; ^a calculado por diferença; ^b fibras dietéticas totais; ^amédia ± desvio-padrão; ^{**}média ± coeficiente de variação (%).

Fonte: Teixeira (2018).

A castanha ainda é considerada uma excelente fonte de aminoácidos essenciais para o consumo humano, apresentando em sua composição principalmente leucina, fenilalanina, metionina e lisina (Demoliner *et al.*, 2019); e é também considerada uma excelente fonte de minerais, característica comum às castanhas que são ricas em minerais e são componentes importantes ao organismo atuando como cofatores, na regulação de pH, na transmissão de impulsos nervosos, como componentes estruturais e na contração muscular (Teixeira, 2018). A Figura 4 apresenta o comparativo de concentrações desses minerais em diferentes estudos que foram utilizados por Teixeira (2018), que ressalta esse potencial nutritivo da castanha de sapucaia na dieta:

Figura 4 - Dados comparativos de análises dos elementos e minerais presentes na castanha de sapucaia em diferentes estudos.

Elemento*	A	B	C	D	E	F
P	-	525,0-623,0	875	549,7-871,4	941,7	-
Ca	111	81,0-97,0	172	130,1-251,3	182,1	106,3-124,9
Mg	155	124,0-168,0	279	235,8-373,6	343,4	113,8-174,0
K	464	-	890	551,3-695,9	-	-
S	-	-	-	339,1-412,4	-	-
Mn	9,1	0,41-0,12	8,07	4,2-8,0	4,8	0,03-0,04
Zn	-	0,33-0,38	4,04	3,2-4,9	4,4	0,01-0,02
Cu	-	0,29-0,33	3,28	0,82-1,15	2,3	0,70-1,69
B	645	-	-	0,63-0,93	-	-
Ba	-	-	-	3,3-24,0	-	-
Na	-	-	0,53	-	-	0,22-0,53
Cd	-	0,03	-	-	nd	≤ 0,03
Cr	-	-	-	-	nd	0,03-0,04
Ni	-	-	-	-	0,5	0,04-0,38
Pb	0,09	0,33-0,38	-	-	0,4	0,04-0,05
Cl	-	-	-	<0,21	-	-
Fe	1,42	-	326,5	2,1-3,6	7,0	-
Al	0,49	-	-	0,31-0,77	6,9	0,16-0,45
As	0,03	0,11-0,12	-	-	nd	-
Mo	-	-	-	-	nd	nd
Se	0,03	-	-	-	-	0,03-0,05
Sn	0,01	6,91-7,70	-	-	-	0,75-1,75
Si	-	-	-	nd	-	-
Sr	-	-	-	1,2-6,9	-	-

nd: não detectado; *resultado em mg.100 g⁻¹. A = Vallilo *et al.* (1998); B = Vallilo *et al.* (1999); C = Denadai *et al.* (2007); D = Naozuka *et al.* (2011); E = Carvalho *et al.* (2012c); F = Demoliner *et al.* (2018).

Fonte: Teixeira (2018).

As castanhas ainda são conhecidas também por serem importantes fontes de ácidos graxos ao organismo, e no que diz respeito à composição do óleo da castanha de sapucaia, de acordo com a Figura 5 tem-se que os ácidos graxos predominantes são o ácido oleico (C18:1), de 35-40% e o ácido linoleico (C18:2), de 40-45%. Em sequência tem-se os ácidos palmítico (C16:0) com 10% e o esteárico (C16:1) com cerca de 5%. Portanto tem-se a predominância de ácidos mono e poliinsaturados no óleo extraído da semente (Demoliner *et al.*, 2019) e por sua vez essa característica contribui na saúde para a redução do colesterol sérico devido a

menores frações de lipoproteínas LDL (*low density lipoprotein*) e VLDL (*very low density lipoprotein*), sendo assim o consumo da castanha ou de seu óleo representa benefícios à saúde de seus consumidores (Bassan, 2017; Demoliner *et al.*, 2019).

Figura 5 - Dados comparativos dos percentuais de ácidos graxos presentes na castanha de sapucaia em diferentes estudos.

Ácido graxo (%)	Vallilo <i>et al.</i> (1999)	Costa & Jorge (2012)	Carvalho <i>et al.</i> (2012c)
Palmitico (C16:0)	10,68 ± 1,73	14,49 ± 0,24	11,29
Palmitoleico (C16:1)	-	0,21 ± 0,01	0,34
Estearico (C18:0)	5,63 ± 2,34	5,84 ± 0,04	3,77
Oleico (C18:1 n9)	34,30 ± 8,35	38,82 ± 0,08	41,37
Linoleico (C18:2 n6)	46,85 ± 6,29	39,93 ± 0,11	42,86
Linolênico (C18:3 n3)	-	0,24 ± 0,01	0,24
Araquídico (C20:0)	-	0,22 ± 0,01	0,13
Beênico (C22:0)	-	tr	-
Outros	-	0,24 ± 0,01	-
Saturados	16,30 ± 2,94	20,76	15,19
Monoinsaturados	-	39,07	41,71
Poliinsaturados	-	40,18	43,10
Insaturados totais	83,65 ± 3,01	79,20	84,81

tr: percentagem < 0,1

Fonte: Teixeira (2018).

O óleo extraído da semente de sapucaia demonstra boas propriedades em relação aos índices do padrão de identidade e qualidade (PIQ). Esses índices incluem a acidez, que mede a quantidade de ácidos graxos livres presentes no óleo, e o índice de peróxido, que indica a presença de compostos resultantes da oxidação. Valores baixos nessas medidas sugerem que o óleo é fresco e não sofreu processos de hidrólise ou oxidação, indicando uma boa conservação (Instituto, 2008; Teixeira, 2018). A figura abaixo (Figura 6) mostra os índices obtidos do óleo extraído da semente de sapucaia em diferentes estudos:

Figura 6 - Dados comparativos dos índices calculados do óleo de castanha de sapucaia em diferentes estudos.

Característica	Vallilo <i>et al.</i> (1999)	Costa & Jorge (2012)
Acidez (mg KOH/g)	0,52-1,80	0,31 ± 0,01
Índice de peróxido (meq/kg)	-	0,27 ± 0,02
Índice de iodo (g I ₂ /100 g)	104-121	100,36 ± 0,25
Índice de refração (40 °C)	1,461-1,465	1,4643 ± 0,0002
Índice de saponificação (mg KOH/g)	-	188,83 ± 0,38
Matéria insaponificável (%)	-	0,32 ± 0,01
Estabilidade oxidativa (horas)*	-	24,89 ± 0,24

*análise no Rancimat a 100 °C

Fonte: Teixeira (2018).

Como mencionado anteriormente, os baixos índices de acidez e peróxido são indicativos de boa qualidade para o óleo de sapucaia, segundo os parâmetros de Índices PIQ. Esses índices são cruciais para garantir a estabilidade e a segurança do óleo para o consumo. Além disso, o índice de iodo é outro parâmetro relevante na avaliação da qualidade de óleos vegetais, pois reflete a presença de ácidos graxos insaturados em sua composição (Cordeiro *et al.*, 2020; Tesconi *et al.*, 2021). No caso do óleo de sapucaia, espera-se um valor elevado de índice de iodo, confirmando a predominância de ácidos graxos insaturados, como o ácido oleico e o ácido linoleico, conhecidos por seus potenciais benefícios à saúde. Esses atributos não só evidenciam a qualidade do óleo, mas também indicam sua viabilidade para uso em dietas saudáveis, devido ao papel dos ácidos graxos insaturados na redução do risco de doenças cardiovasculares e outros problemas de saúde relacionados ao consumo de gorduras (Tesconi *et al.*, 2021).

No entanto, é importante destacar que altos valores de índice de iodo também sugerem uma maior suscetibilidade do óleo à oxidação. Por isso, é necessário armazená-lo corretamente para evitar sua deterioração (Teixeira, 2018).

No que diz respeito à análise sobre o índice de saponificação, que mensura a composição de ácidos graxos de baixa massa molecular no óleo (Instituto, 2008), o

óleo de sapucaia apresenta valores altos e semelhantes aos de óleos provenientes de outras origens vegetais como soja e girassol (Teixeira, 2018).

Por fim, estudos indicam que o óleo de sapucaia apresenta elevada estabilidade contra a oxidação a temperatura de 100°C, sendo seu valor superior à 24h, que por sua vez é um indicativo que o óleo pode ser utilizado em processos ou procedimentos que trabalham com altas temperaturas (Costa e Jorge, 2012).

Sendo assim, o óleo extraído da castanha de sapucaia, além de demonstrar bons índices de qualidade, é adequado para uso em processos industriais, incluindo a produção de alimentos. Ao considerar a castanha como um todo, levando em conta seu potencial nutritivo, ela se revela uma opção interessante e alternativa para a indústria de alimentos.

3. OBJETIVOS

GERAL: Extrair e analisar o óleo obtido da semente de sapucaia e do arilo funicular, além do desenvolvimento de lipídios estruturados a partir do óleo extraído da semente.

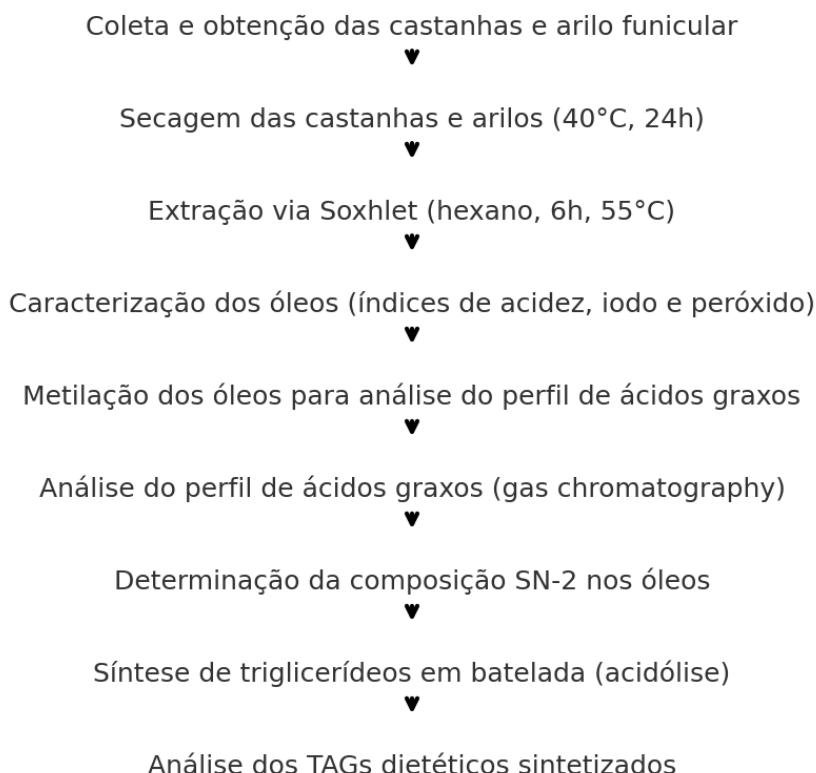
ESPECÍFICOS:

- Avaliar o óleo da semente de sapucaia em relação aos índices de acidez, peróxido, saponificação e iodo;
- Determinar o perfil de ácidos graxos dos óleos extraídos tanto da semente de sapucaia quanto do arilo funicular;
- Desenvolver lipídios estruturados utilizando o óleo da semente de sapucaia por meio de reações de acidólise, aplicando a metodologia de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR);
- Propor aplicação para o arilo funicular, com base na análise de seu perfil de ácidos graxos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS

Para auxiliar na compreensão das etapas durante o desenvolvimento deste estudo, elaborou-se o fluxograma abaixo como forma de resumir as atividades executadas em sequência e de acordo com a metodologia deste estudo:

Figura 7 - Fluxograma das etapas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2. COLETA E OBTENÇÃO DAS CASTANHAS E ARILO FUNICULAR

Os frutos de sapucaia foram coletados das cinco árvores presentes no campus da UNESP de Araraquara que possuem as seguintes coordenadas em latitude e longitude: -21.8140335, -48.1988253; -21.8158796, -48.2013908; -21.8159739, -48.2012077; -21.8158955, -48.2012782; -21.8158510, -48.2011853; e Cadastro SisGen nº AE0AAAE. Após a abertura dos frutos, as sementes e o arilo foram recolhidos e levados para uma estufa com circulação de ar à 40°C para secagem por 24 horas. Após esse tempo, os arilos foram armazenados, e as cascas das sementes foram removidas com o auxílio de um martelo. As castanhas foram levadas novamente à estufa a 40°C para secagem por mais 24 horas. Posteriormente, as castanhas foram trituradas em liquidificador e armazenadas em pote hermético à temperatura ambiente. Os arilos que foram separados, também foram triturados em liquidificador e armazenados em pote hermético à temperatura ambiente.

4.3. ANÁLISE DO BIOCATALISADOR

Para a avaliação da umidade do biocatalisador, uma amostra de 100 mg da lipase Lipozyme RM IM foi pesada e seca em estufa a 105°C até o peso constante. O teor de umidade foi calculado pela diferença de massa antes e depois da secagem. Já para a atividade hidrolítica e de esterificação, foram considerados os valores obtidos pelos estudos de Remonatto *et al.* (2023) e Bassan *et al.* (2018) que utilizaram a mesma enzima deste estudo em seus trabalhos.

4.4. EXTRAÇÃO DOS ÓLEOS VIA SOXHLET

A extração dos óleos de castanha e do arilo funicular de sapucaia foi realizada através do aparelho Soxhlet, utilizando hexano por 6 horas a 55°C, de acordo com o método da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC) 2003.06 (Latimer, 2023).

4.5. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO

O óleo extraído das sementes de sapucaia foi caracterizado conforme os métodos da *American Oil Chemists' Society* (AOCS) para os índices de acidez (AOCS, 2012a), iodo (AOCS, 2012b) e peróxido (AOCS, 2012c).

4.6. METILAÇÃO DOS ÓLEOS PARA ANÁLISE DO PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS.

Aproximadamente 50 mg da amostra foram transferidos para um vial de 20 mL, aos quais foram adicionados 2 mL de solução metanólica de hidróxido de sódio (0,2 M). A mistura foi aquecida a 80°C por 15 minutos, sob agitação. Em seguida, foram adicionados 2 mL de solução metanólica de ácido sulfúrico (1,0 M), com novo aquecimento a 80°C por mais 15 minutos. Após resfriamento, foram adicionados 1 mL de solução aquosa saturada de cloreto de sódio e 2 mL de hexano para separar as fases. A fase superior foi recolhida e o hexano foi evaporado sob fluxo de nitrogênio, obtendo-se a amostra para análise dos ácidos graxos.

4.7. DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS DOS ÓLEOS

A composição dos ácidos graxos dos óleos foi determinada seguindo a metodologia adaptada da norma ET ISO 5508:2012 (ISO, 2012), que requer a reação de metilação descrita no item 4.6.

4.8. DETERMINAÇÃO DO PERFIL E COMPOSIÇÃO SN-2 NOS ÓLEOS

A análise da composição de ácidos graxos na posição Sn-2 dos triglicerídeos foi realizada por hidrólise enzimática com lipase de pâncreas de porco, adaptada do método de Caballero *et al.* (2014). Em um tubo de centrífuga, 100 mg de lipase de pâncreas foram combinados com 1 mL de tampão Tris (pH 8,0), 0,250 mL de sal biliar, 0,1 mL de cloreto de cálcio e 100 mg do triglicerídeo. A reação ocorreu em banho-maria a 40°C por 30 minutos, sendo interrompida com a adição de 1 mL de ácido clorídrico (6M) e 1 mL de éter. Após centrifugação (5000 rpm por 10 minutos), a fase superior foi separada e aplicada em uma placa (20 cm x 20 cm) de sílica-gel para cromatografia em camada delgada (CCD) e eluída com uma mistura de hexano, éter e ácido acético (70/30/1 v/v/v). Após a eluição, a placa foi visualizada com a aplicação de uma solução alcoólica do corante 2,7 diclorofluoresceína (0,2%) sob luz UV a 366 nm. A faixa do monoacilglicerol Sn-2 foi raspada e o glicerídeo extraído éter etílico. A fase líquida foi então recuperada e transferida em um vial que foi colocado em repouso em capela para evaporação do éter etílico. Após, o óleo presente no vial foi então metilado (item 4.6) e analisado por cromatografia gasosa (item 4.7) para determinação da composição de ácidos graxos.

4.9. SÍNTESE DE TRIGLICERÍDEOS EM BATELADA

As reações de acidólise foram conduzidas em um reator de vidro tipo becker encamisado (diâmetro interno de 4,5 cm e altura interna de 9 cm) em modo batelada através do processo de acidólise (troca de radicais acil entre um éster e um ácido). Variou-se os parâmetros de razão molar e carga enzimática da lipase comercial Lipozyme RM IM (lipase de *Rhizomucor miehei*) sn-1-3 específica na reação (em % calculada em massa e em relação à massa do óleo) conforme o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2³, com três pontos centrais, utilizando o

software Protimiza (Tabela 1). A temperatura foi mantida a 45°C e o tempo de reação a 24 horas. O resultado foi avaliado em função do grau de incorporação (ID em %) do ácido cáprico nos triglicerídeos, que foi determinado a partir da análise perfil de ácidos graxos (seção 4.7) após a reação.

Tabela 1 - Matriz experimental das reações de acidólise entre o óleo de semente de sapucaia e ácido cáprico (C10).

Ensaio (x1,x2)	x1 (RM, Razão Molar Óleo:Ácido)	x2 (E, % carga enzimática)
1 (-1,-1)	1:3	5
2 (-1,-1)	1:3	5
3 (+1,-1)	1:9	5
4 (+1,-1)	1:9	5
5 (-1,+1)	1:3	10
6 (-1,+1)	1:3	10
7 (+1,+1)	1:9	10
8 (+1,+1)	1:9	10
9 (0,0)	1:6	7,5
10 (0,0)	1:6	7,5
11 (0,0)	1:6	7,5

Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

O grau de incorporação (ID em %) foi calculado através da seguinte Equação 1:

$$ID (\%) = (MFA/MT) * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde MFA é o número de mols de ácido cáprico (C10), e MT é o número total de mols de ácidos graxos no triglicerídeo. O cálculo de MFA e MT foi feito a partir da quantificação do perfil de ácidos graxos.

4.10. ANÁLISE DOS TAGS DIETÉTICOS SINTETIZADOS

Conforme a metodologia de Bassan (2017), 1 g da amostra foi extraído após 24 horas de reação. Em seguida, foram adicionados 30 mL de hexano e 10 mL de solução hidroalcoólica (30% etanol) de hidróxido de potássio (0,8 M). A mistura foi agitada e deixada em repouso para a separação das fases. A fase orgânica (superior) foi coletada e extraída novamente com 10 mL de hexano. O solvente foi evaporado em rotaevaporador a 40°C, e o triglicerídeo foi armazenado a 6°C para posterior metilação, análise do perfil de ácidos graxos (item 4.7) e determinação do perfil Sn-2 (item 4.8).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE SEMENTE DE SAPUCAIA

Inicialmente realizou-se a caracterização do óleo extraído da semente de sapucaia e obteve-se os seguintes resultados nas análises utilizando-se as metodologias da AOCS (Tabela 2):

Tabela 2 - Caracterização do óleo de semente de sapucaia.

Análise	Resultado
Índice de acidez (mg KOH/g)	0,68 ± 0,05
Índice de iodo (g I ₂ /100 g)	107,35
Índice de peróxido (mEq/kg)	0,77 ± 0,03
Rendimento extração (%)*	54,12 ± 2,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2024). *Extração com hexano via soxhlet.

Em relação aos resultados, o índice de acidez de 0,68 mg KOH/g do óleo de sapucaia indica que ele é relativamente fresco e contém uma baixa quantidade de ácidos graxos livres. O índice de iodo, de 107,35 g I₂/100 g, reflete a predominância de ácidos graxos insaturados em sua composição. O índice de peróxido de 0,77 mEq/kg sugere que o óleo está bem conservado, com um baixo grau de oxidação. Além disso, o rendimento de extração de 54,12% está dentro do intervalo esperado, conforme a literatura, que aponta entre 50% e 65% de conteúdo lipídico (Demoliner *et al.*, 2019). De maneira geral, os dados da caracterização indicam que o óleo

extraído da semente de sapucaia possui qualidade satisfatória, apresentando índices de acidez e peróxido abaixo dos limites máximos estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que são de 4,0 mg KOH/g e 15 mEq/kg, respectivamente (ANVISA, 2021). O considerável rendimento de extração, acima de 50%, também reforça o potencial industrial da castanha para produção de óleo.

Comparando os resultados com a literatura, observa-se que os valores obtidos estão em conformidade com o esperado para o óleo de sapucaia. No estudo de Magalhães (2018), o índice de acidez do óleo extraído variou de 0,18 a 1,80 mg KOH/g, dependendo do método de extração; no estudo de Vallilo *et al.* (1999) *apud* Teixeira (2018), esse índice variou entre 0,52 e 1,80 mg KOH/g. Já o índice de peróxido, de acordo com Demoliner *et al.* (2019), oscilou entre 1,47 e 2,52 mEq/kg, dependendo da região de cultivo; no estudo de Costa e Jorge (2012), foi obtido um valor de 0,27 mEq/kg, mostrando que o valor observado no presente estudo está de acordo com a variação esperada para esse índice, influenciada pelas condições de cultivo da castanheira. O índice de iodo obtido, por sua vez, está dentro da faixa observada no estudo de Vallilo *et al.* (1999) *apud* Teixeira (2018), que variou de 104 a 121 g I₂/100 g, e próximo ao valor registrado por Costa e Jorge (2012). Quanto ao rendimento de extração, o valor obtido é semelhante ao reportado por Teixeira (2018), que foi de 49,5%, utilizando o mesmo método de extração via Soxhlet com hexano.

Portanto, os resultados estão de acordo com a literatura, e o óleo apresenta qualidade satisfatória por manter índices de acidez e peróxido dentro dos limites estabelecidos pela ANVISA.

5.2. PERFIS DE ÁCIDOS GRAXOS DOS ÓLEOS DA CASTANHA E DO ARILO DE SAPUCAIA

Após a obtenção do óleo de sapucaia e do óleo de seu arilo, determinou-se o perfil de ácidos graxos para cada um dos óleos e os resultados podem ser observados na Tabela 3 abaixo para o óleo da castanha e do arilo de sapucaia respectivamente e em seguida, na Tabela 4, foi feito um comparativo do perfil obtido do óleo de castanha de sapucaia neste estudo em comparação com os perfis avaliados na literatura.

Tabela 3 - Perfil de ácidos graxos do óleo da castanha e do arilo sapucaia.

Ácido graxo	Composição (%)	
	Óleo da Castanha	Óleo do Arilo
C16	8,12	31,55
C16:1	-	1,47
C18	5,97	6,91
C18:1	45,84	48,44
C18:2	39,22	9,75
C18:3	-	0,55
Outros	0,85	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 4 - Comparação do perfil de ácidos graxos do óleo da castanha de sapucaia com outros estudos na literatura.

Ácido graxo	Composição (%)			
	Vallilo <i>et al.</i> (1999) <i>apud</i> Teixeira (2018)	Costa e Jorge (2012)	Carvalho <i>et al.</i> (2012)	Neste estudo
C16	10,68	14,49	11,29	8,12
C18	5,63	5,84	3,77	5,97
C18:1	34,30	38,82	41,37	45,84
C18:2	46,85	39,93	42,86	39,22
Outros	2,54	0,92	0,71	0,85

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise dos perfis de ácidos graxos revelou composições distintas entre os óleos, o que pode resultar em diferentes propriedades nutricionais e funcionais. No caso do óleo da semente de sapucaia, os dados mostram uma predominância de ácidos graxos insaturados (85,06%), com o ácido oleico (C18:1) sendo o mais abundante, representando 45,84% do total, seguido pelo ácido linoleico (C18:2) com 39,22%. Esse perfil é consistente com estudos anteriores, como demonstrado na Tabela 4 com os perfis obtidos nos estudos de Vallilo *et al.* (1999) *apud* Teixeira (2018), Costa e Jorge (2012), e Carvalho *et al.* (2012), que também observaram

altas concentrações de ácidos graxos insaturados (entre 79,25% e 83,65%), com destaque para o ácido linoleico. As pequenas variações nos percentuais podem ser atribuídas às diferentes condições de cultivo e métodos de extração, mas os valores observados neste estudo seguem o padrão descrito na literatura, especialmente pela baixa proporção de ácidos graxos saturados (14,09%) e a alta presença de ácidos graxos essenciais, como o ácido linoleico (Teixeira, 2018). Esse perfil sugere que o óleo de semente de sapucaia é benéfico para a saúde, devido ao baixo teor de ácidos graxos saturados e à elevada concentração de ácidos graxos insaturados. Os ácidos graxos insaturados são considerados mais saudáveis, pois são mais facilmente metabolizados e não aumentam os níveis de colesterol LDL. Além disso, o ácido oleico possui propriedades anti-inflamatórias, sendo assim de interesse ao consumo humano (Bassan, 2017).

Por outro lado, o perfil de ácidos graxos do óleo do arilo da semente de sapucaia não possui comparativos na literatura, tornando este estudo pioneiro na exploração desse óleo. Como pode ser observado na Tabela 3, os ácidos graxos saturados (C16 e C18) compõem 38,46% do total, enquanto os insaturados (C16:1, C18:1, C18:2 e C18:3) representam 60,21%. O ácido oleico (C18:1) é o mais prevalente, com 48,44%, seguido pelo ácido palmítico (C16) com 31,55%. Essa composição difere do óleo da semente de sapucaia, com a única semelhança significativa sendo o teor de ácido oleico no arilo (48,44%) em comparação com o da semente (45,84%). No entanto, há diferenças marcantes, como o menor teor de ácido linoleico no arilo (9,75%) em relação ao óleo da semente (39,22%) e o maior teor de ácidos graxos saturados no arilo (38,46%) em comparação ao óleo da semente (14,1%). O alto teor de ácido oleico no óleo do arilo sugere que ele também pode oferecer benefícios anti-inflamatórios e contribuir para a regulação do colesterol (Bassan, 2017; Moreno *et al.*, 2023).

A falta de estudos sobre o perfil de ácidos graxos do óleo do arilo reforça a necessidade de mais pesquisas para explorar suas possíveis aplicações. O maior teor de ácidos graxos saturados, por exemplo, pode ser interessante em aplicações que exigem maior estabilidade oxidativa, o que pode ser útil nas indústrias cosmética e de alimentos processados (Parmar *et al.*, 2022).

Portanto, enquanto o óleo de semente de sapucaia confirma as tendências já observadas na literatura quanto à sua composição e benefícios, o óleo do arilo se apresenta como uma nova possibilidade, cuja caracterização inicial abre portas para

estudos mais detalhados que possam validar suas propriedades nutricionais e funcionais.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL SN-2 DOS ÓLEOS DE SEMENTE E DO ARILO DE SAPUCAIA

A caracterização de Sn-2 é uma técnica analítica que possibilita a identificação e quantificação dos ácidos graxos na posição Sn-2 dos triglicerídeos presentes em óleos ou gorduras. Este método é crucial, pois fornece dados detalhados sobre a composição química, permitindo avaliar a qualidade da matéria-prima e identificar potenciais impactos nutricionais e funcionais do óleo, incluindo sua digestibilidade e absorção (Lopes *et al.*, 2023). Essas informações são valiosas para a produção de triglicerídeos dietéticos, que são projetados para serem mais facilmente absorvidos pelo organismo. Esse processo envolve a seleção de óleos e gorduras adequados, seguido por sua modificação através de uma reação de acidólise para gerar triglicerídeos dietéticos dos tipos SLS, MLM e/ou MMM (Bassan, 2017). Com isso, após a extração dos óleos da semente e do arilo de sapucaia, procedeu-se à caracterização dos ácidos graxos na posição Sn-2 dos TAGs, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5, para o óleo da semente e do arilo de sapucaia:

Tabela 5 - Perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 do óleo da castanha e do óleo de arilo de sapucaia.

Ácido graxo	Composição Sn-2 (%)	
	Óleo da Castanha	Óleo do Arilo
C16	2,01	1,51
C16:1	-	0,96
C18	1,13	0,50
C18:1	57,09	81,53
C18:2	39,05	15,01
C18:3	-	0,49
Outros	0,72	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise dos perfis Sn-2 dos óleos de semente e arilo de sapucaia revela uma expressiva predominância de ácidos graxos monoinsaturados na posição Sn-2 dos triglicerídeos. O ácido oleico (C18:1) é o mais prevalente em ambos os óleos, correspondendo a 57,09% no óleo de semente de sapucaia e impressionantes 81,53% no óleo do arilo. Em seguida, o ácido linoleico (C18:2) também se destaca, representando 39,05% no óleo da semente e 15,01% no óleo do arilo. Essa elevada concentração de ácidos graxos insaturados de cadeia longa (L), que ultrapassa 96% quando considerados em conjunto (mono e poliinsaturados), sugere um grande potencial para aplicações nutricionais e funcionais. Esses óleos mostram-se promissores na síntese de triglicerídeos dietéticos do tipo SLS ou MLM, otimizando a absorção de ácidos graxos de cadeia longa, como o oleico e o linoleico (Moreira *et al.*, 2017; Magalhães, 2018; Wang *et al.*, 2012).

Embora o óleo de semente de sapucaia apresente uma quantidade significativa de ácido linoleico (C18:2) na posição Sn-2 (39,05%), um ácido graxo essencial com diversos benefícios à saúde, o óleo do arilo possui uma menor proporção desse ácido (15,01%). No entanto, a alta concentração de ácido oleico na posição Sn-2 ressalta seu grande potencial na produção de triglicerídeos funcionais, além de sugerir possíveis aplicações na indústria alimentícia e cosmética, devido à maior estabilidade oxidativa que este confere ao óleo (Ali *et al.*, 2023).

Outro ponto relevante é a baixa concentração de ácidos graxos saturados na posição Sn-2 em ambos os óleos. No óleo da semente de sapucaia, ácidos saturados como o palmítico (C16) e o esteárico (C18) somam apenas 3,14% do total, enquanto no óleo do arilo essa proporção é ainda menor, com apenas 2,01%. Esse perfil é favorável à produção de triglicerídeos dietéticos, pois a predominância de ácidos graxos insaturados na posição Sn-2 pode melhorar a eficiência digestiva e oferecer benefícios à saúde, como a redução do colesterol LDL e propriedades anti-inflamatórias (Moreno *et al.*, 2023; Ali *et al.*, 2023).

Em resumo, tanto o óleo da semente quanto o óleo do arilo de sapucaia apresentam grande potencial para uso na produção de triglicerídeos dietéticos, devido ao elevado teor de ácidos graxos insaturados na posição Sn-2. Além disso, o óleo do arilo, com mais de 60% de ácidos graxos insaturados, destaca-se como um óleo promissor para a alimentação. A análise Sn-2 revelou uma composição particularmente rica em ácido oleico, tornando-o uma opção valiosa para produtos

de alto valor agregado, como óleos nutracêuticos e cosméticos, e enfatizando a importância de mais estudos para explorar seu uso potencial (Hidalgo; Carretta; Burgos, 2021; Magalhães, 2018).

5.4. AVALIAÇÃO DO BIOCATALISADOR

Antes de realizar as reações de acidólise, primeiramente é importante avaliarmos aspectos do biocatalisador, no caso a lipase comercial Lipozyme RM IM, que será utilizada. Para isso, a umidade foi analisada após a secagem da amostra em estufa a 105°C até que se alcançasse peso constante, conforme descrito na metodologia (seção 4.2). Os resultados mostraram um teor de umidade de 5,3%. Um nível elevado de umidade pode comprometer a atividade enzimática e a vida útil do biocatalisador, enquanto um teor muito baixo pode afetar a solubilidade da enzima (Wang *et al.*, 2016)

A atividade hidrolítica e atividade de esterificação da enzima é outra característica importante para reações de acidólise e que deve ser avaliada. Para isso, foram considerados os resultados de Remonatto *et al.* (2023), que utilizou a mesma enzima e obteve 352,57 U/g e 5543,87 U/g para a atividade de hidrólise e de esterificação, respectivamente, e os dados de Bassan *et al.* (2018), que, ao utilizar a mesma enzima, alcançaram uma atividade hidrolítica de 568 U/g e uma atividade de esterificação de 5543 U/g.

5.5. SÍNTESE DE TAGS DIETÉTICOS

Após a extração e análise do óleo de sapucaia, que demonstrou ser uma boa alternativa para a produção de triglicerídeos dietéticos do tipo MLM, o objetivo nesta fase foi avaliar o grau de incorporação do ácido cáprico (C10) no óleo de sapucaia nas posições Sn-1 e Sn-3. Para isso, foram realizadas reações de acidólise utilizando o biocatalisador Lipozyme RM IM para a síntese de TAGs estruturados. Nas próximas seções, inicialmente, serão apresentados os resultados experimentais obtidos, juntamente com o desenvolvimento do modelo DCCR, que permitirá a posterior análise e discussão dos TAGs dietéticos sintetizados.

5.5.1. Planejamento experimental e modelo delineamento composto central rotacional (DCCR)

As reações foram conduzidas conforme um planejamento experimental do tipo DCCR, que busca otimizar a incorporação do ácido cáprico. Este modelo experimental é uma abordagem estatística que permite avaliar o efeito de duas variáveis independentes (neste caso, a Razão Molar (RM) e a Carga Enzimática (E)) sobre uma variável de resposta (o grau de incorporação, ID). Com a realização de 14 reações, sendo 11 previstas pelo DCCR e 3 pontos centrais adicionais (0,0) que foram incluídos com o intuito de minimizar os erros do modelo desenvolvido, foi possível analisar as interações e os efeitos das variáveis sobre o ID. Após cada reação, os perfis de ácidos graxos do óleo sintetizado foram determinados. Os resultados experimentais foram organizados na Tabela 6, que apresenta o grau de incorporação (ID em %) do ácido cáprico:

Tabela 6 - Resultados do grau de incorporação do ácido cáprico após reações de acidólise com o óleo de semente de sapucaia.

Ensaio (x1,x2)	x1 (RM, Razão Molar Óleo:Ácido)	x2 (E, % carga enzimática)	ID (% do Grau de Incorporação)
1 (-1,-1)	1:3	5	20,8
2 (-1,-1)	1:3	5	20,0
3 (+1,-1)	1:9	5	26,9
4 (+1,-1)	1:9	5	27,9
5 (-1,+1)	1:3	10	26,4
6 (-1,+1)	1:3	10	24,6
7 (+1,+1)	1:9	10	37,2
8 (+1,+1)	1:9	10	35,8
9 (0,0)	1:6	7,5	30,2
10 (0,0)	1:6	7,5	30,2
11 (0,0)	1:6	7,5	30,7
12 (0,0)	1:6	7,5	30,0
13 (0,0)	1:6	7,5	27,2
14 (0,0)	1:6	7,5	28,9

Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

A análise dos dados indicou que os maiores índices de incorporação foram verificados nas reações realizadas com uma razão molar de 1:9 e uma carga enzimática de 10% (Ensaio 7 e 8). Essas condições demonstraram ser as mais favoráveis para a síntese de TAGs incorporando o ácido cáprico. Os resultados do planejamento experimental, exibidos na Tabela 7, apresentam os coeficientes e a significância estatística do modelo DCCR para o ID:

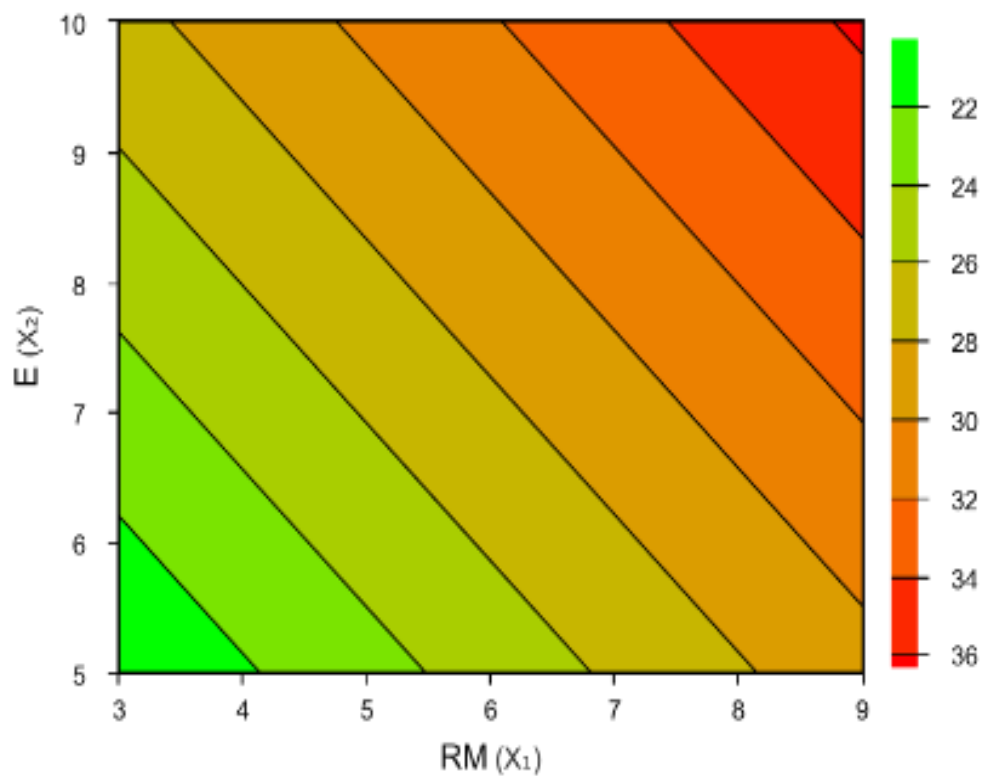
Tabela 7 - Coeficientes e Significância Estatística do Modelo DCCR para o Grau de Incorporação (ID).

	Coeficiente	Erro Padrão	t calc	p valor
Média	28,45	0,39	72,57	0,0000
X ₁	4,27	0,52	8,24	0,0000
X ₂	3,75	0,52	7,24	0,0000
X ₁ . X ₂	0,80	0,52	1,54	0,1557

Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

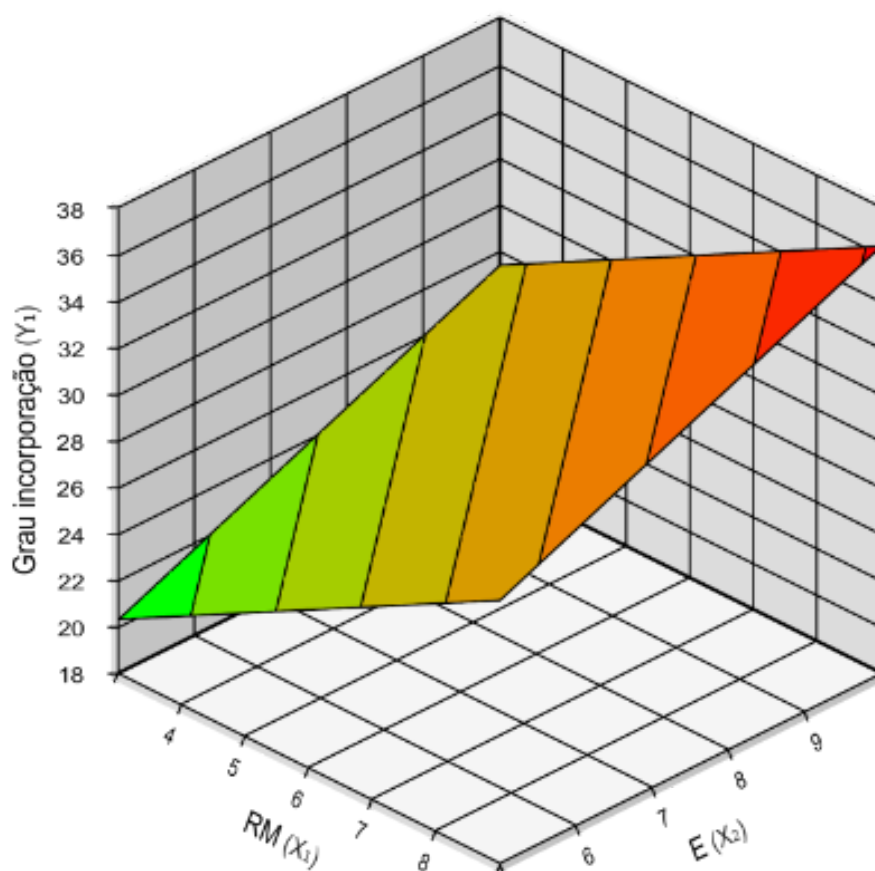
Os coeficientes obtidos demonstram que tanto a Razão Molar quanto a Carga Enzimática são estatisticamente significativas ($p < 0,001$), e suas influências no ID são positivas, conforme foi observado no estudo de Bassan (2017) para o aumento da Razão Molar. A interação entre X₁ e X₂ resultou em um valor aproximado de $p = 0,16$, portanto ela não foi considerada na modelagem por não atingir o nível de significância estatística comumente adotado nos estudos ($p < 0,05$). Esse alto valor de p indica que a probabilidade da interação entre X₁ e X₂ ocorrer ao acaso é relativamente alta, o que reduz a confiança de que essa interação seja relevante para explicar as variáveis de resposta no modelo. Portanto, optou-se por excluir essa interação da modelagem para garantir maior precisão e parcimônia nos resultados. Com isso, a modelagem foi então ilustrada pela projeção do plano da superfície resposta entre as variáveis X₁ (RM) e X₂ (E) (Figura 8) e pela superfície resposta (Figura 9) geradas pelo software Protimiza:

Figura 8 - Projeção do plano de superfície resposta para o grau de incorporação (ID).



Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

Figura 9 - Plano de superfície resposta para o grau de incorporação.



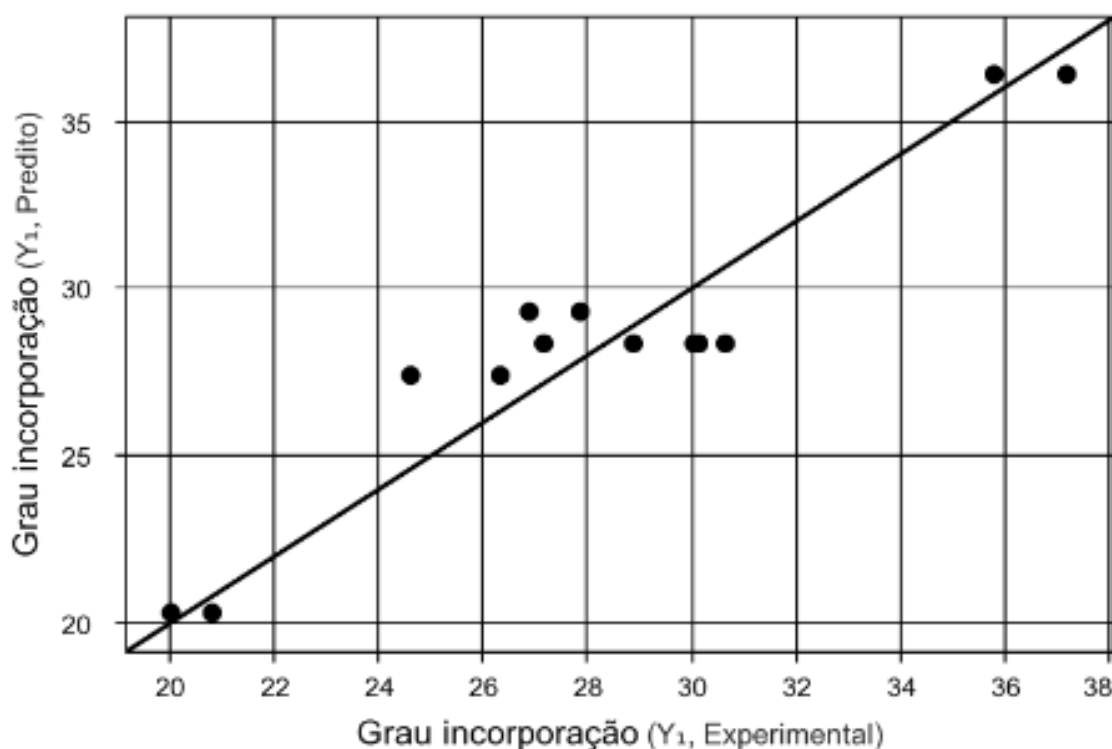
Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

A partir do modelo polinomial gerado (Tabela 8), estabeleceu-se o modelo matemático da relação entre as variáveis experimentais (X_1 , Razão Molar (RM); e X_2 , Carga Enzimática (E)) e os resultados de ID, sendo expresso na Equação 2 abaixo:

$$ID = 28,45 + 4,27.X_1 + 3,75.X_2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Com isso, essa correlação entre o polinômio previsto (ID Predito) e os resultados experimentais (ID Experimental) é apresentada através do gráfico abaixo (Figura 10):

Figura 10 - Grau de Incorporação Predito vs Grau de Incorporação Experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor com software Protimiza (2024).

O valor do coeficiente de determinação (R^2) é de 90,68%, demonstrando um bom ajuste deste modelo com os resultados experimentais. A partir desse modelo, é possível prever o ID esperado com determinadas RM e E nas faixas estudadas (de 1:3 a 1:9 e 5 a 10%, respectivamente), sob as condições reacionais estabelecidas (45°C, Lipozyme RM IM, ácido cáprico e óleo de semente de sapucaia).

5.5.2. Análise e discussão dos tags dietéticos sintetizados

Os resultados indicam que os maiores valores para o ID foram obtidos nas reações em que a Razão Molar (RM) e a Carga Enzimática (E) corresponderam a 1:9 e 10% (Tabela 7), respectivamente, configurando as melhores condições para a síntese. Assim, decidiu-se avaliar o perfil de ácidos graxos para os ensaios que apresentaram os melhores resultados de incorporação (Tabela 8).

Tabela 8 - Perfil de ácidos graxos do óleo da castanha de sapucaia (Controle) e dos TAGs dietéticos sintetizados (Ensaio 7 e 8).

Ácido graxo	Composição (%)		
	Controle	Ensaio 7	Ensaio 8
C10	0,00	26,67	25,53
C16	8,12	3,91	3,86
C18	5,97	4,23	4,22
C18:1	45,84	36,32	36,99
C18:2	39,22	28,40	28,97
Outros	0,85	0,47	0,43

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foi realizada também a análise do perfil Sn-2 do óleo obtido do melhor ensaio (Ensaio 7, ver resultados Tabela 8) para confirmar a composição dos ácidos graxos na posição Sn-2 do TAG dietético sintetizado, resultando na seguinte tabela comparativa ao óleo de semente como controle (Tabela 9):

Tabela 9 - Perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 do óleo da castanha de sapucaia (Controle) e do TAG dietético sintetizado (Ensaio 7).

Ácido graxo	Composição (%)	
	Controle	Ensaio 7
C10	0,00	0,52
C16	2,01	2,94
C18	1,13	1,60
C18:1	57,09	55,50
C18:2	39,05	38,63
Outros	0,72	0,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados apresentados na Tabela 9 indicam que a reação de acidólise resultou em mudanças no perfil de ácidos do óleo de semente de sapucaia. Comparando-se essas composições do Controle versus Ensaios 7 e 8 da acidólise, notam-se as diminuições em todos os ácidos, mas principalmente nos ácidos oleico

(C18:1) (cerca de -9%) e linoleico (C18:2) (cerca de -10%). Essa diminuição está relacionada à incorporação do ácido cáprico (C10) no triglicerídeo, como comprovado pela ausência desse ácido no controle, mas presente nos Ensaios 7 e 8, representando 26,67% e 25,53% do triglicerídeo, respectivamente, após a reação. Isso resultou em graus de incorporação de 37,2% e 35,8% nos ensaios. O ID máximo para essa reação é de 66,7%, uma vez que a incorporação dos ácidos graxos ocorre somente nas posições Sn-1 e Sn-3, devido à atuação da lipase 1,3-específica (Lipozyme RM IM).

No estudo de Bassan (2017) que utilizou condições semelhantes às utilizadas neste estudo (Lipozyme RM IM, Ácido Cáprico para incorporação e 24h de reação) porém com outras matérias primas (Óleo de uva e óleo de algodão) e temperaturas, o maior valor obtido para o ID para o óleo de uva foi de 34,53% enquanto que para o óleo de algodão foi de 36,63% sob condições que utilizaram a Razão Molar igual a 1:6 e carga enzimática de 5% (em relação à massa de óleo). Dessa forma podemos dizer que os valores do grau de incorporação utilizando o biocatalisador Lipozyme RM IM estão dentro do que se era esperado dado o tempo de reação.

Além disso, ao analisar a Tabela 10, nota-se que os triglicerídeos dietéticos sintetizados preservaram um perfil de ácidos graxos de cadeia longa, mono e poli-insaturados, na posição Sn-2 (acima de 94%), indicando que a reação de acidólise ocorreu conforme previsto, mantendo as características nutricionais desejadas para o triglicerídeo gerado. Essas características incluem a estrutura tipo MLM e a presença de cadeias longas mono e poli-insaturadas na posição Sn-2, o que facilita a absorção pelo organismo ao serem consumidas (Ali *et al.*, 2023). Além disso, esses ácidos de cadeia longa e insaturados estão associados à prevenção de várias doenças, incluindo diabetes, doenças cardíacas, inflamações e certos tipos de câncer (Moreno *et al.*, 2023).

Embora haja pequenas variações nas porcentagens de outros ácidos, essas flutuações podem ser atribuídas à diversidade entre as sementes de sapucaia coletadas. No entanto, foi observada uma leve incorporação do ácido cáprico na posição Sn-2 (0,52%), o que pode resultar de uma possível migração (acilmigração) desse ácido para essa posição. Wang *et al.*, (2012) demonstraram que ácidos graxos de cadeia média, como o ácido cáprico (C10), tendem a migrar para a posição Sn-2 em temperaturas mais elevadas, variando de 30 a 70°C. No presente

estudo, as reações foram conduzidas a 45°C. Esse efeito também foi registrado no estudo de Bassan (2017).

Os resultados indicam que a reação de acidólise foi bem-sucedida ao compararmos o ID esperado com o estudo de Bassan (2017), resultando na síntese de TAGs dietéticos com mais de 94% de ácidos de cadeia longa insaturados na posição Sn-2, sendo o maior ID (entre 37-35%) do ácido cáprico no triglicerídeo alcançado com uma razão molar de 1:9 e uma carga enzimática de 10%.

No que diz respeito ao modelo matemático gerado pelo DCCR dado pela Eq. 2, tem-se que o valor do coeficiente de determinação (R^2) é de 90,68%, o que caracteriza um elevado ajuste deste modelo com os resultados experimentais (Borazjani *et al.*, 2020). Contudo, ao tentar calcular as condições para atingir um ID de 66,7% (valor máximo teórico), deve-se considerar duas limitações: a primeira é que, por se tratar de um polinômio de primeiro grau, o modelo não consegue prever valores extremos de ID, pois não há termos quadráticos ou interações mais complexas que possam representar adequadamente a não-linearidade que ocorre em condições de ID máximo; a segunda limitação refere-se à extrapolação para condições fora do plano experimental central, onde a ausência de pontos axiais nos experimentos aumenta o erro de predição. Por isso, para explorar condições reacionais fora das faixas estudadas, deve-se levar em conta um possível aumento do erro, o que pode resultar em previsões imprecisas. Portanto, recomenda-se que o modelo polinomial obtido (Eq. 2) seja utilizado de preferência para a predição do ID dentro das faixas de RM e E estudadas, onde o modelo oferece maior precisão.

Devido à falta de matéria-prima suficiente, não foi possível realizar um teste de validação do modelo, portanto, recomenda-se a execução de testes adicionais para avaliar a conformidade dos resultados com o modelo e sua variação. Para uma análise mais robusta e previsões precisas nas regiões ao redor do plano central, seria ideal incluir pontos axiais e adicionais no DCCR. Esses pontos permitiriam uma melhor exploração e compreensão do comportamento do sistema experimental fora do plano central. No entanto, é fundamental ter cautela ao fazer previsões em áreas distantes dos pontos experimentais, pois a confiabilidade dessas previsões dependerá da qualidade dos dados, da validade do modelo e da extrapolação adequada dos resultados. Portanto, testes adicionais devem ser realizados para validar as previsões em condições experimentais reais, mesmo após a inclusão de pontos axiais e adicionais ao DCCR.

5.6. PRODUÇÃO E SUSTENTABILIDADE

Conforme demonstrado e explorado nas seções anteriores, a extração de óleo da semente de sapucaia é aplicável à indústria de alimentos, como através da síntese de TAGs dietéticos, e apresenta um alto rendimento quando realizado por técnicas laboratoriais, como no caso do estudo, com extração via Soxhlet, que utiliza solventes orgânicos para extrair a maior quantidade de óleo possível.

No entanto, para uma produção em larga escala, o uso de métodos de extração como a prensa a frio seria preferível devido a questões de viabilidade operacional e sustentabilidade, além de evitar resíduos químicos associados aos solventes. A prensa, um método mecanicamente simples e economicamente viável, é amplamente empregada em processos industriais, como na própria extração de óleos de sementes oleaginosas, e poderia ser capaz de proporcionar rendimentos similares (Lira *et al.*, 2021).

Dessa forma, estudos comparativos entre esses métodos são essenciais para avaliar a eficiência da extração sem comprometer o teor nutricional e funcional do óleo. Caso a prensa obtenha rendimento alto ou similar, considera-se a viabilidade de um modelo de produção sustentável, especialmente focado no extrativismo com coleta seletiva (Lira *et al.*, 2021). Essa, por sua vez, poderia ser uma abordagem sustentável, pois esse tipo de coleta, além de garantir a preservação das plantas nativas, evita o desmatamento e a degradação ambiental. Além disso, a coleta comunitária controlada favoreceria o engajamento de comunidades locais, promovendo o uso sustentável dos recursos naturais, gerando emprego e renda, e garantindo a conservação dos recursos genéticos das PANCs (Silva *et al.*, 2016).

Sendo assim, através dos métodos propostos, esse processo de produção possui um potencial ecológico elevado, que seria capaz de promover a geração de renda na região de cultivo, a produção de alimentos mais saudáveis e nutritivos e a valorização de espécies nativas, contribuindo para a manutenção dos ecossistemas de florestas brasileiras (Lira *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2024), o que vai de encontro com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU de “Fome Zero e Agricultura Sustentável” e “Consumo e Produção Responsáveis”.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal investigar o potencial dos recursos da castanha de sapucaia, tanto a semente quanto o arilo funicular, na produção de óleos e na síntese de lipídios estruturados a partir do óleo da semente de sapucaia. Além disso, buscou-se otimizar a produção de triglicerídeos dietéticos por meio de planejamento experimental e modelagem utilizando o DCCR.

Os resultados da caracterização indicaram que o óleo extraído da semente de sapucaia possui propriedades químicas adequadas para aplicações industriais e alimentícias, apresentando índices de acidez e peróxido dentro dos limites estabelecidos pela ANVISA (ANVISA, 2021), além de um rendimento de extração chamativo para produção em larga escala de 54% m/m. O perfil de ácidos graxos do óleo mostrou-se rico em ácidos graxos insaturados, com 85% de sua composição, destacando os ácidos oleico e linoleico, os quais são benéficos à saúde humana (Demoliner *et al.*, 2018). Por sua vez, o óleo extraído do arilo apresentou um elevado teor de ácido oleico (48%). Quanto à composição dos triglicerídeos na posição Sn-2, ambos os óleos mostraram-se promissores para a síntese de triglicerídeos dietéticos do tipo MLM ou SLS. Essa posição apresentou uma composição superior a 96% para ambos os óleos em ácidos graxos de cadeia longa mono e poli-insaturados, majoritariamente o ácido oleico e linoleico, que, como mencionado, estão associados à redução dos níveis de colesterol no sangue e à prevenção de doenças cardiovasculares (Bassan, 2017).

Com esse potencial evidenciado, o estudo utilizou o óleo de semente de sapucaia na síntese de triglicerídeos dietéticos do tipo MLM via acidólise. Os resultados foram satisfatórios quando comparados com a literatura (Bassan, 2017; Remonatto *et al.*, 2023), alcançando altos ID do ácido cáprico (C10) nas posições Sn-1 e Sn-3 dos triglicerídeos. A condição experimental ótima foi obtida com RM de 1:9 (óleo:ácido) e E de 10% em relação à massa do óleo, resultando em um ID entre 35% e 37%. A análise do perfil de ácidos graxos na posição Sn-2 dos triglicerídeos sintetizados confirmou a manutenção dos ácidos graxos insaturados de cadeia longa desejados, como os ácidos oleico e linoleico, proporcionando melhor absorção pelo organismo e, consequentemente, benefícios à saúde (Bassan, 2017).

Além disso, por meio do planejamento experimental, foi possível desenvolver uma superfície de resposta e um modelo polinomial (com $R^2 = 90,68\%$) para prever

o ID do ácido cáprico com diferentes combinações de RM e E nas faixas estudadas (de 1:3 a 1:9 e 5 a 10%, respectivamente) para a síntese de lipídios estruturados utilizando o óleo de semente de sapucaia.

Assim, os resultados deste estudo não apenas enriquecem o conhecimento científico sobre a castanha de sapucaia, mas também abrem novas oportunidades para sua exploração econômica e industrial de forma sustentável, ressaltando seu potencial como fonte alternativa na produção de triglicerídeos dietéticos, tanto a partir do óleo da semente quanto do arilo funicular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, S. *et al.* Relationship between monounsaturated fatty acids and sarcopenia: a systematic review and meta-analysis of observational studies. **Aging Clinical and Experimental Research**, v. 35, p. 1823-1834, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10460305/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ALVES, V.; FURTADO, G.F.; MACEDO, G.A. Structured Lipids: Importance in Metabolism and Health. *In*: ALVES, V.; FURTADO, G.F.; MACEDO, G.A. **Chemical and Enzymatic Interesterification for Food Lipid Production**. 1ª Ed. Suíça: Springer Nature, 2024, p. 47-56.

ANVISA. Resolução RDC nº 481, de 23 de setembro de 2021. Estabelece requisitos sanitários para óleos e gorduras vegetais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 set. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br>. Acesso em: 7 out. 2024.

AOCS. Official Method Ca 5a-40 - Free Fatty Acids in Edible Oils and Fats. *In*: **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society**. 8ª Ed. American Oil Chemists' Society, 2012a.

AOCS. Official Method Cd 1c-85 - Iodine Value of Fats and Oils. *In*: **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society**. 8ª Ed. American Oil Chemists' Society, 2012b.

AOCS. Official Method Cd 8b-90 - Peroxide Value, Acetic Acid-Isooctane Method. *In*: **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society**. 8ª Ed. American Oil Chemists' Society, 2012c.

BASSAN, N. **Modificação enzimática de óleos vegetais visando à obtenção de triglicerídeos dietéticos através do emprego de reatores de tanque agitado e leito fixo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152510>. Acesso em: 28 set. 2022.

BASSAN, N.; RODRIGUES, R.H.; MONTI, R.; TECELÃO, C.; FERREIRA-DIAS S.; PAULA, A.V. Enzymatic modification of grapeseed (*Vitis vinifera* L.) oil aiming to obtain dietary triacylglycerols in a batch reactor. **LWT**, v. 99, p. 600-606, May 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643818304274>. Acesso em: 06 out. 2024.

BELTRÃO JÚNIOR, N.S.B. **Análise da estrutura da cadeia produtiva de óleos vegetais florestais: um estudo no estado do Pará, Amazônia Brasileira**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) - Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, Portugal, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/e0a5f3a4d250a0f9c055756dd4daab24/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>. Acesso em: 11 nov. 2024.

BORAZJANI, M.; BAHRAM, M.; BANABAZI, M.H. A comparative study on the optimization of the fatty acids pretreatment parameters using central composite design with response surface methodology. **Journal of the Iranian Chemical Society**, v. 17, n. 11, p. 2877-2883, June 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13738-020-01967-2>. Acesso em: 26 nov. 2024.

BRASIL. Resolução RDC ANVISA/MS nº. 270, de 22 de setembro de 2005: Regulamento técnico para óleos vegetais, gorduras vegetais e creme vegetal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2005. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0270_22_09_2005.html. Acesso em: 26 nov. 2024.

CABALLERO, E. *et al.* Potential Use of Avocado Oil on Structured Lipids MLM-Type Production Catalysed by Commercial Immobilised Lipases. **PLoS ONE**, v. 9, p. e107749, Sep. 2014. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0107749>. Acesso em: 26 set. 2022.

CARVALHO, R. F. *et al.* Intake of partially defatted Brazil nut flour reduces serum cholesterol in hypercholesterolemic patients- a randomized controlled trial. **Nutrition Journal**, v. 14, n. 1, June 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26077768/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

CAUSEVIC, A. *et al.* Impact of critical parameters influencing enzymatic production of structured lipids using response surface methodology with water activity control. **Biochemical Engineering Journal**, v. 187, p. 108610, Nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X22002790>. Acesso em: 26 nov. 2024.

CHOWDHURY, R. *et al.* Association between fish consumption, long chain omega 3 fatty acids, and risk of cerebrovascular disease: systematic review and meta-analysis. **BMJ**, v. 345, Oct. 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23112118/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

COSTA, T.; JORGE, N. Characterization and fatty acids profile of the oils from Amazon nuts and walnuts. **Nutrition & Food Science**, v. 42, n. 4, p. 279–287, July 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242341723_Characterization_and_fatty_acids_profile_of_the_oils_from_Amazon_nuts_and_walnuts. Acesso em: 26 nov. 2024.

DEMOLINER, F. *et al.* Sapucaia nut (*Lecythis pisonis* Cambess) and its by-products: A promising and underutilized source of bioactive compounds. Part I: Nutritional composition and lipid profile. **Food Research International**, v. 108, p. 27–34, June 2018.

DEMOLINER, F. *et al.* Perfil químico da castanha de sapucaia (*Lecythis pisonis* cambess) e obtenção de extrato hidrossolúvel vegetal por crioconcentração. 2019. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias,

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214333>. Acesso em: 17 fev. 2023.

DE SOUZA, A.S. *et al.* **Conhecendo espécies de plantas da Amazônia: Sapucaia (Lecythis pisonis Cambess. - Lecythidaceae)**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014, 5p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado técnico, 250). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/999043/conhecendo-esppecies-de-plantas-da-amazonia-sapucaia-lecythis-pisonis-cambess---lecythidaceae>. Acesso em: 25 set. 2022.

HANSEN, A.C.; HE, B.B.; ENGESETH, N.J. Food versus fuel characteristics of vegetable oils and animal fats. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 4, p. 1407-1414, Jan. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271420878_Food_versus_Fuel_Characteristics_of_Vegetable_Oils_and_Animal_Fats. Acesso em: 26 nov. 2024.

HONG, Chi Rac *et al.* An Overview of Structured Lipid in Food Science: Synthesis Methods, Applications, and Future Prospects. **Journal of Chemistry**, v. 2023, n. 1, p. 122, 2023.

IJAZ, H.; SUN, S.A. review on preparation and application of low-calorie structured lipids in food system. **Food Science and Biotechnology**, Aug. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01689-8>. Acesso em: 11 nov. 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Óleos e Gorduras. *In*: TAKEMOTO, E. *et al.* Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos. Instituto Adolfo Lutz, 1ª ed., p. 593–629, 2008.

ISO. ISO 5508:2012 - Animal and Vegetable Fats and Oils – Analysis by Gas Chromatography of Methyl Esters of Fatty Acids. **International Organization for Standardization**, 2012.

ITTO. **Sapucaia (Lecythis pisonis)**. The International Tropical Timber Organization. Disponível em: <http://www.tropicaltimber.info/pt-br/specie/sapucaia-lecythis-pisonis/>. Acesso em: 28 jan. 2018.

LATIMER, G.W.J. Official Method 2003.06 - Crude Fat in Feeds, Cereal Grains, and Forages. *In*: Latimer, George W. Jr. **Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL**. 22ª Ed. atual. ampl. Nova York, 2023.

LEÃO, N.V.M. *et al.* Características biométricas e massa de frutos e sementes de *Lecythis pisonis* Cambess. **Enciclopédia Biosfera**, v. 12, n. 24, p. 167–175, Dec. 2016.

LIRA, G.B. *et al.* Processos de extração e usos industriais de óleos de andiroba e açaí: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e229101220227, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20227>. Acesso em: 12 nov. 2024.

LOPES, P.A. *et al.* Structured lipids engineering for health: Novel formulations enriched in n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids with potential nutritional benefits. **Metabolites**, v. 13, n. 10, p. 1060, Oct. 2023.

MACHADO, A.C. *et al.* **Plantas alimentícias não convencionais: PANC**. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo, 2021. *E-book*. Disponível em: https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/772923/mod_book/intro/PANC.pdf. Acesso em: 12 out. 2024.

MAGALHÃES, A.L.C.C. **Extração e caracterização do óleo da amêndoa de sapucaia (*Lecythis pisonis*)**. 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/20709/1/ALCCMagalh%c3%a3es.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

MARTINS, M.V. **Atividade antioxidante e anti-inflamatória da castanha de sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess) em ratos Wistar**. 2016. Tese (Doutorado em Bioquímica Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/f11d281c-fc2e-4feb-8797-ec5b8d8408d4>. Acesso em: 5 out. 2024.

MOREIRA, D. K. T *et al.* Production and characterization of structured lipids with antiobesity potential and as a source of essential fatty acids. **Food Research International**, v. 1, p. 713-719, Sep. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996917302843>. Acesso em: 27 nov. 2024.

MORENO, M. *et al.* Update on Anti-Inflammatory Molecular Mechanisms Induced by Oleic Acid. **Nutrients**, v. 15, p. 224, Jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu15010224>. Acesso em: 11 nov. 2024.

OEC - Observatory of Economic Complexity. **Soybean Oil in Brazil**. The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development, [2023]. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs/soybean-oil>. Acesso em: 5 out. 2024.

PARMAR, V. *et al.* Recent advances in fabrication of food grade oleogels: structuring methods, functional properties and technical feasibility in food products. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 16, n. 6, p. 4687-4702, 2022.

PHUAH, E.T. *et al.* Vegetable Oils and Animal Fats: Sources, Properties and Recovery. **Recent Advances in Edible Fats and Oils Technology**, Singapura, v. 1, p. 1-26, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5113-7_1. Acesso em: 11 nov. 2024.

REMONATTO, D. *et al.* Solvent-Free Enzymatic Synthesis of Dietary Triacylglycerols from Cottonseed Oil in a Fluidized Bed Reactor. **Molecules**, v. 28, n. 14, p. 5384,

2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/14/5384>. Acesso em 06 out. 2024.

REYES-REYES, A.L.; BARRANCO, F.V.; SANDOVAL, G. Recent advances in lipases and their applications in the food and nutraceutical industry. **Catalysts**, v. 12, n. 9, p. 960, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/9/960>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SILVA, D.W. *et al.* Extrativismo e desenvolvimento no contexto da Amazônia brasileira. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, n. 10.5380, 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/78956325/ef8b84e11155cdc353c343914777d85c4de5.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SHRAMKO, V.S. *et al.* The short overview on the relevance of fatty acids for human cardiovascular disorders. **Biomolecules**, v. 10, n. 8, p. 1127, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-273X/10/8/1127>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SOARES, J.F. *et al.* **Caracterização e estudo de estabilidade do óleo de amêndoa da macaúba proveniente do cerrado norte mineiro**. 2024. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Saúde.) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/69435>. Acesso em: 12 nov. 2024.

HIDALGO, M.A.; CARRETTA, M.D.; BURGOS, R.A. Long chain fatty acids as modulators of immune cells function: contribution of FFA1 and FFA4 receptors. **Frontiers in Physiology**, v. 12, p. 668330, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2021.668330/full>. Acesso em: 11 nov. 2024.

TEIXEIRA, G.L. **Propriedades químicas, físicas e funcionais de óleos de frutos de sapucaia (Lecythis pisonis Cambess.) obtidos por técnicas clássicas e via fluidos pressurizados**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/54969>. Acesso em: 25 set. 2022.

UN Comtrade. **Brazil Soybean Oil Export Data**, [2023]. Disponível em: <https://comtrade.un.org/data>. Acesso em: 5 out. 2024.

VITOR, J.I.E. **Obtenção de lipídios estruturados a partir de gordura animal e óleo de pescado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/8542>. Acesso em: 15 de fev. 2023.

WANG, Y. *et al.* Lipase-catalyzed acidolysis of canola oil with caprylic acid to produce medium-, long- and medium-chain-type structured lipids. **Food and Bioproducts Processing**, v.4, p.707-712, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308512000119>. Acesso em: 27 nov. 2024.

WANG, S. *et al.* Enzyme stability and activity in non-aqueous reaction systems: a mini review. **Catalysts**, v. 6, n. 2, p. 32, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/6/2/32>. Acesso em: 27 nov. 2024.

ZHANG, H. *et al.* Advances in enzyme biocatalysis for the preparation of functional lipids. **Biotechnology Advances**, v. 61, p. 108036, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36130694/>. Acesso em: 27 nov. 2024.