



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE FARMÁCIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE ALIMENTOS

NAYAH BARBIERI DO PRADO

**Propriedades físico-químicas e estabilidade termo-oxidativa da
fração lipídica de larvas de *Zophobas atratus***

UFBA

SALVADOR
2025



NAYAH BARBIERI DO PRADO

**Propriedades físico-químicas e estabilidade termo-oxidativa da
fração lipídica de larvas de *Zophobas atratus***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ciência de Alimentos (PGAli) da Universidade
Federal da Bahia, como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Ciência de
Alimentos.

Prof.^a Dr.^a Carolina Oliveira de Souza

Orientador

Prof. Dr. Paulo Vitor Lemos França

Coorientador

Prof. Dr. Henrique Marcelino

Coorientador

SALVADOR

2025

NAYAH BARBIERI DO PRADO

**Propriedades físico-químicas e estabilidade termo-oxidativa da
fração lipídica de larvas de *Zophobas atratus***

A Comissão Julgadora dos trabalhos de defesa da Tese de Mestrado da candidata
Nayah Barbieri do Prado, em sessão pública realizada em 28/04/2025.

Prof^a. Dra. Carolina Oliveira de Souza (Orientadora)

Faculdade de Farmácia

Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador, BA)

Bruno Nicolau Paulino (Membro titular interno)

Faculdade de Farmácia

Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador, BA)

José Marcos Teixeira de Alencar Filho (Membro titular externo)

Faculdade de Farmácia

Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador, BA)

Salvador, 28 de abril de 2025

Dedico este trabalho,

*À minha família – Onélia, Vaner e Nathan. Com vocês, sei
que sou capaz até de dominar o mundo, se quiser.*

Meus agradecimentos,

Aos meus pais, Vaner e Onélia, por todos os anos de dedicação e investimento, para que hoje eu me tornasse a pessoa e profissional que eu sou. A vocês, minha eterna gratidão. Esse trabalho só existe por conta de vocês.

À minha orientadora, Carolina Oliveira, a qual sou profundamente grata por sempre confiar em mim, por sempre estar disponível, seja para me orientar ou para ser um ombro amigo, e por acreditar em mim, desde o início. Nada disso – e “isso” não é “só isso” - seria possível sem você. Muito obrigada.

Aos meus coorientadores, Professores Paulo Vitor Lemos e Henrique Marcelino, meus mais sinceros agradecimentos por todo o apoio nas horas mais difíceis, e por todas as horas dedicadas de orientação. Sem vocês, esse trabalho não seria possível.

Aos meus colegas de laboratório das equipes do LAPESCA e LAPAAC, em especial aqueles mais próximos: Jaff Ribeiro, Aurora Andrade, Karina Pedraza, Raian Gubert e Edla Nunes. Vocês fizeram parte da construção do alicerce desse trabalho.

Aos colegas Juraci Duarte Pereira, Cristiani Viegas Brandão Grisi, Manuela Barreto Rocha, Paulo Roberto Ribeiro de Mesquita, Angela Maria Tribuzy de Magalhães Cordeiro, Alessandra de Almeida Lucas, Jania Betânia Alves da Silva, Denílson de Jesus Assis, Lucas Guimarães Cardoso, Ederlan Ferreira de Souza, que contribuíram para construção do artigo submetido à revista Food Chemistry.

Aos meus amigos, aos meus colegas de profissão, e em especial, meu irmão, Nathan, pelo apoio, pela ajuda, por tudo. Vocês sabem o que é o “tudo”.

À Coordenação Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida (nº do processo: 88887.674565/2022-00).

RESUMO

A busca por fontes alternativas e sustentáveis de ingredientes para a indústria alimentícia e de produtos naturais tem impulsionado o interesse no uso de insetos comestíveis. Dentre as espécies promissoras, as larvas de *Zophobas atratus* destacam-se pelo alto teor lipídico, sendo candidatas viáveis para a extração de óleos. Este estudo teve como objetivo caracterizar a fração lipídica (FL) extraída por prensagem a 40 °C, avaliando suas propriedades físico-químicas, perfil de ácidos graxos, compostos bioativos, estabilidade oxidativa, composição centesimal do resíduo sólido e a presença de compostos voláteis. A caracterização da FL foi realizada utilizando CG-EM, RMN¹H, FTIR-ATR, DSC, Rancimat, PetroOXY e espectrofotometria no visível. As análises de cor, índice de acidez, peróxidos e compostos voláteis complementaram a avaliação da qualidade do óleo. Os resultados indicaram um rendimento de 36% (m/m) e uma composição majoritária de triacilgliceróis, com 45,40% de ácidos graxos saturados (SFA) e 54,61% de insaturados. A FL apresentou coloração amarelada intensa, compatível com a presença de β -caroteno (16,75 mg/100 g), um antioxidante natural que, em conjunto com a composição lipídica, contribuiu para a elevada estabilidade termo-oxidativa observada nos ensaios de Rancimat, DSC e PetroOXY. Também foram detectados compostos voláteis associados a oxidação lipídica em níveis baixos, indicando boa qualidade inicial do óleo. Além disso, o resíduo sólido obtido após a prensagem revelou-se rico em proteínas e carboidratos, destacando-se como subproduto com potencial para formulações de rações ou extração de outros compostos bioativos. Dessa forma, a FL de *Z. atratus* demonstrou elevada estabilidade oxidativa, com tempo de indução de 10,6 h no Rancimat e 38 min no PetroOXY, valores superiores aos reportados para óleos vegetais como soja e girassol sob as mesmas condições. A presença de β -caroteno, aliada à maior proporção de SFA, contribuiu significativamente para essa estabilidade. Tais características indicam potencial competitivo da FL frente a fontes lipídicas convencionais. No entanto, embora os resultados laboratoriais sejam promissores, estudos adicionais são necessários para validar sua aplicação direta na indústria. O resíduo sólido pós-extração, por sua vez, apresenta composição favorável para uso em formulações alimentares e nutracêuticas, promovendo o aproveitamento integral da biomassa.

Palavras-chave Insetos comestíveis, *Zophobas morio*, óleos e gorduras, compostos voláteis, estabilidade oxidativa.

ABSTRACT

The search for alternative and sustainable sources of ingredients for the food and natural products industries has driven growing interest in the use of edible insects. Among the promising species, *Zophobas atratus* larvae stand out due to their high lipid content, making them viable candidates for oil extraction. This study aimed to characterize the lipid fraction (LF) extracted by pressing at 40 °C, evaluating its physicochemical properties, fatty acid profile, bioactive compounds, oxidative stability, proximate composition of the solid residue, and the presence of volatile compounds. The characterization of the LF was performed using GC-MS, ¹H NMR, FTIR-ATR, DSC, Rancimat, PetroOXY, and visible spectrophotometry. Analyses of color, acidity index, peroxide value, and volatile compounds complemented the assessment of oil quality. The results indicated a yield of 36% (w/w) and a composition predominantly of triacylglycerols, with 45.40% saturated fatty acids (SFA) and 54.61% unsaturated fatty acids. The LF showed an intense yellow coloration, compatible with the presence of β -carotene (16.75 mg/100 g), a natural antioxidant that, together with the lipid composition, contributed to the high thermo-oxidative stability observed in the Rancimat, DSC, and PetroOXY assays. Volatile compounds associated with lipid oxidation were also detected at low levels, indicating good initial oil quality. Additionally, the solid residue obtained after pressing proved to be rich in proteins and carbohydrates, highlighting its potential as a byproduct for feed formulations or extraction of other bioactive compounds. Thus, the LF of *Z. atratus* demonstrated high oxidative stability, with an induction time of 10.6 h in the Rancimat and 38 min in the PetroOXY, values higher than those reported for vegetable oils such as soybean and sunflower under the same conditions. The presence of β -carotene, along with the higher proportion of SFA, significantly contributed to this stability. These characteristics indicate the competitive potential of the LF compared to conventional lipid sources. However, although the laboratory results are promising, further studies are needed to validate its direct application in industry. The post-extraction solid residue, in turn, shows a favorable composition for use in food and nutraceutical formulations, promoting the full utilization of the biomass.

Keywords: *Edible insects, Zophobas morio, oils and fats, volatile compounds, oxidative stability.*

SUMÁRIO

DISSERTAÇÃO – Propriedades físico-químicas e estabilidade termo-oxidativa da fração lipídica de larvas de <i>Zophobas atratus</i>.....	0
1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivo Específico	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Uso de insetos como fonte alimentar	13
3.2 Importância nutricional dos insetos	15
3.3 Conteúdo lipídico em insetos.....	18
3.4 Incorporação de óleos de insetos em alimentos para humanos	20
3.5 Avaliação da deterioração química de óleos e gorduras	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Material	24
4.2 Métodos	24
4.2.1 Extração da fração lipídica das larvas de <i>Z. atratus</i>	24
4.2.2 Avaliação das características físico químicas da fração lipídica extraída das larvas de <i>Z. atratus</i>	25
4.2.2.1 Colorimetria	25
4.2.2.2 Índice de acidez	25
4.2.2.3 Índice de peroxidação	25
4.2.2.4 Espectrometria de absorção na região do Uv–visível e determinação de β –caroteno	26
4.2.2.5 Espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier acoplada ao dispositivo de reflectância total atenuada	26
4.2.2.6 Espectrometria de ressonância magnética nuclear	26
4.2.3 Avaliação dos compostos voláteis extraídos da fração lipídica por cromatografia gasosa	27
4.2.4 Avaliação do perfil de ácidos graxos por cromatografia gasosa e determinação dos índices de qualidade nutricional	28
4.2.5 Análises térmicas	29
4.2.5.1 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial	29
4.2.5.2 Transições de fusão e cristalização avaliadas por calorimetria exploratória diferencial	30

4.2.5.3 Período de indução por Rancimat e por PetroOXY	30
4.2.5.4 Avaliação da composição centesimal do sólido remanescente da extração por prensagem	31
5 RESULTADOS	31
5.1 Rendimento da extração da fração lipídica	31
5.2 Avaliação das características físico-químicas da fração lipídica	33
5.2.1 Colorimetria, índice de acidez e índice de peroxidação	32
5.2.2 Espectroscopias nas regiões do Uv–visível, infravermelho médio e de ¹ H RMN	34
5.2.3 Análise de compostos voláteis	38
5.2.4. Determinação do perfil de ácidos graxos e índices de qualidade nutricional	43
5.3 Avaliação das estabilidades térmica e oxidativa	46
5.3.1 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial	46
5.3.2 Temperatura de início de oxidação e tempo de indução de oxidação	50
5.3.3 Períodos de indução avaliados por Rancimat e PetroOXY	52
5.4 Avaliação da composição centesimal do sólido remanescente da prensagem	55
6 CONCLUSÃO	55
7 PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA - <i>From Larvae to Oil: Physicochemical Characterization and Thermo-Oxidative Stability of Lipids Extracted from Zophobas atratus</i>	57
8 REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por alimentos exige um aumento significativo na produção para suprir as necessidades nutricionais de uma população que deverá atingir aproximadamente 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (Orkusz, 2020). Estima-se que a necessidade por cereais, tanto para consumo humano quanto animal, aumentará cerca de 50%, enquanto a procura por proteínas, como carne, laticínios, peixes e óleos vegetais, crescerá ainda mais (Orkusz et al, 2020). No entanto, esse crescimento encontra desafios expressivos, incluindo a redução da disponibilidade de terras cultiváveis, mudanças climáticas, escassez de recursos hídricos e a poluição de ecossistemas terrestres e aquáticos (Probst, 2015).

Diante desse cenário, pesquisadores vêm explorando novas estratégias para a nutrição humana e animal. Uma alternativa promissora é a utilização de insetos comestíveis, prática conhecida como entomofagia. O cultivo desses organismos apresenta vantagens sustentáveis e nutricionais, podendo substituir parcialmente fontes tradicionais de proteína (Chia et al, 2019).

Apesar de ainda estar em fase inicial em diversos países, a regulamentação do uso de insetos na alimentação tem avançado. Em 2017, a União Europeia autorizou o uso de proteínas derivadas de insetos na aquicultura, e em 2021 ampliou a regulamentação para rações de aves e suínos. Já em 2023, foram aprovados novos insetos para consumo humano, incluindo o *Alphitobius diaperinus*, *Acheta domesticus*, *Tenebrio molitor* e *Locusta migratoria*. (Gonçalves et al, 2022)

O cultivo de insetos apresenta diversas vantagens em comparação com os sistemas convencionais de produção animal, como a bovinocultura, suinocultura e piscicultura. Além de demandarem menos espaço e recursos, os insetos possuem altas taxas de conversão alimentar, ciclos de vida curtos e menor emissão de gases de efeito estufa (FAO, 2021). Outra vantagem relevante é a possibilidade de criá-los utilizando resíduos agroindustriais, como subprodutos de frutas, grãos e vegetais, tornando a produção mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular (FAO, 2021).

Apesar da utilização de insetos na produção de ração animal já ser uma realidade, seu consumo na alimentação humana ainda enfrenta resistência, especialmente no Ocidente. Em diversas regiões da Ásia, no entanto, a entomofagia é uma prática comum e consolidada (FAPESP, 2020). Para facilitar a aceitação do público, uma estratégia tem sido o processamento dos insetos em formas mais palatáveis, como farinhas, pastas, óleos e suplementos proteicos, reduzindo a rejeição associada ao consumo do inseto inteiro. Assim, a incorporação de derivados de insetos em alimentos processados surge como uma alternativa

viável para enriquecer nutricionalmente diversos produtos sem comprometer suas características sensoriais (Araújo, 2022).

Do ponto de vista nutricional, os insetos são fontes ricas em proteínas, lipídios, vitaminas e minerais essenciais. Sua fração lipídica contém ácidos graxos benéficos e vitaminas lipossolúveis, o que os torna um recurso interessante não apenas para a alimentação, mas também para aplicações industriais (Gonçalves et al, 2022). A larva *Zophobas atratus*, por exemplo, apresenta um alto teor de triacilgliceróis (TAG) de cadeia média e já tem sido utilizada na produção de sabão, cosméticos e bioplásticos. No entanto, essa espécie ainda é menos explorada em comparação ao *Tenebrio molitor* (Cinvestav, 2022; Beat Digital, 2023).

A extração dos lipídios dos insetos pode ser realizada por diferentes métodos, sendo os solventes orgânicos os mais utilizados devido ao seu alto rendimento. No entanto, esses processos podem deixar resíduos e demandam etapas adicionais de refinamento para garantir a segurança alimentar (Limoeiro et al, 2020). Métodos alternativos, como o uso de n-propano pressurizado, têm demonstrado eficiência e apresentam vantagens em relação ao CO₂ supercrítico (Souza, 2021). Outra técnica promissora é a prensagem mecânica, que, embora tenha um rendimento menor, evita o uso de solventes químicos, reduzindo impactos ambientais e preservando as qualidades nutricionais das frações lipídicas extraídas (Souza, 2021).

Neste estudo, buscou-se caracterizar a fração lipídica extraída das larvas de *Zophobas atratus* por prensagem a 40 °C. Pela primeira vez, essa fração foi analisada de maneira abrangente, considerando sua composição molecular, propriedades colorimétricas, compostos voláteis e estabilidade termo-oxidativa. Os resultados obtidos contribuem para a ampliação do conhecimento sobre o potencial desse inseto tanto na indústria alimentícia quanto em outras aplicações biotecnológicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Extrair e avaliar as propriedades físico-químicas e a estabilidade termo-oxidativa da fração lipídica das larvas de *Zophobas atratus*.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar a extração da fração lipídica com prensagem a 40 °C das larvas de *Zophobas atratus*;
- ✓ Avaliar as propriedades físico-químicas da fração lipídica por meio das técnicas de colorimetria, determinação dos índices de acidez e peróxidos, quantificação de β -caroteno por espectroscopia UV-Vis, análise estrutural por RMN ^1H e FTIR-ATR, além da identificação de compostos voláteis por CG-EM.;
- ✓ Avaliar o perfil quali-quantitativo de ácidos graxos e de compostos voláteis da fração lipídica dos *Z. atratus*.
- ✓ Avaliar a estabilidade termo-oxidativa da fração lipídica do *Z. atratus* por meio das análises de TGA, DSC, Rancimat e PetrOXY;
- ✓ Avaliação da composição centesimal do sólido remanescente da extração por prensagem da fração lipídica *Z. atratus*.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O uso de insetos como fonte alimentar

A entomofagia, que é como se denomina o uso de insetos na alimentação, é um hábito ancestral, cultural, e que já é observado desde a descoberta dos primeiros hominídeos. O consumo alimentar de insetos pelo homem é uma prática comum para algumas etnias na América do Sul, África e Ásia. No Brasil, povos indígenas e outras comunidades tradicionais que residem nas regiões norte e nordeste também são adeptos a esse hábito, como é o caso do consumo das formigas do gênero *Atta*, que são as saúvas, ou tanajuras (Macedo et al, 2017; Gahukar, 2011). Outros produtos naturais que são produzidos por insetos têm seu uso normalizado na sociedade ocidental, como o mel e a própolis, produzidos pelas abelhas, e a seda, produzidas pelo bicho-da-seda (Costa-Neto, 2003).

Atualmente, o maior interesse nos insetos como fonte de alimentos decorre não somente do aspecto nutricional, que é positivamente promissor, mas também do fato de sua produção se encaixar em modelos economicamente e ambientalmente sustentáveis. Uma das formas de diminuir o impacto ambiental a partir da produção de alimentos seria promover a adoção de alternativas à carne e aos derivados lácteos por outras fontes proteicas, pois a produção de proteínas tradicionais, como as provenientes do gado, traz consigo, um alto grau de impacto negativo no ambiente, por conta da emissão de gases estufa, do uso de terras, energia, entre outros aspectos (Huis et al, 2021; Jensen et al. 2021).

No aspecto sustentabilidade, o cultivo de insetos supera a produção do gado, pois pode ser realizado em modelo de economia circular: neste, a produção, o processamento, a distribuição, o consumo e o resíduo gerado nos processos envolvendo o alimento, produzem um impacto ambiental mínimo, além de retroalimentarem a própria produção (Ojha, 2020). Ademais, o cultivo de insetos pode ser realizado em zonas não-apropriadas para a agricultura, sendo aplicável em produção de larga escala e com ciclo de vida muito mais rápido quando comparado às culturas tradicionais. Por exemplo, uma única fêmea de grilo-doméstico (*Acheta domesticus*) pode colocar até 1500 ovos em um mês, enquanto uma vaca costuma produzir 4 filhotes durante seu ciclo de vida (Gahukar, 2011). Além disso, outras são as vantagens das culturas de inseto frente às culturas tradicionais: insetos apresentam maior facilidade de cultivo, acentuada velocidade de crescimento, dispensam a necessidade de terras agriculturáveis, apresentam a possibilidade de utilizarem resíduos industriais de diferentes fontes como “ração”, dispensando também o consumo de grandes volumes de água tratada e terra (Van Huis et al, 2021). Esse potencial positivo já é vislumbrado no setor de produção de ração para gado e

outras culturas. Mas, mais do que isso, não apenas as vantagens quanto ao cultivo, a importância dos insetos no cenário da agropecuária também permeia seu valor nutricional, que já é reconhecido no contexto de alimentação para seres humanos. Por exemplo, insetos como o *Tenebrio molitor* têm sido incorporados em barras de cereais e farinhas proteicas, oferecendo uma alternativa sustentável e rica em nutrientes para a dieta humana. (Gahukar, 2011).

Mesmo diante dessa realidade, o consumo de insetos como alimento por humanos ainda é alvo de muito preconceito, visto que esses animais são associados à sujeira, à falta de higiene, além de serem tidos como veículos de doenças (Cheung & Moraes, 2016). Contudo, frente ao crescimento populacional e a necessidade de reduzir os impactos ambientais no cenário de produção alimentícia atual, se faz necessário buscar novas fontes alimentícias, sem que haja a perda do valor nutricional, característica marcante das culturas tradicionais, como gado, porco e aves (Varelas, 2019).

Diversos são os insetos que podem ser introduzidos na alimentação humana, como aqueles dos gêneros Lepidoptera (eg. Mariposas), Orthoptera (eg. Grilos) e Hymenoptera (eg. Formigas). Mas, dentre eles, a ordem dos besouros Coleoptera ganha destaque, por tratar-se da maior ordem do reino animal, contando com mais de 360.000 espécies. Algumas famílias desses besouros têm ganhado destaque na literatura científica devido à sua importância industrial, que é o caso do *Tenebrio molitor* (“mealworm”) e o *Zophobas morio*, ou *Zophobas atratus* (“superworm”). O *T. Molitor* é uma das espécies de inseto mais difundidas no setor de alimentação mundial e, em 2021, a Comissão Europeia de Segurança Alimentar, através do Regulamento 2015/2283, passou a autorizar o uso das larvas dessa espécie em alimentos para consumo humano, bem como garantiu a sua segurança alimentar, fortalecendo ainda mais seu consumo como alimento ou como ingrediente na fabricação de barras de cereais, massas, biscoitos e em rações para animais (EFSA, 2021).

Imagem 1: Representação do *Tenebrio molitor* e *Zophobas morio*



Fonte: alamy.com

Embora os dados científicos do *T. Molitor* estejam mais disponíveis na literatura, não se pode dizer o mesmo sobre os dados do *Z. morio*; esse último ainda apresenta estudos escassos, uma vez que o uso industrial do *T. Molitor* já está bem consolidado. Porém, devido à semelhança genômica entre as duas espécies, estudos sobre *T. molitor* podem servir como referência para investigações sobre *Z. morio*, permitindo avaliar seu potencial em diversas aplicações. O *Z. morio* tem sido estudado por suas características nutricionais, incluindo alto teor proteico e presença de lipídios benéficos, o que o torna promissor para a alimentação animal, produção de ingredientes proteicos para consumo humano e até no reaproveitamento de resíduos orgânicos, contribuindo para modelos mais sustentáveis na indústria alimentícia e na economia circular (Rumbos & Athanassiou, 2021).

3.2 Importância nutricional dos insetos

Um dos maiores potenciais vislumbrados na entomofagia é, sem dúvidas, a possibilidade do consumo de insetos como fonte alimentícia de alto valor nutritivo (Mariod, 2013). As proteínas são o principal componente nutricional de um inseto, podendo representar até 60% do seu conteúdo em base seca. Não obstante, já foi observado que os insetos constituem uma fonte de outros nutrientes essenciais, como lipídeos, vitaminas e minerais, em teores semelhantes aos de outros alimentos já inseridos na dieta humana, como carnes e vegetais. (Huis et al. 2021).

Tabela 1 – Comparação do Perfil Nutricional de Insetos com a Carne Bovina

Componente	<i>Zophobas atratus</i>	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Acheta domesticus</i>	Carne Bovina
Proteínas	30-40%	40-50%	50-60%	20-30%
Lipídios	30-50%	20-30%	10-20%	10-30%
Ácidos Graxos	Alta concentração de ômega-6 e ômega-3	Rica em ômega-6, baixo em ômega-3	Equilíbrio de ômega-6 e ômega-3	Predominantemente saturados
Carboidratos	5-10%	10-20%	10-20%	0%

Vitaminas B	B1, B2, B12, Ácido Fólico	B1, B2, B12, Ácido Fólico	B1, B2, B12, Ácido Fólico	B12, B6, niacina
Vitamina A	Presente, quantidade variável	Presente, variável	Presente, variável	Baixa quantidade
Vitamina D	Variável, depende da dieta	Baixa, mas presente	Baixa	Presente, principalmente em fígado
Minerais	Ferro, zinco, magnésio, cálcio	Ferro, zinco, magnésio, cálcio	Ferro, zinco, magnésio, cálcio	Ferro, zinco, fósforo

Fonte: Adaptado de Stull (2021).

Estudos como o de Stull (2021) demonstram que os insetos possuem um perfil nutricional comparável ao da carne bovina, destacando-se por sua elevada concentração de proteínas e ácidos graxos essenciais, além de um baixo teor de carboidratos. A Tabela 1 apresenta essa comparação detalhada, evidenciando as quantidades de proteínas, lipídios, vitaminas e minerais em diferentes espécies de insetos em relação à carne bovina.

Os insetos analisados exibem um teor proteico superior ao da carne bovina, podendo alcançar até 60% de sua composição, tornando-se uma alternativa altamente proteica. Além disso, diferentemente da carne bovina, que contém predominantemente ácidos graxos saturados, algumas espécies de insetos apresentam um equilíbrio entre ômega-3 e ômega-6, contribuindo para a saúde cardiovascular (Stull, 2021)

No que se refere às vitaminas, os insetos oferecem uma ampla gama de vitaminas do complexo B, incluindo B12, essencial para a função neurológica e a formação de glóbulos vermelhos. Os minerais presentes, como ferro, zinco, magnésio e cálcio, são essenciais para diversas funções metabólicas, reforçando o valor nutricional dessas espécies (Stull, 2021)

Dessa forma, Stull (2021) não apenas ilustra a diversidade nutricional entre as diferentes espécies de insetos, mas também evidencia seu potencial como alternativa viável para a alimentação humana. Considerando os desafios ambientais e a busca por fontes de proteína

sustentáveis, os insetos surgem como uma alternativa para dietas mais equilibradas e ecologicamente responsáveis.

O valor nutricional varia de acordo com o estágio de metamorfose do inseto: o conteúdo de alguns nutrientes pode variar em proporção quando o inseto está nas fases de ovo, larva, pupa ou imago (que é a fase adulta) (Huis et al. 2021). Utilizando *Tenebrio molitor* como modelo, percebe-se que o teor de nutrientes varia entre os estágios de desenvolvimento do inseto, conforme ilustrado na Tabela 2. Segundo Ravzanaadii et al. (2012) e Finke (2002), o maior teor de proteínas, variando entre 49% e 52%, ocorre na fase adulta, enquanto os estágios larval e de pupa apresentam a maior concentração de lipídios, entre 31% e 36%.

Tabela 2 – Composição centesimal aproximada de nutrientes em base seca (g/100g) de *Zophobas atratus* em diferentes estágios de vida.

Nutriente	Estágio de vida		
	Larvas	Pupas	Adultos
Proteínas	49 - 52	51 - 53	63 - 65
Lipídios	31-35	32-36	7-15

Fonte: (Ravzanaadii et al, 2012; Finke, 2002).

A predominância de proteínas na fase adulta se deve à necessidade de manter estruturas corporais resistentes e funcionais. O exoesqueleto dos besouros adultos é composto por quitina e proteínas estruturais, que conferem rigidez e proteção ao organismo (Ruppert et al, 2005). Além disso, essa fase é voltada para a reprodução, e proteínas são fundamentais para a produção de gametas, hormônios e enzimas envolvidas nesse processo. A alta demanda proteica reflete a necessidade de um corpo bem desenvolvido e preparado para a reprodução e sobrevivência no ambiente (Ruppert et al, 2005).

Por outro lado, o maior teor de lipídios nas fases larval e de pupa está associado ao crescimento e à metamorfose. Durante a fase larval, o inseto se alimenta ativamente e acumula gordura como reserva energética, necessária para sustentar seu metabolismo acelerado. Já na fase de pupa, o inseto não se alimenta e depende exclusivamente dessas reservas lipídicas para completar a transformação para adulto. O uso de lipídios como fonte de energia é uma estratégia eficiente, pois essas moléculas possuem alto valor calórico e garantem a sobrevivência do inseto até a emergência do besouro adulto (Ruppert et al, 2005). Além de seu papel fisiológico, esse alto teor lipídico tem despertado interesse na extração de óleos a partir de insetos, visto que

podem servir como alternativa sustentável aos óleos vegetais e de origem animal. Óleos extraídos de larvas de *Tenebrio molitor* têm sido estudados para aplicações na indústria alimentícia, cosmética e até mesmo como biocombustível, dada a sua composição rica em ácidos graxos benéficos (Kim et al., 2022; Ramos-Elorduy et al., 2022; Oliveira et al., 2023; Yi et al., 2022).

3.3 Conteúdo lipídico em insetos

Os insetos são ricos em ácidos graxos e, devido ao fato de a maior parte de seus lipídios se apresentar na forma líquida, com alta fluidez em temperatura ambiente, é comum que os autores se refiram a esse conteúdo lipídico como "óleo" (Lucas et al., 2020).

Assim como ocorre com outros nutrientes, a quantidade de lipídios nos insetos varia conforme a espécie, a alimentação e o estágio de vida ou metamorfose do animal (Tzompasosa et al., 2014). Além disso, a proporção entre os ácidos graxos ômega-6 e ômega-3 pode ser modulada pela composição da ração fornecida ao inseto, o que representa um aspecto positivo para o enriquecimento nutricional do produto final. Foi observado também que, embora os insetos não sintetizem colesterol endogenamente, é possível incorporá-lo ao seu perfil lipídico ao incluí-lo na dieta oferecida (Huis et al., 2021).

Embora a composição lipídica varie entre as espécies, estima-se que cerca de 80% dos lipídios presentes nos insetos estejam na forma de triacilgliceróis, enquanto o restante corresponde a fosfolipídios e colesterol, predominantes nas membranas celulares. Os ácidos graxos mais abundantes em *Zophobas morio*, assim como em outras espécies comestíveis, incluem os saturados, ácido palmítico (C16:0) e ácido esteárico (C18:0). Entre os monoinsaturados, destacam-se os ácidos palmitoleico (C16:1n7) e oleico (C18:1n9), enquanto os poli-insaturados mais representativos são os ácidos linoleico (C18:2n6), α -linolênico (C18:3n3) e γ -linolênico (C18:3n6), essenciais para a nutrição humana, pois precisam ser obtidos por meio da dieta (Huis et al., 2021; Lucas et al., 2020). A ingestão desses ácidos graxos tem sido associada a diversos benefícios à saúde, especialmente à redução do risco de doenças cardiovasculares e neurológicas (Rodríguez et al., 2016).

Tabela 3: Composição quantitativa e qualitativa de ácidos graxos saturados e poli-insaturados em insetos comestíveis com índice de qualidade lipídica (IQL)

Espécie de Inseto	Teor de Lipídios (%)	Ácidos Graxos Saturados (%)	Ácidos Graxos Poli-insaturados (%)	Ácidos Graxos Monoinsaturados (%)	IQL
<i>Zophobas morio</i>	7–15%	28%	50%	22%	1,8
<i>Tenebrio molitor</i>	37,2%	18%	55%	27%	3,1

Fontes: Adaptado de Tzompa-Sosa, D. A., et al. (2014; 2021)

O Quadro 3 apresenta dados sobre a composição de ácidos graxos em duas diferentes espécies de insetos comestíveis, destacando a quantidade de lipídios e os índices de qualidade lipídica (IQL). Esses dados reforçam que os insetos possuem uma fração significativa de ácidos graxos poli-insaturados, especialmente ômega-6 e ômega-3, o que os torna uma excelente fonte de lipídios saudáveis. A relação entre ácidos poli-insaturados e saturados (IQL) é vantajosa, proporcionando um perfil lipídico semelhante ao de óleos vegetais e gorduras animais (Tzompa-Sosa, 2014; Tzompa-Soza 2021).

Essa similaridade na composição lipídica sugere que os óleos extraídos de insetos podem apresentar características sensoriais comparáveis às dos óleos vegetais, facilitando sua aceitação no mercado. Isso abre possibilidades para seu uso em aplicações alimentícias, seja como substituto parcial ou total de óleos convencionais, contribuindo para alternativas nutricionais e sustentáveis (Mariod, 2013).

A extração de óleos de insetos exige técnicas específicas, pois seus ácidos graxos estão armazenados em gotículas lipídicas sob o tegumento, tornando a escolha do método de extração um fator crucial para preservar a qualidade do óleo (Purschke et al., 2016). Diversas técnicas podem ser aplicadas, cada uma com vantagens e limitações. Os métodos tradicionais incluem a extração com solventes orgânicos, como hexano e éter de petróleo, utilizando o aparelho de Soxhlet.

Embora eficazes na recuperação dos lipídios, esses métodos envolvem o uso de solventes potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, devido ao risco de contaminação

(Ramos-Bueno et al., 2016). Já a prensagem a frio, por dispensar altas temperaturas e solventes, surge como uma alternativa mais ecológica, preservando as propriedades nutricionais dos lipídios, especialmente o perfil de ácidos graxos poli-insaturados. No entanto, essa técnica pode apresentar menor rendimento, especialmente em insetos com baixo teor de lipídios (Purschke et al., 2016).

Nos últimos anos, a extração com CO₂ supercrítico tem ganhado destaque como uma abordagem eficiente e sustentável. Esse método não utiliza solventes orgânicos, garantindo um óleo de alta qualidade com melhor preservação dos ácidos graxos essenciais. Além disso, proporciona rendimentos mais elevados do que a prensagem a frio (Ramos-Bueno et al., 2016). Estudos indicam que a extração com CO₂ supercrítico preserva o perfil lipídico dos insetos, aspecto fundamental para a saúde humana, especialmente devido à presença dos ácidos graxos poli-insaturados (Purschke et al., 2016). Com a crescente demanda por insetos como fonte alimentar e para a indústria de ração animal, há uma tendência de adoção de métodos de extração mais sustentáveis e baratos, minimizando o uso de solventes orgânicos e alinhando-se aos princípios da economia circular (Purschke et al., 2016; Ramos-Bueno et al., 2016).

3.4 Incorporação de óleos de insetos em alimentos para humanos

Alguns estudos já foram realizados sobre a incorporação de proteínas de insetos isoladas em alimentos, porém ainda são escassos os artigos científicos que citam o uso de óleo de inseto como ingrediente em produtos finalizados. Dentre eles, destaca-se o estudo de Cheseto et al. (2020), que incorporou o óleo dos insetos adultos *Ruspolia differens* e *Schistocerca gregaria* em biscoitos, com o objetivo de avaliar a aceitação do público diante de alimentos produzidos à base de insetos.

Além disso, Smetana et al. (2020) exploraram a viabilidade da substituição parcial de gorduras convencionais por óleos extraídos de larvas de *Hermetia illucens* e *Tenebrio molitor* na formulação de margarina. O estudo demonstrou que esses óleos podem ser utilizados como alternativas sustentáveis às gorduras vegetais tradicionais, reduzindo a dependência de óleos de palma e outras fontes convencionais que possuem alto impacto ambiental. Os resultados indicaram que a margarina formulada com óleos de insetos apresentou estabilidade aceitável e propriedades reológicas compatíveis com os produtos comercialmente disponíveis, abrindo novas possibilidades para o uso desses lipídios em alimentos processados.

Contudo, o potencial dos óleos de insetos não se limita apenas à indústria alimentícia. Essas matérias-primas também podem ser aproveitadas na indústria cosmética, devido à presença de compostos bioativos benéficos para a pele, além de terem aplicações promissoras

na produção de biocombustíveis, contribuindo para soluções mais sustentáveis no setor energético (Surendra et al., 2016; Verheyen et al., 2018).

Entretanto, para que a incorporação em alimentos para humanos seja realizada, é necessário que haja um lastro de segurança nesses ingredientes. Nesse sentido, apesar de apresentar um potencial extremamente positivo no tocante às propriedades nutricionais, as pesquisas quanto à segurança alimentar de insetos ainda são limitadas, quanto ao uso em humanos. Algumas possíveis desvantagens incluem a contaminação microbiológica, a presença de alérgenos e resíduos de substâncias indesejáveis no óleo. A criação de insetos pode acarretar a acumulação de patógenos, como bactérias e fungos, o que exige cuidados rigorosos na produção e armazenamento (Zhang et al., 2019). Além disso, o óleo de insetos pode conter resíduos de solventes utilizados na extração, como o hexano, que representam riscos para a saúde (Ramos-Bueno et al., 2016). Embora o perfil lipídico dos óleos de insetos seja vantajoso, com ácidos graxos insaturados benéficos, um desequilíbrio entre ômega-6 e ômega-3 pode ser prejudicial à saúde, contribuindo para inflamações (Simopoulos, 2008). Outro ponto importante é o potencial alérgico, pois alguns indivíduos podem desenvolver reações devido às proteínas presentes nos insetos (Kluepfel et al., 2020). Outra desvantagem é proveniente da possível contaminação durante o cultivo desses animais com agentes tóxicos, como metais pesados e micotoxinas. Esses aspectos relacionados à segurança alimentar ainda precisam ser explorados com mais afinco, principalmente por agências reguladoras. Apesar disso, a toxicidade do óleo de *T. molitor* já foi avaliada em ratos e classificada como baixa, o que é um sinal positivo para sua aplicação em humanos (Alves et al., 2019). Portanto, a segurança alimentar desses ingredientes precisa ser cuidadosamente avaliada para garantir sua aceitação no mercado.

Fruto de destaque, os ácidos graxos poliinsaturados apresentam em sua estrutura múltiplas ligações insaturadas, o que os deixam susceptível a oxidação lipídica. Essa reação é uma das principais causas de deterioração em óleos e gorduras e se inicia quando um ácido graxo poliinsaturado reage com o oxigênio na forma de radical livre, formando um radical hidroperóxido, produto primário da reação de oxidação. Esse radical é responsável pelo início de uma reação em cadeia chamada “peroxidação lipídica”, que também pode ser iniciada por outros fatores físico-químicos, como luz ultravioleta, altas temperaturas ou até mesmo sistemas enzimáticos, como as lipoxigenases e os citocromos. O resultado dessa reação é rancidez: a degradação dos hidroperóxidos em produtos de degradação secundários, que são compostos voláteis, como álcoois, aldeídos e cetonas, traz efeitos negativos sensoriais para os alimentos, pois trata-se de substâncias que afetam não só o sabor, como também o odor e o valor nutritivo do alimento (Geng et al, 2023; Zhang et al, 2021; Duarte et al, 2018). A deterioração química

de óleos e gorduras tem impacto negativo no valor nutricional dos óleos, uma vez que os hidroperóxidos podem contribuir para o surgimento de doenças, como câncer e aterosclerose (Zhang et al, 2021).

3.5 Avaliação da deterioração química de óleos e gorduras

A oxidação é um desfecho inevitável dos lipídeos. Assim, a estabilidade oxidativa de óleos comestíveis é a capacidade de um óleo de manter-se livre de produtos de deterioração por um determinado período de tempo, e é um dos mais importantes parâmetros de qualidade desses produtos (Duarte et al, 2018). Além de auxiliar a determinação da vida de prateleira, trata-se de um parâmetro de segurança, pois os métodos de avaliação da deterioração de óleos e gorduras baseiam-se, principalmente, na determinação de produtos oriundos de processos oxidativos, como os hidroperóxidos (Maszewska et al, 2018; Zhang et al, 2021). Logo, tendo em vista a importância desse parâmetro para o alimento e sua comercialização, existem alguns métodos disponíveis para a determinação do grau de oxidação lipídica de óleos e gorduras.

Diversos métodos são utilizados para a avaliação da peroxidação lipídica em óleos: os mais populares são os índices de peróxido e de acidez, que são os principais métodos preconizados pela AOCS (Zhang et al., 2021; Knothe, 2002). O índice de peróxido é utilizado para monitorar o avanço da rancidez no lipídio, determinando o estado de “pré-rancidez” por meio da quantificação de peróxidos e hidroperóxidos formados na oxidação inicial dos ácidos graxos insaturados. Já o índice de acidez mede a quantidade de ácidos graxos livres na amostra, os quais são oriundos da hidrólise dos triacilgliceróis e contribuem para a redução do pH do meio (Geng et al., 2023).

A determinação do perfil de ácidos graxos também traz informações importantes sobre a estabilidade oxidativa de um óleo, pois o processo de auto-oxidação de ácidos graxos insaturados é determinado pelo número e posição das insaturações na cadeia carbônica (Knothe, 2002). Assim, quanto maior a concentração de ácidos graxos insaturados e poliinsaturados, maior a susceptibilidade de um óleo a degradações de natureza oxidativa. Por outro lado, quanto maior o percentual de ácidos saturados e monoinsaturados, a tendência é que esse o óleo seja mais resistente à oxidação, o que promove a manutenção de suas propriedades nutricionais por maior tempo (Duarte et al. 2018).

Além dos métodos tradicionais, outros testes são utilizados para a avaliação da estabilidade oxidativa, sendo amplamente aplicados na indústria do biodiesel. Esses métodos simulam condições extremas de oxidação e, diferentemente dos tradicionais, não se baseiam na produção direta de hidroperóxidos. Na indústria de alimentos, essas análises são essenciais para

monitorar a degradação dos lipídios, prevenindo a rancificação e garantindo a qualidade e segurança dos produtos. Além disso, auxiliam no controle de qualidade, no desenvolvimento de formulações mais estáveis e no cumprimento de regulamentações, contribuindo para a preservação das características sensoriais e nutricionais dos alimentos ao longo de sua vida útil. (Duarte et al, 2018; Murta Valle et al, 2014).

Assim, o tempo de indução no Rancimat refere-se ao período, medido em horas, que antecede a etapa de aceleração da reação em cadeia da oxidação. Ele baseia-se na detecção de ácidos voláteis produzidos pela oxidação da amostra, os quais alteram a condutividade da água. Dessa forma, quanto maior o tempo de indução, maior a estabilidade oxidativa de um óleo (Jeon et al., 2016). Além disso, o Rancimat é amplamente utilizado para avaliar a estabilidade oxidativa de óleos e gorduras em diferentes matrizes alimentares, sendo um método de referência para estudos de conservação e qualidade lipídica. Já o método de análise PetroOXY tem como vantagem o tempo de análise que é menor frente ao Rancimat, uma vez que nessa técnica é aplicado oxigênio pressurizado, o que acelera o processo de oxidação. Apesar disso, o PetroOXY ainda é pouco utilizado para análise de óleos comestíveis. Outra desvantagem do PetroOXY é que seus dados também permitem a correlação direta entre o tempo de prateleira e o tempo de indução, porém o tempo de indução por ele avaliado permite que seja identificado o período no qual ocorrem as primeiras etapas da oxidação da amostra (Duarte et al. 2018).

Dessa maneira, a escolha do método analítico para avaliação da estabilidade oxidativa de óleos e gorduras deve considerar as características da matriz analisada, o tempo disponível para análise e a finalidade do estudo. Embora o Rancimat continue sendo amplamente adotado por sua confiabilidade e padronização (Jeon et al., 2016), métodos mais recentes como o PetroOXY surgem como alternativas promissoras, especialmente quando se busca maior agilidade nos resultados (Duarte et al., 2018). No entanto, sua aplicação ainda demanda maior validação no contexto dos óleos comestíveis. A compreensão das vantagens e limitações de cada técnica é essencial para garantir a precisão dos dados obtidos e a adequada interpretação dos resultados em estudos voltados à qualidade e conservação de lipídios.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

As larvas da espécie de *Z. atratus* utilizadas nesse estudo foram obtidas em criador específico, situado na cidade de Salvador-BA. Foram obtidos aproximadamente 4 kg de larvas alimentadas com farelo de trigo e em estágio de vida próximo ao último instar (0,7 g; 0,5 cm). Todos os reagentes e solventes utilizados no preparo de soluções foram de grau analítico. O padrão de β -caroteno (7235-40-7) e ácidos graxos (189-19) foram adquiridos da Sigma–Aldrich.

4.2 Métodos

4.2.1 Extração da fração lipídica das larvas de *Z. atratus*

As larvas foram mantidas por 24 horas sem alimentação para o esvaziamento gástrico (Broekhoven et al, 2015). Após esse período, as larvas foram limpas em água corrente e abatidas por congelamento à temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em seguida, o material congelado foi liofilizado (Liofilizador L101, Liobras, São Carlos, Brasil) durante 72 horas resultando em teor de umidade total de 2% (MX-50 Moisture Analyzer, A&D, Japão). Após a secagem por liofilização, as amostras foram mantidas congeladas em ultra freezer, até a extração da fração lipídica (FL).

O material liofilizado foi equilibrado em temperatura ambiente e em seguida submetido à prensagem utilizando uma mini prensa automática (ZS ZY-22A, Zonesun, China) para a extração da FL seguindo o método descrito por Matthäus e colaboradores (2018) com temperatura fixada em $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. A fração sólida, obtida após a extração da FL e nomeada torta, foi congelada $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para caracterização.

A FL resultante foi centrifugada a $22,500 \times g$ por 15 minutos a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CR22N, Hitachi, Japão). Em seguida, a FL líquida e o precipitado foram congelados em freezer ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) para caracterização.

O rendimento da extração da FL foi determinado de acordo com a Equação 1:

$$FL(\%) = \frac{\text{Massa da FL}}{\text{Massa das larvas secas}} * 100\%$$

4.2.2 Avaliação das características físico-químicas da fração lipídica extraída das larvas de *Z. atratus*

4.2.2.1 Colorimetria

A determinação da cor da FL foi realizada seguindo o método descrito por Nascimento e colaboradores (2022). As medidas de cor da amostra foram realizadas em um colorímetro de bancada CM-5 (Konica Minolta, Japão), em modo de transmitância, calibrado para branco a 100%, utilizando o iluminante D65 e o sistema de leitura CIELAB, obtendo valores de brilho (L^*), croma (c^*) e matiz (h^*) em triplicata. Foram calculados os valores de L^* (luminosidade), a^* (intensidade da cor verde a vermelho) e b^* (intensidade da cor amarela a azul).

4.2.2.2 Índice de acidez

O índice de acidez (IA) foi determinado seguindo o método descrito pela American Oil Chemists Society (AOCS) Cd 3d-63. A neutralização de 1 grama de FL foi realizada com uma solução de NaOH 0,01 N, utilizando fenolftaleína como indicador. Os ensaios foram realizados em triplicata.

4.2.2.3 Índice de peroxidação

A determinação do índice de peróxidos (IP) foi realizada utilizando o método do tiocianato férrico descrito na norma International Dairy Federation (IDF) 74A: 1991. Para preparar a solução de cloreto de ferro (II), 0,4 g de cloreto de bário dihidratado foram dissolvidos em 50 mL de água. Esta solução foi adicionada lentamente e com agitação constante a uma solução de sulfato de ferro (II) (0,5 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dissolvido em 50 mL de água). Dois mililitros de ácido clorídrico 10 N foram adicionados à solução resultante. O precipitado de sulfato de bário foi filtrado resultando em uma solução de ferro (II) límpida que foi armazenada ao abrigo de luz. Para preparar a solução de tiocianato de amônio, 30 g de tiocianato de amônio foram dissolvidos em água, e o volume foi completado para 100 mL.

Após o preparo das soluções, 0,3 g de amostra foram diluídas em 9,8 mL de uma solução de clorofórmio-metanol (7:1, v v⁻¹) com auxílio de um agitador vórtex por 4 segundos. Foram adicionados de 50 µL de tiocianato de amônio e agitados (4 s). Em seguida, foram adicionados 50 µL de cloreto de ferro (II) e agitados novamente (4 s). A mistura foi mantida por 5 minutos a temperatura ambiente para obtenção do valor de absorbância em 500 nm contra um branco de reagentes (Lambda 25, Perkin–Elmer) por espectrometria de absorção na região do visível.

A determinação do IP foi realizada utilizando os dados de uma curva analítica externa de Fe (III) e seguindo a equação 2:

$$\text{índice de peróxido (meq/Kg)} = \frac{A_s - A_b}{(55,48 * M) + (M_0 * 2)} \quad \text{Eq. 2}$$

Na Eq. 2, a absorvância da amostra (A_s), absorvância do branco (A_b), inclinação da reta obtida por calibração externa (M), massa da amostra em gramas (M_0) e massa atômica do ferro (55,84), foram utilizados para expressar o IP em miliequivalentes de peróxido por quilograma de amostra. O denominador da Eq. 2 fornece a concentração de Fe^{2+} oxidada a Fe^{3+} em microgramas. A divisão pelo fator 2 é necessária para expressar os valores de peróxido em miliequivalentes de peróxido em vez de miliequivalentes de oxigênio, conforme mencionado no método IDF 74A: 1991.

4.2.2.4 Espectrometria de absorção na região do Uv–visível e determinação de β –caroteno

Uma alíquota de uma solução da FL preparada em éter de petróleo ($0,1 \text{ g mL}^{-1}$) foi transferida para uma cubeta de quartzo e submetida a leitura em um espectrofotômetro Lambda 25 (Perkin–Elmer, USA), operando em modo varredura entre 200 e 700 nm com passo de 2 nm. O instrumento foi zerado com o solvente antes de adquirir o espectro da amostra.

A determinação de β –caroteno foi realizada por calibração externa em 450 nm (Corbu, 2019). Uma solução estoque de β –caroteno (400 mg L^{-1}) foi preparada em éter de petróleo. Em seguida, as absorvâncias de sete diluições preparadas a partir da solução estoque ($5\text{--}160 \text{ mg L}^{-1}$) foram coletadas. Os valores das absorvâncias e concentrações foram diretamente proporcionais e altamente correlacionados por um ajuste linear ($R^2 = 0,9956$). O resultado foi expresso em mg de β –caroteno por grama de FL como a média de uma triplicata da leitura e o desvio padrão.

4.2.2.5 Espectrometria na região do infravermelho vermelho com transformada de Fourier acoplada ao dispositivo de reflectância total atenuada

O espectro de infravermelho da FL foi obtido utilizando um espectrômetro Spectrum Two (Perkin–Elmer, USA) equipado com um dispositivo de reflectância total atenuada (ATR) com cristal ZnSe. Os espectros foram adquiridos em temperatura ambiente, acumulando 64 varreduras com resolução de 2 cm^{-1} .

4.2.2.6 Espectrometria de ressonância magnética nuclear

O espectro de ressonância magnética nuclear do próton (^1H RMN) foi obtido em um espectrômetro Bruker Ascend 400 MHz (Bruker, USA) a 27 °C. Uma alíquota da FL foi diluída em CDCl_3 e transferida para um tubo de RMN de 5 mm. A aquisição foi realizada domínio de tempo; largura de pulso de 90°, 9,3 μs ; largura espectral de 16 ppm e tempo de relaxação de 2 s. Sessenta e quatro varreduras foram acumuladas para cada decaimento de indução livre. A correção da linha de base, obtenção dos deslocamentos químicos e áreas absolutas dos picos foi realizada utilizando software TopSpin 4.4.1 (Bruker, USA).

4.2.3 Avaliação dos compostos voláteis extraídos da fração lipídica por cromatografia gasosa

Os compostos voláteis foram extraídos, separados e identificados pela combinação das técnicas de extração por *headspace* e microextração em fase sólida com a cromatografia gasosa acoplada ao detector de espectrometria de massas (HS–SPME–GC–MS). O método descrito por Perez-Santaescolastica e colaboradores (2023) foi adaptado para a avaliação dos compostos voláteis. Inicialmente, os frascos de *headspace* contendo 0,1 g da FL foram incubados por 10 minutos a 45 °C em agitador termostático. Em seguida, uma fibra de divinilbenzeno/carboxeno/polidimetilsiloxano (DVB/CAR/PDMS) de 50 μm / 30 μm de espessura (Supelco, Sigma-Aldrich, Bornem, Bélgica) foi exposta ao *headspace* por 50 min a 45 °C e introduzida no sistema GC–MS com auxílio de um amostrador automático Pal System PAL RSI 85.

Os analitos foram separados e identificados em um cromatógrafo a gás G3540A (Agilent Technologies, California, USA) acoplado ao detector de espectrometria de massas 5977B (Agilent Technologies, California, USA), operando no modo de injeção *splitless* com liner ultra inerte (Sngl toper, Wool 5190-2293, USA), hélio como gás de arraste em fluxo constante de 0,6 mL min^{-1} e coluna de separação HP-5MS (30.0 m $\times$ 0.25 mm I.D $\times$ 0.25 μm , Restek®, Bellefonte, USA). A rampa de aquecimento foi programada para iniciar a 30 °C e permanecer por 4 min, evoluindo para 50 °C (2 °C min^{-1}), em seguida para 120°C (4 °C min^{-1}) e finalizando a 280 °C (15°C min^{-1}). O sistema de injeção e a linha de transferência foram mantidos a 250 °C. A corrente iônica total (70 eV) foi registrada na faixa de massa de 35 a 350 m/z em modo varredura.

Os dados foram avaliados através do software MassHunter Qualitative Analysis 10.0 (Agilent Technologies, Califórnia, EUA). Os picos foram identificados comparando seus espectros de massa com o banco do National Institute of Standards and Technology (NIST,

versão 20, Gaithersburg, USA), com uma correspondência espectral expressa em pelo menos 80% (Utrilla Vázquez, 2020). A identificação dos picos foi assistida pela determinação do índice de Kováts de padrões de alcanos (C8–C20) e sua comparação com dados disponíveis na literatura. Alguns compostos de interesse foram selecionados apenas com correspondência espectral. A estimativa do conteúdo de cada composto identificado foi calculada por meio da normalização das áreas dos cromatogramas utilizando os valores absolutos das integrações das áreas dos picos (Andrade et al., 2021).

4.2.4 Avaliação do perfil de ácidos graxos por cromatografia gasosa e determinação dos índices de qualidade nutricional

Os ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG) foram obtidos a partir da derivatização da FL com base no método descrito por Nascimento e colaboradores, 2022. A transesterificação dos lipídios totais foi realizada pela adição de uma alíquota da FL (0,025 gramas) a uma solução metanólica de NaOH (0,5 M) e BF₃ (12%, m v⁻¹). Os EMAG foram extraídos com isooctano para a realização das análises cromatográficas.

A separação dos EMAG foi realizada em cromatógrafo a gás acoplado ao detector de espectrometria de massas QP2010 (Shimadzu, Kyoto, Japão) equipado com coluna capilar Durabond (DB-23, 30 m x 0.25 mm x 0.25 µm). Aproximadamente 1 µL de solução contendo os EMAG foi introduzido no sistema de injeção (230 °C) operando em modo *split* com razão 1:50. A programação de temperatura do forno iniciou com 90 °C e evoluiu com o seguinte gradiente de temperatura: 90–150 °C (3 °C min⁻¹), 150–200 °C (5 °C min⁻¹) e 200–230 °C (3 °C min⁻¹), utilizando hélio como gás de arraste (1 mL min⁻¹). A corrente iônica total (70 eV) foi registrada na faixa de massa de 35 a 350 m/z em modo varredura. A identificação dos analitos foi realizada utilizando software GCMSsolution Ver.2.6. (Shimadzu, Kyoto, Japão), comparando os espectros de massa dos picos com uma biblioteca NIST (NIST, versão 20, Gaithersburg, USA) com pelo menos 80% de similaridade. A quantificação foi realizada pela normalização das áreas dos picos identificados na amostra.

Com base no perfil de AG, as classes foram caracterizadas considerando os AG saturados (SFA, AG sem ligações duplas), AG monoinsaturados (MUFA, AG com uma única ligação dupla), AG polinsaturados (PUFA, AG com 2 ou mais ligações duplas) e AG insaturados (UFA, todos os AG com ligações duplas).

Os índices de aterogenicidade (AI), trombogenicidade (TI), hiporcolesterolemia/hipercolesterolemia (h/H) e oxidabilidade (COX) foram calculados com

base no perfil de AG obtidos por cromatografia gasosa de acordo com as equações 2 (Ulbricht, 1991), 3 (Fernández, 2007), 4 (Fernández, 2007), 5 (Fernández, 2014) respectivamente.

$$AI = \frac{[(C_{12:0} + (4 * C_{14:0}) + C_{16:0})]}{(PUFA + MUFA)} \quad \text{Eq. 2}$$

$$TI = \frac{(C_{14:0} + C_{16:0} + C_{18:0})}{[(0,5 * MUFA) + (0,5 * n6 - PUFA) + (3 * n3 - PUFA) + \left(\frac{n3}{n6}\right)]} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\frac{h}{H} = \frac{(C_{18:1} + \Sigma PUFA)}{(C_{12:0} + C_{14:0} + C_{16:0})} \quad \text{Eq. 4}$$

$$COX = \frac{(C_{18:1}) + (10,3 * C_{18:2}) + (21,6 * C_{18:3})}{100} \quad \text{Eq. 5}$$

4.2.5 Análises térmicas

4.2.5.1 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial

As análises de termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) foram realizadas em um analisador térmico simultâneo modelo SDT650 (TA Instruments, USA). Aproximadamente 7 mg da FL foram pesados em cadinho de alumina para líquidos e submetidos a análise com atmosfera de ar sintético (50 mL min⁻¹) e razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ na faixa de 25–700 °C. As medidas de *onset* e pico foram adquiridas a partir das curvas obtidas utilizando o software TRIOS (TA Instruments, USA).

4.2.5.2 Transições de fusão e cristalização avaliadas por calorimetria exploratória diferencial

DSC modelo Q100 (TA Instruments, USA) equipado com uma unidade de resfriamento RCS 40. Aproximadamente 3 mg da FL foram pesadas em cadinho hermético de alumínio e submetidos a um ciclo térmico de aquecimento de 30 °C a 60 °C (4 °C min⁻¹), seguido de resfriamento de 60 °C a -40 °C (4 °C min⁻¹) e um segundo aquecimento de -40 °C a 60 °C (4 °C min⁻¹), em fluxo constante de N₂ (40 mL min⁻¹). As medidas de *onset* e pico foram adquiridas utilizando o software TRIOS (TA Instruments, USA).

O teste de OOT foi realizado utilizando aproximadamente 3 mg de amostra pesada em cadinho de alumina aberto e razão de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, entre 25–300 $^{\circ}\text{C}$. Duas corridas foram realizadas com atmosferas de oxigênio e ar sintético, ambas com fluxo constante de 50 mL min^{-1} . A avaliação de OIT foi realizada com aproximadamente 3 mg de amostra, em cadinho de alumina aberto, com transição de atmosfera dinâmica (50 mL min^{-1}) durante a corrida. O ensaio iniciou em atmosfera de nitrogênio, com temperatura inicial de 50 $^{\circ}\text{C}$, evoluindo para 160 $^{\circ}\text{C}$ ($20.0\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$) mantidos por 5 minutos. Na sequência, a atmosfera do forno foi substituída por oxigênio e mantendo os 160 $^{\circ}\text{C}$ por 100 minutos. As determinações de temperatura onset (T_{onset}) dos eventos térmicos foram realizadas pelo software TRIOS (TA Instruments, USA).

4.2.5.3 Período de indução por Rancimat e por PetroOXY

O período de indução da FL foi avaliado de acordo com o método Rancimat oficial AOCS Cd 12b-92. Dois gramas da FL foram oxidados em um equipamento Rancimat (Metrohm 873, Herisau, Suíça) a 110 $^{\circ}\text{C}$, sob fluxo constante de ar sintético de 10 L h^{-1} . O período de indução foi determinado utilizando software Racimat software 1.1, a partir do ponto de inflexão da curva de condutividade elétrica ($\mu\text{s cm}^{-1}$) em função do tempo (h).

Adicionalmente, o período de indução da FL também foi avaliado seguindo o método PetroOXY ASTM D7545-09. Cinco mililitros da FL foram aquecidos na câmara de ensaio pressurizada com oxigênio (700 kPa) a 110 $^{\circ}\text{C}$ em um analisador PetroOXY (Petrotest Instruments, Alemanha). O período de indução foi determinado a partir da relação de consumo de oxigênio da amostra e o tempo de queda de pressão no sistema em 10%.

4.2.5.4 Avaliação da composição centesimal do sólido remanescente da extração por prensagem

A composição centesimal do sólido remanescente após a prensagem foi avaliada seguindo o método oficial da AOAC. O teor de proteínas foi determinado pelo método clássico de Kjeldahl, utilizando o 4,76 como fator de conversão (Janssen, 2017; AOAC International, 2019). O teor de lipídios foi determinado por gravimetria após extração pelo método de Bligh–Dyer. Os teores de fibras e cinzas totais foram determinados por gravimetria após extração por detergente ácido e utilizando um forno mufla (Lavoisier 402-D, São Paulo, Brazil) a 550 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. O teor de carboidratos foi determinado a partir do cálculo

pela diferença das frações centesimais.

5 RESULTADOS

5.1 Rendimento da extração da fração lipídica

O rendimento do processo de extração da FL por prensagem foi de 36% (m m^{-1}). Esse resultado foi $\sim 16\%$ maior em relação a extração por prensagem a frio realizada em larvas de *Hermetia illucens* (Srisuksai, 2024; Surendra, 2016) e pode ser explicado pelas diferenças anatômicas e fisiológicas entre as espécies.

A quantidade e composição do *fat body* e epicutícula (Shaw, 1963) nas larvas dos insetos, por exemplo, influenciam diretamente no rendimento de extração das FL. A maioria dos lipídios dos insetos estão armazenados na forma de triacilglicerídeo (TAG), uma molécula biossintetizada a partir de carboidratos, proteínas e AG livres. Como a biossíntese dos TAG ocorre majoritariamente no *fat body*, quanto mais abundante esse tecido nas larvas, maior será o rendimento de extração da FL. A epicutícula e suas subcamadas de cuticulina e de cera, são compostas essencialmente de lipídios integrados em um complexo proteína-polifenol responsáveis pela integridade estrutural do exoesqueleto dos insetos e por prevenir a desidratação (Chapman, 2012).

Além das diferenças anatômicas e fisiológicas das larvas dos insetos, os baixos teores de fibra (i.e., $<10\% \text{ m m}^{-1}$) são apontados como possíveis responsáveis pela diminuição da contrapressão nas prensas mecânicas, diminuindo o rendimento de extração da FL. Nas prensas mecânicas modernas, a extração da FL pode ser favorecida com o aumento controlado da temperatura para favorecer a fusão dos lipídios e consequente escoamento.

Vale a pena ressaltar que a FL extraída por prensagem contém não apenas lipídios estruturais e utilizados como fonte energética pelos insetos, mas outros compostos de natureza lipofílica como, por exemplo, esteróis, vitaminas e metabólitos secundários que são solubilizados no conteúdo líquido durante a prensagem mecânica. As FL extraídas também não estão isentas de sólidos dispersos oriundos da fragmentação dos tecidos.

5.2 Avaliação das características físico-químicas da fração lipídica

5.2.1 Colorimetria, índice de acidez e índice de peroxidação

Os resultados da avaliação colorimétrica da FL estão apresentados na Tabela 1. Os resultados do ensaio colorimétrico são consistentes com o amarelo claro notado na inspeção visual da FL, um atributo típico de óleos edíveis (Lee, 2022). A FL apresentou o parâmetro L^*

relativamente elevado quando comparado a outras frações lipídicas extraídas de insetos, como o *T. molitor* (Jeon, 2016; Son, 2020). Scores do parâmetro L^* próximos a 90 são considerados elevados e caracterizam amostras de óleos edíveis ou frações lipídicas claras de elevado potencial tecnológico (Ramos Escudero, 2019), pois estão frequentemente associados a percepção de um produto fresco. Os valores dos parâmetros a^* e b^* encontrados nesse estudo foram comparáveis aos da fração lipídica extraída da pupa de *Bombyx mori* (Chantakun, 2024). Os scores do parâmetro b próximos a 80 estão associados à presença de biomoléculas como, por exemplo, os carotenoides. Apesar de os insetos aparentemente não serem capazes de biosintetizar carotenoides, eles podem ingerir e bioacumular esses compostos por meio da alimentação.

A FL apresentou IA de cerca de 5 vezes o valor máximo aceitável para óleos prensados a frio e não refinados de 4,0 miligramas de KOH grama de óleo⁻¹ (CODEZ ALIMENTARIUS, 2024) (Tabela 1). O elevado IA foi associado ao emprego de temperatura (40 °C) na prensa, para auxiliar na extração da FL. A combinação da pressão e temperatura pode ter auxiliado na hidrólise dos TAG, resultando no aumento de AG livres (Siow, 2021) que são diretamente proporcionais ao IA já que o método tem como princípio uma reação de neutralização.

Tabela 1 – Avaliação colorimétrica (L^* , a^* e b^*), índices de acidez e de peroxidação da fração lipídica extraída de *Z. atratus* por prensagem

L^*	$83,71 \pm 0,247$
a^*	$17,56 \pm 0,26$
b^*	$88,13 \pm 0,41$
Índice de acidez (mg de KOH g de óleo ⁻¹)	$20,06 \pm 0,06$
Índice de peroxidação (mEq Kg ⁻¹)	$1,50 \pm 0,27$

L = lightness; a = redness; b = yellowness.

Siow e colaboradores, 2021 reportaram um valor de IA (21,57 mg KOH g⁻¹) semelhante ao encontrado nesse estudo (Tabela 1) para um óleo extraído de *T. molitor* utilizando éter de petróleo em aparato Soxhlet a 50 °C por 5 horas, corroborando a hipótese da hidrólise dos TAG e liberação dos AG. Jeon e colaboradores, 2016, Son e colaboradores, 2020 e Zheng e colaboradores, 2013 reportaram IA dos óleos extraídos a frio das larvas de *T. molitor* utilizando n-hexano, de 0,93, 2,6 e 7,6 mg de KOH g de óleo⁻¹, respectivamente. Leung e colaboradores, 2012 (Leung, 2012) reportaram IA dos óleos extraídos a frio das larvas de *Z. atratus* utilizando

n-hexano, de 2,17 mg de KOH g de óleo⁻¹. As evidentes discrepâncias entre os valores de IA analisadas em diferentes estudos que utilizaram métodos de extração a frio e temperaturas de até 50 °C, reforçam a hipótese da liberação dos AG pela hidrólise dos TAG com consequente aumento no IA.

A FL apresentou índice de peroxidação de aproximadamente um décimo do valor máximo aceitável para óleos prensados a frio e não refinados de 15 mEq de O₂ Kg⁻¹ (Tabela 1). O baixo valor de índice de peroxidação foi atribuído ao baixo teor de umidade das larvas liofilizadas (2%) e ao processo de prensagem com temperatura amena (40 °C). Assim como o IA, o IP também serve como um indicador da qualidade do óleo. Os valores mais baixos de IP implicam em qualidade superior do óleo devido à oxidação e rancidez reduzidas. A oxidação ocorre quando os óleos são expostos ao oxigênio, resultando na formação de hidroperóxidos como produtos primários de oxidação antes de se decomporem em compostos de baixa massa molecular com flavor ruim (Shahidi, 2022).

Phuah e colaboradores, 2024 (Phuah, 2024) , reportaram índices de peroxidação de óleos obtidos por extração líquido-líquido em um sistema de água-tert-butanol acidificado (1:1 v v⁻¹, pH 4,5) de 34,59 mEq Kg⁻¹ (*R. ferrugineus*), 16,83 mEq Kg⁻¹ (*Z. morio*) e 50,50 mEq Kg⁻¹ (*A. domesticus*). Apesar da escassez de dados de IP avaliados nas FL das larvas de *Z. atratus*, o alto teor de água utilizado por Phuah e colaboradores, 2024 na extração líquido-líquido corroboram o aumento expressivo no IP quando comparados ao obtido nesse estudo. Sieger e colaboradores, 2017 (Siger, 2017), também reportaram a direta proporcionalidade entre os IP e os teores de umidade e as temperaturas de secagem das sementes de canola submetidas a prensagem a frio e a quente.

Apesar de o baixo valor IP ser bem explicado pelas condições de obtenção e análise da FL fresca, a ação de compostos antioxidantes não está excluída. Os antioxidantes eliminam radicais livres, como por exemplo, os radicais lipídicos alquil hidroxila ou lipídicos peroxila. Adicionalmente, também extinguem o oxigênio singlete. A estabilização de radicais livres ou moléculas reativas ocorre pela doação de átomos de hidrogênio dos antioxidantes e resultam em produtos de reação mais estáveis. No geral, a existência de antioxidantes limita a oxidação em gorduras e óleos, resultando em valores de oxidação secundária mais baixos (Ugur, 2020).

Portanto, os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam o potencial de aplicação industrial da FL extraída das larvas de *Z. atratus* por seus atributos de cor e baixo valor de peroxidação, apesar do alto valor IA.

5.2.2 Espectroscopias nas regiões do Uv–visível, infravermelho médio e de ^1H RMN.

A Figura 1 mostra o espectro de absorção nas regiões do UV e visível da FL. A varredura na região do Uv até ~ 315 nm apresenta absorbância muito alta que pode ser associada à abundância dos grupos carbonila e etilênicos, típicos de AG esterificados ao TAG e dos grupos carboxila de AG livres (Burr, 1941; Didham, 2019). Além desses, os aldeídos, cetonas, compostos carbonílicos α , β insaturados e dienos conjugados também absorvem entre 280 nm e 320 nm e podem estar presentes em amostras de natureza lipídica como a FL, contribuindo para o aumento do sinal e até saturação da resposta do detector.

A alta absorção até ~ 315 nm resulta da convolução de sinais que dificulta a interpretação nessa região espectral. Em contraste, a região do visível permite a distinção de algumas bandas espectrais com máximos em 401 nm, 426 nm, 449 nm e 473 nm (Figura 1). Essa avaliação preliminar da FL fornece indícios da presença de compostos minoritários que podem ter sido eluídos juntamente com os lipídios durante o processo de prensagem como, por exemplo, os carotenoides que são muito lipofílicos (Zanqui, 2021; Cruz, 2023).

A classe dos carotenoides contém mais de 600 compostos de ocorrência natural sintetizados por plantas, algas e bactérias que podem ser bioacumulados por alguns insetos (Borel, 2021). Esses compostos apresentam cores variáveis entre o amarelo, vermelho e laranja, portanto, podem dar origem às bandas espectrais notadas entre 400 nm e 500 nm (Scott, 2001), como pode ser visto na Figura 1. A amostra apresentou $16,75 \pm 1,73$ mg de β -caroteno 100 g⁻¹ de FL, um valor comparável aos óleos de chia (~ 23 mg 100 g⁻¹) e gergelim (~ 27 mg 100 g⁻¹), inferior a oleína de palma crua (~ 70 mg 100 g⁻¹) (Ng, 2016) e superior ao óleo das larvas de *H. ilucens* (0,45 mg 100 g⁻¹). Além do teor de β -caroteno reportado, vale a pena ressaltar a presença de outros cromóforos não quantificados entre 400 nm e 500 nm que devem corresponder aos outros carotenoides presentes na FL corroborando o resultado do parâmetro b da colorimetria (seção 3.2.1).

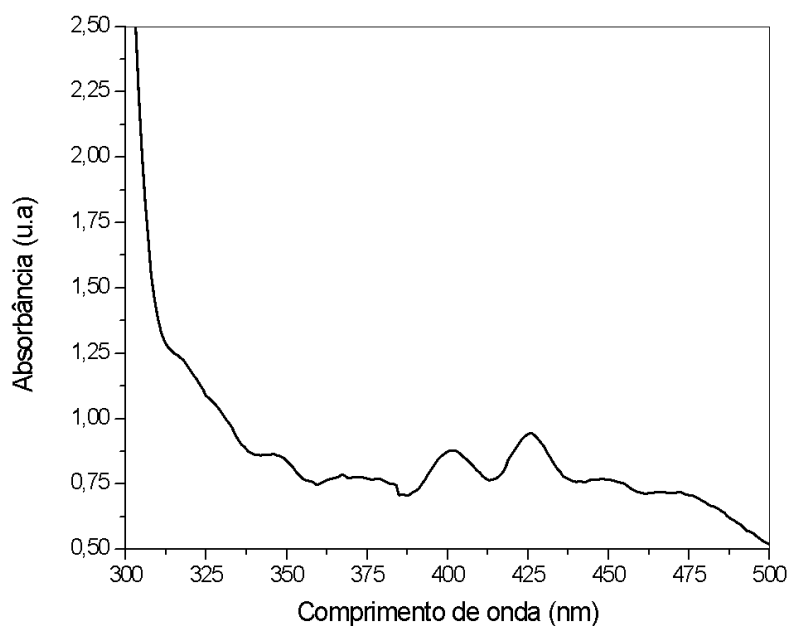


Figura 1 – Espectro Uv-visível da fração lipídica extraída das larvas de *Z. atratus*.

A Figura 2 mostra o espectro de infravermelho da FL. O perfil espectral obtido é consistente com a presença do TAG como componente majoritário na FL que é uma molécula importante em óleos e gorduras edíveis (Yang, 2005). As bandas espectrais correspondentes aos modos de vibração típicos dos TAG esterificados com diferentes tipos de AG podem ser observadas em torno de 2922 cm^{-1} (alongamento C–H assimétrico), 2854 cm^{-1} (alongamento C–H simétrico), 1744 cm^{-1} (alongamento C=O), 1448 cm^{-1} (dobramento C–H em tesoura), 1162 cm^{-1} (alongamento C–O e dobramento C–H) e 694 cm^{-1} (dobramento C–H fora do plano) (Mendez-Sanchez, 2024; Santos, 2021). Nós também observamos duas absorções convoluídas com máximos em 3060 cm^{-1} e 3026 cm^{-1} , pouco reportadas nesse tipo de amostra que correspondem a estiramentos =C–H. (Malek, 2019)

As bandas com máximos em 752 cm^{-1} e 540 cm^{-1} foram associadas aos estiramentos simétricos P–O–P e dobramentos O–P–O (Mohan Babu, 2020). Apesar de não apresentarem correlações óbvias com a estrutura do TAG, as absorções em 752 cm^{-1} e 540 cm^{-1} reforçam a hipótese da presença de compostos minoritários na FL, como os fosfolipídios.

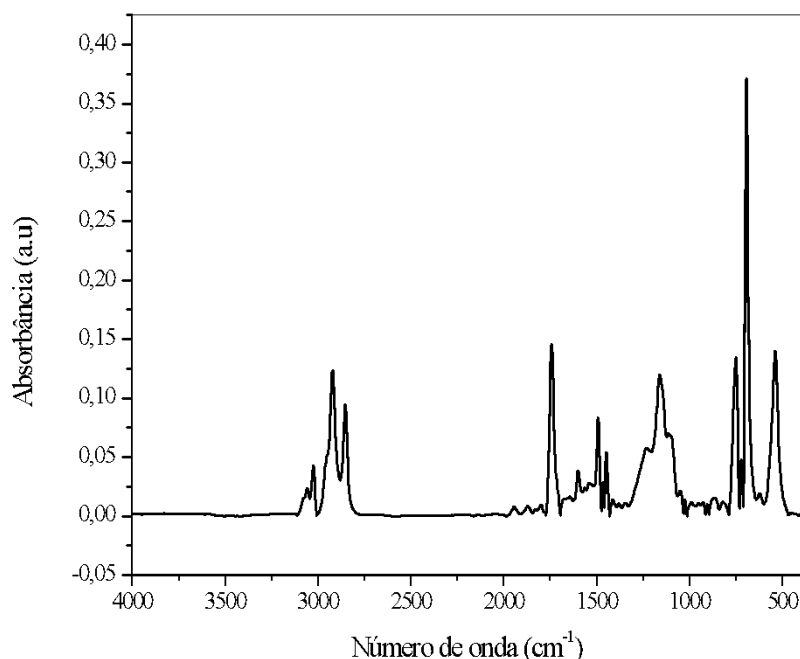


Figura 2 – Espectro de infravermelho da fração lipídica extraída das larvas de *Z. atratus*.

A Figura 3 mostra o espectro de RMN de ^1H da FL. Os dez sinais identificados oriundos de prótons em diferentes ambientes químicos apresentaram intensidades variáveis. A atribuição dos sinais pode ser vista na Tabela 2. Nós comparamos os sinais espectroscópicos observados nesse estudo com os reportados por Guillén e Ruiz, 2003 em um estudo avançado de ^1H RMN envolvendo 14 óleos edíveis.

O sinal 1 consiste na sobreposição de um tripleto de prótons de grupos metila saturados com grupos acil dos ácidos oleico e linoleico (0,83–0,93 ppm). O sinal 2 corresponde a um tripleto devido aos prótons metílicos dos grupos acil n-3 e aparece entre 0,93–1,03 ppm. O sinal 3 de maior intensidade relativa, está atribuído aos prótons dos grupos metileno na posição β , ou mais distante, dos grupos olefínicos, ou na posição γ , em relação ao éster do ácido graxo no TAG (1,22–1,42 ppm). Os sinais 4 e 6 são atribuídos aos prótons metilênicos nas posições β e α , em relação ao éster do ácido graxo no TAG (1,52–1,70 ppm e 2,23–2,36 ppm, respetivamente). O sinal 5, está atribuído aos prótons α metilênicos em relação a uma única insaturação, também conhecidos como prótons alílicos (1,94–2,14 ppm). O sinal 7 é oriundo de uma convolução de sinais de prótons α metilênicos em relação a duas insaturações, conhecidos como prótons bis-alílicos (2,70–2,84 ppm). O sinal 8 é oriundo de prótons dos carbonos 1 e 3 do glicerol (4,10–4,32 ppm). O sinal 9 é oriundo dos prótons do carbono 2 do glicerol (5,20–5,26 ppm) que está muito próximo ao sinal 10 atribuído aos prótons olefínicos de diferentes

grupos acila (5,26–5,40 ppm). O sinal de baixa intensidade relativa observado em campo baixo (7,27 ppm) foi atribuído ao conteúdo residual de clorofórmio em CDCl_3 (NMR, 2024).

A combinação das espectroscopias Uv-vis, FTIR–ATR e ^1H RMN define a FL extraída das larvas de *Z. atratus* como um conteúdo majoritário do TAG esterificado com AG saturados e insaturados. Apesar de limitados pela convolução de sinais, as técnicas espectroscópicas utilizadas também demonstraram a presença de compostos minoritários. Além dos carotenoides, os lipídios extraídos de insetos também podem conter fosfolipídios, tocoferóis, tocotrienóis, compostos fenólicos e esteróis (Cruz, 2025).

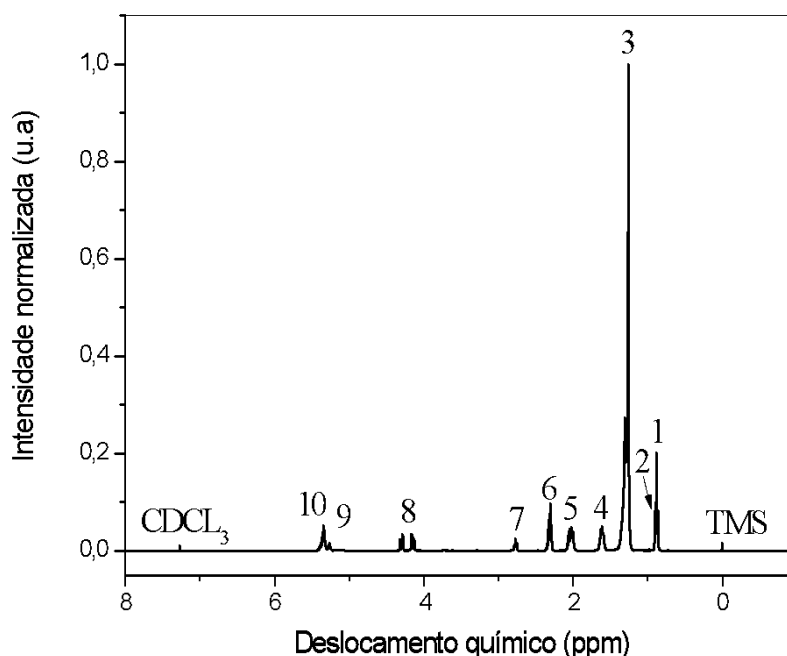


Figura 3 – Espectro de ressonância magnética nuclear de ^1H da fração lipídica extraída das larvas de *Z. atratus*.

Tabela 2 – Atribuição dos sinais espectroscópicos de ^1H RMN com os grupos funcionais e descrição da correspondência estrutural

Sinal	Deslocamento químico (ppm)	Correspondência estrutural	Descrição da correspondência estrutural
1	0,83–0,93	$-\text{CH}_3$	Saturados e de cadeias acil
2	0,93–1,03	$-\text{CH}_3$	Cadeias acil do ácido linolênico
3	1,22 –1,42	$-(\text{CH}_2)_n$	Cadeias acil

4	1,52–1,70	–OCO–CH ₂ –CH ₂ –	Cadeias acil
5	1,94–2,14	–CH ₂ –CH=CH–	Cadeias acil
6	2,23–2,36	–OCO–CH ₂ –	Cadeias acil
7	2,70–2,84	=HC–CH ₂ –CH=	Cadeias acil
8	4,10–4,32	–CH ₂ OCOR	C1 e C3 do glicerol
9	5,20–5,26	–CHOCOR	C2 do glicerol
10	5,26–5,40	–CH=CH–	Cadeias acil

Os dados da Tabela 2 são baseados em Guillén, 2003

5.2.3 Análise de compostos voláteis

Cinquenta compostos voláteis foram identificados na FL extraída de *Z. atratus* por HS–SPME–GC–MS. Os analitos identificados foram classificados em 13 grupos químicos (Figura 4). Apesar da necessidade de procedimentos de calibração e validação para a quantificação dos analitos, a técnica de HS–SPME–GC–MS tem sido utilizada para a estimativa das quantidades relativas dos compostos voláteis em insetos edíveis (Hospital, 2012). A etapa de adsorção dos analitos volatilizados no *headspace* pela fibra de SPME é determinante no perfil de compostos voláteis. Nós priorizamos a comparação do perfil de compostos voláteis obtido nesse estudo com outros previamente reportados na literatura (Tzompa-sosa, 2019; Zolnierczyk, 2021) que também utilizaram uma fibra de DVB/CAR/PDMS e condições de pré-concentração de amostra similares.

O grupo dos álcoois apresentou maior conteúdo (24,81%) principalmente pela presença de 1-decanol (73,68%), responsável pelos aromas de gordura e óleo. Esse achado corrobora a nossa percepção durante a extração e manipulação da FL de *Z. atratus* em laboratório. O 2,3-butanediol (10,57%) também foi identificado, sendo responsável pelos aromas de manteiga de cacau, doce, frutas e floral (Tabela 3). Esses mesmos compostos foram identificados por Perez-Santaescolastica e colaboradores (2023) no óleo proveniente de *T. molitor*.

O grupo das amidas e o indol foi o segundo com maior conteúdo (22,68%), com a predominância de 5-Amino-1-metil-1H-pirazol-4-carboxamida (83,5%) e do indol (16,5%). De uma maneira geral, os compostos classificados no grupo das amidas estão frequentemente associados a percepções de odor desagradáveis nos produtos destinados a consumo humano. O indol, por exemplo, pode conferir odor fecal quanto maior for a sua concentração (Perez-Santaescolastica, 2022)

Os grupos dos fenóis (9,16%), hidrocarbonetos (8,26%) e pirazinas (7,91%) aparecem

em menor proporção em relação aos álcoois e amidas (Figura 4). Dentre os compostos identificados nesses três grupos, a 2,5-metilpirazina (71,24%), trimetilpirazina (12,74%), metilpirazina (9,01%) e 2-etil-6-metilpirazina (7,01%) (Tabela 3) podem aumentar o potencial de aceitação da FL por serem associadas à percepção do sabor cozido e assado aos alimentos. Zolnierczyk & Szumny (2021), avaliaram o impacto do assamento das larvas de *Z. atratus* no perfil de compostos voláteis por HS-SPME-GC-MS. Dentre os 48 compostos identificados, a predominância de pirazinas e compostos carbonílicos foi associada ao aroma de pratos assados baseados em carne, batatas e pão. A 2,5-metilpirazina, por exemplo, está associada a percepção do aroma de queimado e os autores classificaram a larva assada com “cheiro intenso de bacon assado”, agradável ao paladar.

O grupo dos ésteres (5,20%) foi caracterizados pela presença de octanoato de etila (68,40%) e acetato de decila (18,72%) que estão associados a percepção do odor característico das gorduras e algumas frutas. No grupo das cetonas, (4,45%), a presença de acetoína (74,29%), 2-heptanona (24,16%) e 5-metil-3-hexen-2-ona (1,55%) pode conferir boa aceitação sensorial da FL por serem associadas a aromas de especiarias. No grupo de aldeídos (3,16%), foram encontrados o nonanal (52,45%), heptanal (12,21%) e benzaldeído (12,40%), associados a percepção do odor característico das gorduras e odores cítricos (Tabela 3). Liu e colaboradores, 2020, Liu e colaboradores, 2020 e Silva e colaboradores, 2020, reportaram que os aldeídos lineares como, por exemplo, o heptanal e nonanal, podem resultar da degradação oxidativa de gorduras insaturadas e AG livres, principalmente os ácidos oleico, linoleico e araquidônico. Os aldeídos ramificados como o benzaldeído são oriundos das reações de Maillard e degradações de Strecker. A predominância de aldeídos lineares reportadas na Tabela 3 corroboram os achados de Perez-Santaescolastica e colaboradores, 2022 que destacam que quase metade dos aldeídos identificados em óleo de insetos são de estrutura linear.

Nos grupos de monoterpenos (3,03%), furanos (0,94%) e ácido (0,97%) foram detectados a presença de 3-careno (64,32%), β -sabineno (15,96%), D-limoneno (12,07%) e p-cimeno (7,65%). Além de estarem associados a odores característicos, como por exemplo, o cítrico, esses compostos são conhecidos por suas propriedades antioxidantes e anticarcinogênicas.

Além do indol, outros compostos identificados no grupo dos fenóis, como o fenol (88,04%) e o guaiacol (3,50%) podem estar associados aos *off-flavors* na FL extraída. A percepção de aromas de alimentos queimados, por exemplo, pode impactar negativamente na

aceitação do produto pelo consumidor.

Apesar de o grupo dos álcoois e amidas terem apresentado as maiores áreas relativas, os hidrocarbonetos e aldeídos apresentaram a maior variedade de compostos identificados (Figura 4, Tabela 3). A susceptibilidade dos AG livres na FL aos processos de rancidez oxidativa frequentemente resultam em compostos de massa molecular inferior, como os hidrocarbonetos e aldeídos identificados (Tabela 3). O elevado índice de acidez da FL (Tabela 1) corrobora a presença dos produtos de hidrólise dos AG. Liu e colaboradores, 2020, reportaram que a maior variedade de compostos voláteis presentes em óleos edíveis pode ser decorrente de um elevado conteúdo de AG insaturados. O ácido linolênico, por exemplo, é um ácido graxo altamente suscetível à oxidação podendo gerar substâncias voláteis, mesmo em temperatura ambiente.

Os compostos voláteis são gerados a partir de diversas reações complexas, incluindo fermentação de carboidratos e processos proteolíticos e lipolíticos. Além disso, AG livres, aminoácidos e peptídeos atuam como substratos para reações subsequentes, como oxidação, degradação de Strecker e reações de Maillard, que são expressivamente influenciadas pelo processamento, especialmente por tratamentos térmicos. Como resultado, diversos compostos voláteis são produzidos, conferindo características aromáticas distintas do produto conservado. Apesar da identificação de 50 analitos na FL extraída, nem todos os compostos voláteis contribuem substancialmente para na percepção do aroma, como por exemplo, os hidrocarbonetos, que por serem inodoros não estão associados a percepção de aromas.

Portanto, a caracterização dos compostos voláteis da FL extraída das larvas de *Z. atratus* é fundamental para futuras aplicações industriais deste produto, pois a aceitação sensorial está intimamente relacionada aos aromas e sabores desenvolvidos pelas substâncias voláteis. Adicionalmente, a caracterização dos compostos voláteis é fundamental para o direcionamento e aplicação de técnicas de processamento como refinamento, desacidificação, branqueamento e desodorização, amplamente utilizadas na indústria. Essas técnicas podem modular os aspectos sensoriais da FL extraída, favorecendo o seu uso em alimentos, rações e cosméticos.

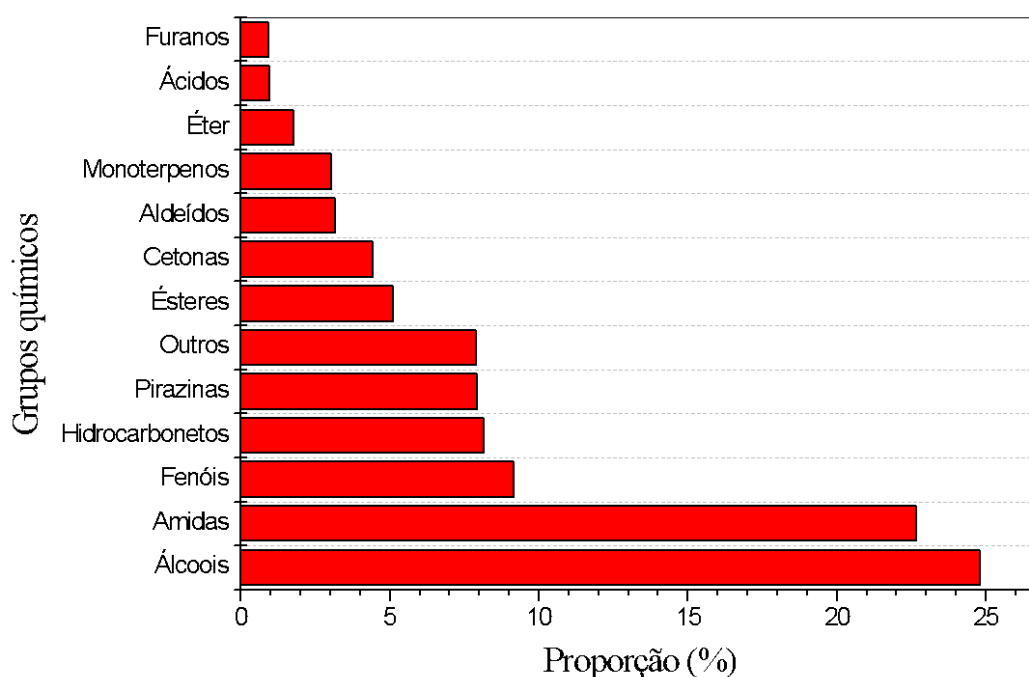


Figura 4 – Compostos voláteis da FL analisados por HS–SPME–GC–MS. Proporções relativas dos compostos identificados e classificados em 13 grupos químicos obtidas por normalização das áreas dos picos

Tabela 3 – Compostos voláteis da FL extraída das larvas de *Z. atratus* analisados por HS–SPME–GC–MS

Grupo	Tr (min)	Composto	Descrição do odor*	Área dos picos (%)
<i>Ácidos</i>				
1	40,52	n-Decanoic acid	-	100,00
<i>Álcoois</i>				
2	7,77	2,3-Butanediol	Manteiga de cacau, doce, frutado, floral	10,57
3	24,46	1-(2-metóxi-1-metiletóxi)-2-propanol	-	5,91
4	33,58	1-(2-Butoxi-etoxi)-etanol	-	8,46
5	37,02	1-Decanol	Gordura, óleo	73,68
6	42,62	1-Dodecanol	-	1,38
<i>Aldeídos</i>				
7	14,43	Heptanal	Cítrico, gordura, noz	21,21
8	19,21	Benzaldeído	Amêndoa amarga, açúcar queimado, cereja, malte, pimenta torrada	12,40
9	25,06	5-Etilciclopent-1-	-	3,86

		enecarboxaldeído		
10	25,89	Benzenoacetaldeído	-	5,19
11	29,54	Nonanal	Gordura, floral, limão	52,45
12	32,22	4-Etilbenzaldeído		13,89
<i>Amidas</i>				
13	37,82	Indol	Queimado, naftalina, fecal	16,50
14	39,49	5-Amino-1-metil-1H-pirazol-4-carboxamida	-	83,50
<i>Ester</i>				
15	33,97	Octanoato de etila	Damasco, brandy, gordura, floral, abacaxi	68,40
16	41,45	Acetato de decila	Óleo, laranja	18,72
17	44,27	Dietil ftalato		12,88
<i>Éter</i>				
18	46,38	Éter difenílico de etilenoglicol	-	100,00
<i>Furanos</i>				
19	22,41	2-Pentifurano	Manteiga, floral, fruta, feijão verde	84,13
20	33,07	2-Metilbenzofurano		15,87
<i>Hidrocarbonetos</i>				
21	11,41	Etilbenzeno	-	2,55
22	11,91	p-xileno	-	5,50
23	13,43	1,3-dimetil-benzeno	-	2,87
24	14,24	Nonano	-	2,97
25	26,13	Decahidro-naftaleno	-	0,79
26	27,20	1-metil-4-n-propilbenzeno	-	6,15
27	27,33	2-metildecano	-	6,67
28	27,82	1-Ethyl-3,5-dimethylbenzene	-	2,02
29	29,31	Undecano	-	7,72
30	30,21	2-Metildecalina	-	0,90
31	31,61	1,2,3,4-Tetrametilbenzeno	-	8,06
32	37,70	2-Metilnaftaleno	-	7,54
33	40,62	1,2,4-Trimetoxibenzeno	-	2,16
34	42,85	1-Pentadeceno	-	44,11
<i>Cetonas</i>				
35	4,44	Acetoína	Manteiga, cremoso, pimenta verde	74,29
56	4,89	5-metil-3-hexen-2-ona	Fruta	1,55
37	13,73	2-heptanona	Queijo azul, fruta, noz	24,60
<i>Monoterpenos</i>				
38	20,54	β-sabineno	-	15,96
39	23,44	3-careno	-	64,32
40	24,80	D-limoneno	Citrus, menta	12,07
41	27,89	p-cimeno	Citrus, solvente	7,65
<i>Outros</i>				
42	2,64	Triclorometano	-	50,64
43	15,50	Oxima metoxi fenil	-	49,36
<i>Fenóis</i>				

44	22,04	Fenol	-	88,04
45	28,58	Guaiacol (2-metoxifenol)	Queimado, fenol, madeira	3,50
46	32,69	3-etilfenol	-	8,46
<i>Pirazinas</i>				
47	9,36	Metilpirazina	Alimento cozido, cacau,	9,01
48	14,82	2,5-dimetilpirazina	avelã, nozes assadas,	71,24
49	23,06	2-etil-6-metilpirazina	chocolate, torrado	7,01
50	23,15	Trimetilpirazina		12,74

*A descrição dos odores da Tabela 3 está baseada no trabalho de Perez-Santaescolastica e colaboradores, 2022.

5.2.4 Determinação do perfil de ácidos graxos e índices de qualidade nutricional

Treze AG foram identificados na FL extraída de *Z. atratus* (Tabela 4). O ácido palmítico foi o mais abundante (C16:0, 36%) seguido dos ácidos oléico (C18:1 n -9, 29%) e linoléico (C18:2 n -6, 22%) que somados representaram quase 90% do perfil de AG avaliado. Tanto Nascimento e colaboradores, 2022 quanto Araújo e colaboradores, 2019 também reportaram perfis de AG de larvas da mesma espécie semelhantes ao avaliado nesse estudo (Araujo, 2019).

A proporção dos AG identificados na Tabela 4 parece corroborar as suas origens considerando a dieta e biossíntese nos insetos. A biossíntese de AG tem como produto majoritário o C16:0 que encerra o ciclo de reações catalisadas pelas enzimas do complexo ácido graxo sintase após formar um ácido graxo saturado de 16 carbonos (Menendez, 2007). O ácido esteárico (C18:0) é comumente encontrado em gorduras animais por resultar da elongação de cadeia realizada pela enzima palmitoil coenzima A (Dinh, 2021), muito embora não apresente nenhuma relação óbvia com reações de biohidrogenação no trato digestivo dos insetos. Os ácidos graxos insaturados como, por exemplo, o C18:1 n -9 e C18:2 n -6 são ingeridos na dieta e provavelmente não sofrem biohidrogenação, como nos animais ruminantes.

A determinação do perfil de AG de óleos edíveis e frações lipídicas extraídas de insetos é fundamental para antecipar potenciais aplicações industriais e para consumo humano e animal (Lorenzo, 2016). A preponderância de AG insaturados faz com que óleos edíveis e a FL estejam mais susceptíveis a degradações de natureza oxidativa (Maszewska, 2018). Além disso, os métodos de extração também podem alterar a qualidade das FL obtidas. As técnicas de extração baseadas em fluidos supercríticos como, por exemplo, o CO₂ (Kieronczyk, 2018) e n-propano pressurizado, tendem a conservar a qualidade intrínseca dos lipídios com elevados rendimentos de extração, mas não estão amplamente disponíveis pois envolvem custos elevados. As extrações realizadas em prensas mecânicas também são

conhecidas por conservar a qualidade intrínseca dos lipídios, mas apresentam os menores rendimentos de extração.

A FL apresentou aproximadamente 54% de UFA e 45% de SFA (Tabela 4). O perfil de AG da FL apresenta maior teor de SFA (~ 45%) e menor teor de MUFA (~ 31%) quando comparado com perfil de AG dos óleos de *T. molitor* e *Z. morio* (SFA ~ 35% e MUFA ~ 42%) (Dragojlovic, 2022) e dos óleos de oliva (SFA ~18%, MUFA 74%) (Figueiredo, 2024; Assy, 2010), indicando potencial estabilidade oxidativa. O teor de PUFA da FL (~23%, Tabela 4) é comparável ao de outros insetos como *T. molitor* e *Z. morio* (24%–37%).

Os índices de qualidade nutricional são calculados a partir do perfil de AG. As métricas AI, TI e h/H são utilizadas como indicadores preditivos do risco de eventos cardiovasculares como, por exemplo, o aumento da incidência de aterosclerose, formação de coágulos e trombose (Mlcek, 2019; Kourimska, 2022). Quanto menores os índices de AI e TI, maior a qualidade nutricional do produto avaliado (Galgowska, 2022). Apesar de ainda não existirem recomendações oficiais (Lawal, 2022), os valores AI e TI > 4 em uma escala de 0 a 8, já são considerados altos e associados a riscos para a saúde cardíaca. Os índices de AI (0,39) e TI (0,28) calculados para os lipídios da dieta dos esquimós são considerados referências, pois são oriundos da dieta de uma população com incidência muito baixa de doenças coronarianas.

A FL apresentou AI e TI de 0,78 e 2,34, respectivamente (Tabela 4). O valor de AI da FL corrobora com os valores reportados para os lipídios extraídos das larvas de *H. ilucens* (0,68) em contraste com *T. molitor* (2,75). O valor de TI foi superior aos das larvas de *H. ilucens* (0,58) e *T. molitor* (0,74). Como já discutido por Lawal e colaboradores, 2022, os lipídios extraídos dos insetos, em sua maioria, apresentam valores de AI e TI elevados quando comparados aos óleos vegetais já utilizados na dieta humana como, por exemplo, o óleo de soja (AI 0,11; TI 0,4) e o óleo de oliva (AI 0,16; TI 0,39). Apesar disso, a utilização da FL para consumo humano e animal não está descartada desde que seja feito um balanço na dieta.

Quanto maior a razão h/H, melhor a qualidade nutricional do produto avaliado. A métrica h/H está diretamente associada à redução da fração do colesterol de baixa densidade, conhecido como LDL (Santos-Silva, 2002). O valor de h/H da FL (1,4, Tabela 4) foi superior aos lipídios das larvas de *H. ilucens* (0,80) mas inferior ao *T. molitor* (3,51). Apesar de também não existir uma recomendação para o h/H, o valor encontrado para a FL extraída pode ser considerado intermediário para lipídios extraídos de larvas de insetos edíveis e pode compensar os valores de AI e TI.

A razão n-6/ n-3 na dieta de um adulto recomendada pela WHO é de 5 a 10. A

proporção de AG poliinsaturados n-6/ n-3 é muito útil na avaliação da qualidade nutricional de lipídios de uma forma geral (Mukhametov, 2009). A razão n-6/n-3 da FL foi de 36,4 (Tabela 4). O valor reportado nesse estudo está acima da recomendação da WHO para a dieta de um adulto (5 a 10) e dos valores médios para os óleos de oliva (10,0) (Omega-3, 2024) e soja (12,4) (Martin, 2008)) mas abaixo do óleo de milho (83,0) (Dupont, 1990).

Os AG das famílias n-6 e n-3 competem pelas enzimas $\Delta 6$ -dessaturase, alongase e $\Delta 5$ -dessaturase envolvidas nas reações de dessaturação e alongamento de cadeia para conversão em ácidos graxos poliinsaturados de cadeia longa (AGPI-CL) (Martin, 2006). A conversão de AG da família n-6 em AGPI-CL resulta na produção de substratos para a síntese de prostanóides da série 2 como, por exemplo, o C20:3-n6 e o C20:4-n6. Em contraste, a conversão dos AG da família n-3 resulta em AGPI-CL que são convertidos em outros prostanóides que não da série 2. O favorecimento da produção de prostanóides da série 2 pelo consumo excessivo de AG da família n-6 tem sido associado com a ocorrência de desordens imunológicas, doenças cardiovasculares e inflamatórias.

O valor COX é inversamente proporcional a estabilidade oxidativa de óleos (Fard, 2020). O COX da FL (2,79; Tabela 4) é inferior ao reportado para os óleos de oliva (6,33), soja (7,25) (CAO, 2015), girassol (6,56) mas superior ao óleo de palma (1,56) e das larvas do inseto *S. ruficornis* (0,82). Os menores valores de COX são consequência das maiores proporções de SFA e menores proporções de PUFA avaliados comparativamente a partir dos perfis de AG dos óleos e da FL.

Tabela 4 – Perfil de ácidos graxos e índices de qualidade nutricional da FL extraída das larvas de *Z. atratus*

Ácidos graxos	(%)
C8:0	0,25 ± 0,02
C10:0	0,07 ± 0,00
C12:0	0,09 ± 0,00
C14:0	1,65 ± 0,03
C15:0	0,34 ± 0,01
C16:0	36,23 ± 0,72
C16:1	1,22 ± 0,05
C17:0	0,56 ± 0,00
C17:1	0,15 ± 0,00

C18:0	6,22 ± 0,14
C18:1n-9	29,64 ± 0,23
C18:2n-6	22,96 ± 0,38
C18:3n-3	0,62 ± 0,05
SFA	45,40
UFA	54,61
MUFA	31,02
PUFA	23,59
PUFA/MUFA	0,76
n-6/ n-3	36,4
AI	0,78
TI	2,34
h/H	1,40
COX	2,79

SFA, ácidos graxos saturados. UFA, ácidos graxos insaturados. MUFA, ácidos graxos monoinsaturados. PUFA ácidos graxos poli-insaturados. n-3, ácidos graxos ω -3. n-6, ácidos graxos ω -6. AI, índice de aterogenicidade. TI, índice de trombogenicidade. h/H, razão hipocolesterolemia/ hipercolesterolemia. COX, oxidabilidade.

5.3 Avaliação das estabilidades térmica e oxidativa

5.3.1 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial

A Figura 5 mostra as curvas TG e DTG da FL. O perfil TG apresentou uma variação de massa <1% entre 30 °C e 200 °C e duas decomposições bem definidas com T_{onset} DTG 221,3 °C e T_{onset} DTG 393,3 °C.

A variação quase imperceptível na curva de massa (<1%, 30–200 °C) foi atribuída a evolução de compostos voláteis presentes na FL, corroborados tanto pela análise HS–SPME–GC–MS (seção 3.23) quanto pelo pico endotérmico alargado com máximo em ~ 100 °C observado na curva DSC (Figura 6). Apesar de não ser comumente reportada, a perda de massa de ~ 10% que tem início por volta dos 200 °C pode estar associada a decomposição de compostos minoritários de menor massa molecular e menor pressão de vapor, presentes na FL, quando comparados aos TAG.

A evolução dos produtos de degradação dos compostos minoritários da FL visualizada na curva DTG como um pico alargado entre 200 °C e 350 °C (Figura 5) é corroborada por um abaullamento na curva DSC na mesma faixa de temperatura.

A perda de massa de $\sim 90\%$ que tem início por volta $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi superior quando comparada a decomposição térmica de lipídios extraídos de outros insetos como, por exemplo, das larvas de *T. molitor* ($T_{\text{onset}} 303,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou das larvas de *S. ruficornis* ($T_{\text{onset}} 355,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), compostos por TAG esterificados com AG saturados e insaturados. O evento que corresponde a decomposição térmica principal da FL consiste na evolução dos produtos de degradação das moléculas do TAG e dos AG, também é corroborado pelo pico endotérmico de maior intensidade entre $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\sim 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ na curva DSC (Figura 6).

A estabilidade térmica da FL ($221,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) foi atribuída ao alto teor de SFA ($45,40\%$, Tabela 4). A direta proporcionalidade entre o grau de saturação de cadeias de AG e a estabilidade térmica de óleos e gorduras já foi previamente documentada (Caldeira, 2023), corroborando a nossa observação. Controversamente, nós notamos que o perfil TG dos lipídios extraídos das larvas de *H. ilucens* (SFA $55,83 \pm 1,26\%$) também analisados em ar sintético, apresentou 3 estágios de decomposição com $T_{\text{onset}} 149,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Apesar de a composição dos AG exercer um papel importante na estabilidade térmica dos lipídios, os compostos minoritários que possam promover ou prevenir reações oxidativas também precisam ser considerados. Os carotenoides avaliados nesse estudo (seções 3.2.1 e 3.2.2), por exemplo, parecem exercer ação agonista com os SFA na estabilidade térmica da FL.

Além do ensaio convencional de DSC, os ensaios calorimétricos também são fundamentais para a avaliação de transições de fase sólido-líquido e líquido-sólido em óleos e gorduras. Os eventos térmicos relacionados a cristalização e fusão dos lipídios que resultam em seus respectivos sinais exotérmicos e endotérmicos, podem ser mensurados por DSC. O ensaio DSC para avaliação das transições de fase pode antecipar aplicações industriais dos lipídios relacionadas às suas qualidades sensoriais e de textura como, por exemplo, no que diz respeito à sensação na boca e a consistência de alimentos como margarinas, molhos a base gorduras vegetais, biscoitos recheados e chocolates.

A Figura 7 mostra os perfis DSC de resfriamento e segundo aquecimento da FL. As curvas de resfriamento e aquecimento apresentaram picos sobrepostos entre $15,2$ e $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e -25 e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A sobreposição de eventos térmicos pode ser explicada pela diversidade de compostos presentes na FL, mas principalmente, pelas diferentes proporções de TAG esterificados com os SFA, MUFA e PUFA que resultam em polimorfismo (Jafari, 2008).

O início do evento exotérmico observado na curva de resfriamento ($15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) marca o início da transição líquido-sólido da FL (Figura 7). Observamos dois estágios de cristalização com picos em $6,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 7), típicos de lipídios extraídos de insetos (Mba, 2017).

A comparação das temperaturas de cristalização da FL com as reportadas em outros estudos não é tão trivial, por conta das diferentes taxas de resfriamento empregadas. Apesar disso, observamos uma tendência de decréscimo da média das temperaturas de pico dos dois estágios de cristalização ($T_{\text{pico-médio}}$) com o decréscimo do conteúdo de SFA dos lipídios extraídos das larvas de *H. ilucens* (SFA 78%, $T_{\text{pico-médio}}$ 6,7 °C), *S. ruficornis* (SFA 62%, $T_{\text{pico-médio}}$ 0 °C), *R. phoenicis* (SFA 46%, $T_{\text{pico-médio}}$ -1,6 °C) com a FL reportada nesse estudo (SFA 45,4%, $T_{\text{peak-avg}}$ 3,1 °C). Em contraste, os óleos vegetais como alto teor de UFA como, por exemplo, o óleo oliva (SFA <20%) apresentam temperaturas de cristalização muito menores do que os lipídios extraídos dos insetos entre -11 °C e -74 °C. Essas observações corroboram a maior capacidade de empacotamento de cadeias saturadas em relação às insaturadas que resultam em estruturas cristalinas mais estáveis e com maiores temperaturas de cristalização (Siram, 2019).

O início do evento endotérmico (-25 °C) na curva de segundo aquecimento representa o início da transição sólido-líquido da FL (Figura 7). Esse evento apresenta pelo menos 4 picos sendo dois deles mais proeminentes registrados em 2,4 °C e 9,2 °C por conta da histerese da taxa de aquecimento (Figura 7). Os eventos térmicos observados na fusão da FL também são típicos de lipídios extraídos de insetos e seguiram a mesma tendência observada na cristalização entre o teor de SFA e a média das temperaturas dos picos de fusão. As curvas de resfriamento e aquecimento confirmam o estado físico líquido da FL em temperatura ambiente (25 °C) quando manipulada em laboratório.

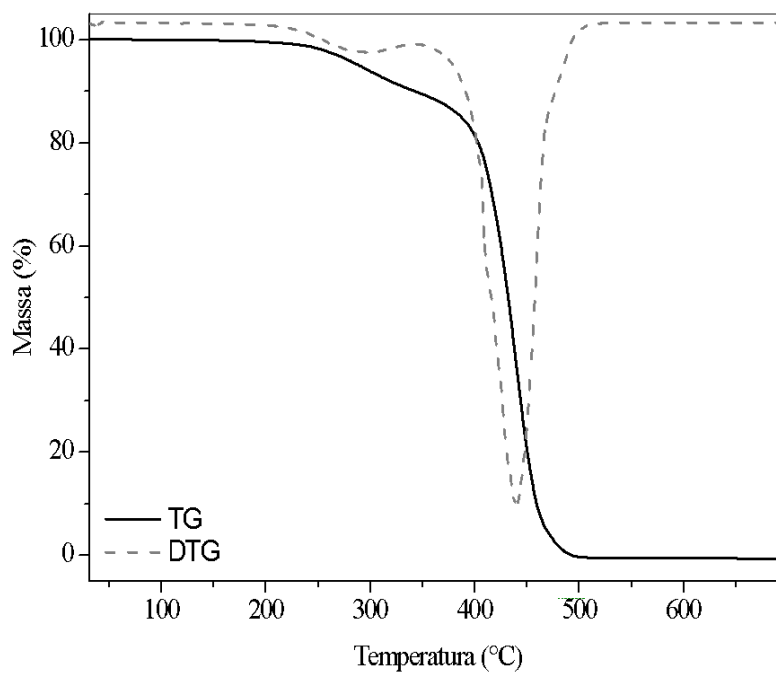


Figura 5 – Curvas TG e DTG da FL extraída das larvas de *Z. atratus*.

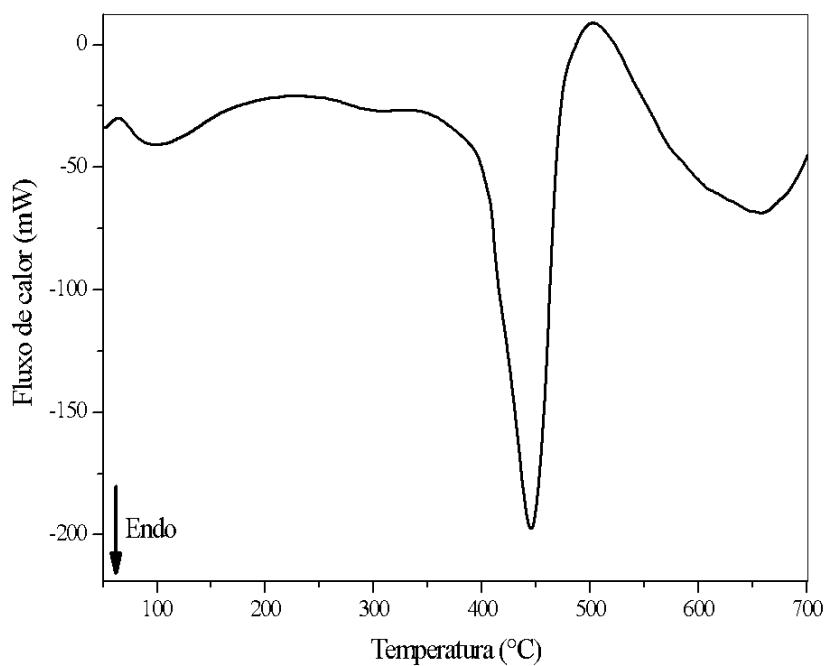


Figura 6 – Curva DSC da FL extraída das larvas de *Z. atratus*.

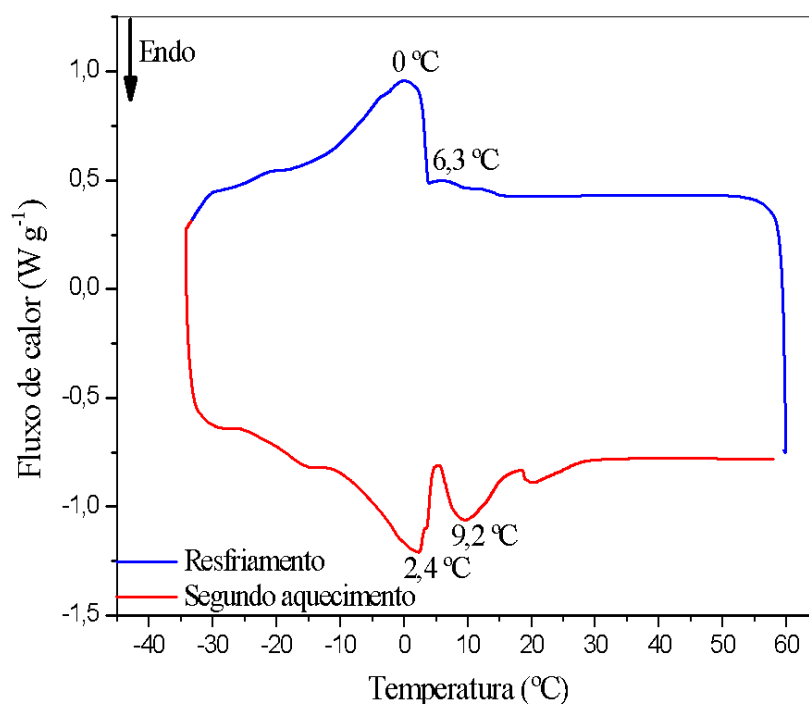


Figura 7 – Transições de fusão e cristalização da FL avaliadas por calorimetria exploratória diferencial.

5.3.2 Temperatura de início de oxidação e tempo de indução de oxidação

A Figura 8 mostra as OOT da FL avaliadas em atmosferas de ar sintético e oxigênio. Como pode ser visto, a T_{onset} da curva de OOT adquirida em atmosfera de oxigênio foi ~ 28 °C menor do que a curva adquirida em ar sintético ($\sim 20\%$ de O_2). O tempo de indução da FL avaliado em oxigênio foi de 12,9 minutos (Figura 9).

Os métodos OOT e OIT são utilizados para medir o grau de estabilidade oxidativa dos lipídios em corridas DSC dinâmicas sob pressão ambiente ou em células pressurizadas do tipo PDSC (Lopez-Beceiro, 2010). Os valores de OOT e OIT tendem a ser diretamente proporcionais à estabilidade térmica dos lipídios. Apesar de não serem absolutos, os métodos OOT e OIT podem antecipar a vida de prateleira e aplicações industriais dos lipídios que envolvem processos térmicos.

Em contraste com os eventos de perda de massa registrados na TG que são caracterizados pela evolução de produtos de degradação da FL, os eventos observados nas avaliações de OOT e OIT estão relacionados com a reação do oxigênio molecular com as insaturações das cadeias dos AG ou dos compostos minoritários. Na iniciação dos processos oxidativos, a epoxidação das duplas ligações é acompanhada da sua respectiva hidroxilação,

gerando oxiranos e diois. A continuação do processo oxidativo pode ainda resultar em oligomerização pela formação de ésteres ou éteres e a fragmentos de menor massa molecular em relação à cadeia carbônica original (Pai, 2009). O calor exotérmico das reações de oxidação responsáveis por alterar a qualidade dos lipídios se manifesta no ensaio de OOT na forma de uma convolução de picos, dada a complexidade e ocorrência simultânea das reações de oxidação.

A OOT da FL (188,5 °C, Figura 8) foi superior à de óleos edíveis regulares. Apesar de observada uma tendência de inversa proporcionalidade ($r = -0,9451$) entre os valores de OOT e UFA da FL (188,5 °C, 54,6% UFA) e dos óleos de milho (175,8 °C, 82,3% UFA), soja (173,1 °C, 80,5 UFA) e girassol (165,8 °C, 86,3% UFA), o teor de UFA isolado não é suficiente para explicar a estabilidade oxidativa dos lipídios. Apesar de os PUFA se oxidarem rapidamente (QI, 2016), não foram observadas quaisquer tendências de inversa proporcionalidade ou agrupamento com as medidas de OOT em relação a outras medidas previamente reportadas. A inobservância de algumas correlações das medidas de OOT com a composição de AG é mais uma evidência de que a estabilidade oxidativa dos lipídios também é afetada pela presença de compostos minoritários como, por exemplo, o β -caroteno avaliado nesse estudo.

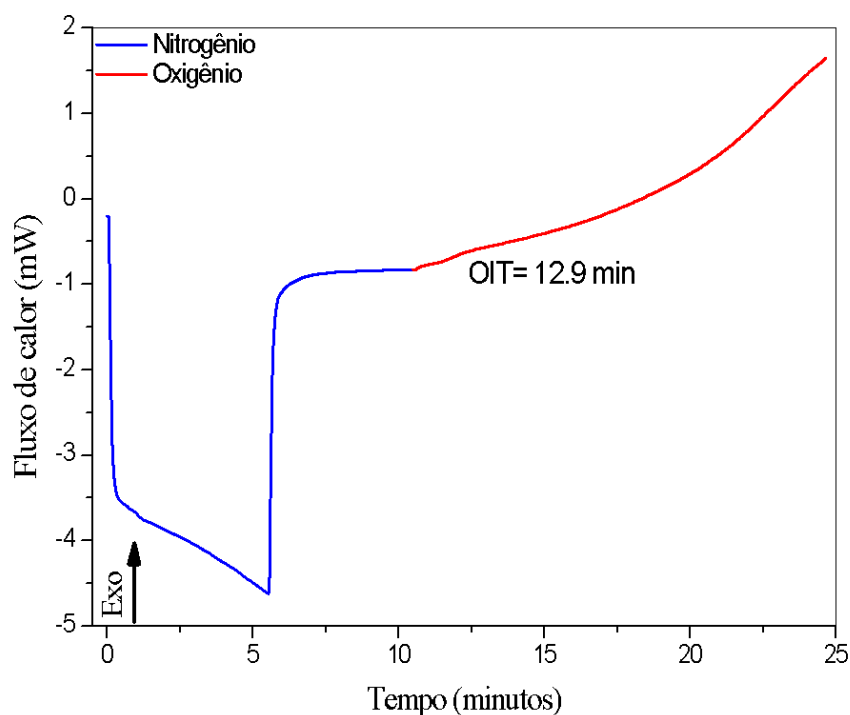


Figura 8 – Avaliação das temperaturas de estabilidade oxidativa da FL em atmosferas de ar sintético e oxigênio por calorimetria exploratória diferencial.

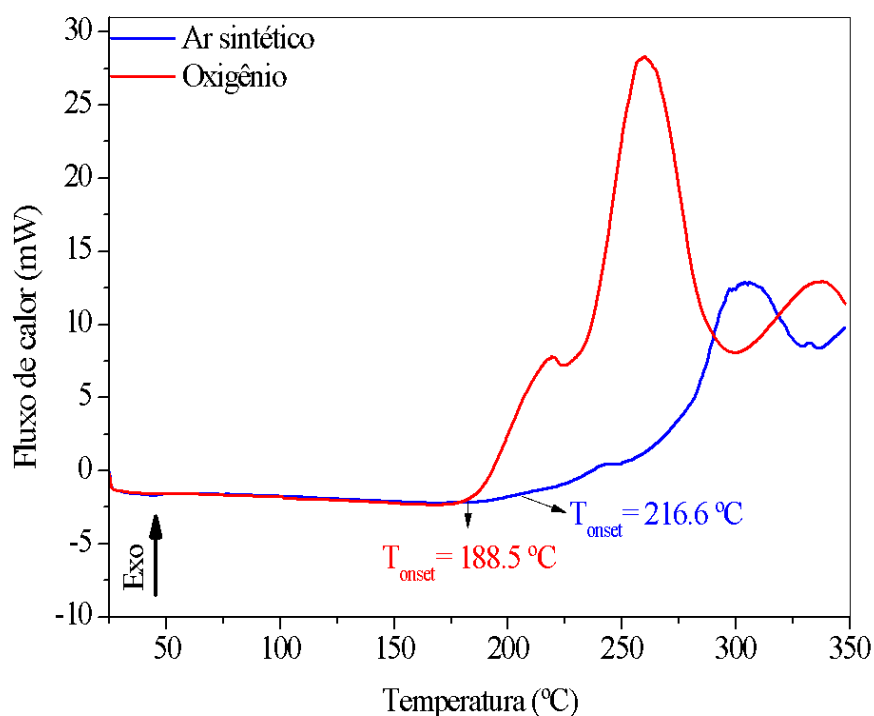


Figura 9 – Avaliação do tempo de indução da FL realizada em isoterma de 160 °C com mudança de atmosfera inerte (nitrogênio) para oxidativa (oxigênio) por calorimetria exploratória diferencial.

5.3.3 Períodos de indução avaliados por Rancimat e PetroOXY

Os períodos de indução da FL avaliados por Rancimat e PetroOXY foram de >24 horas e ~ 8 horas, respectivamente (Tabela 5). Os tempos de indução de oxidação avaliados por Rancimat e PetroOXY se referem a diferentes etapas do processo oxidativo, como a indução e a propagação. Muito embora também não forneçam valores absolutos, assim como o método DSC, quanto maior o tempo de indução maior a estabilidade oxidativa dos lipídios.

No Rancimat, o período de indução é determinado pelo monitoramento do aumento contínuo da condutividade causado pela formação de produtos de oxidação secundários dos lipídios. Os produtos de degradação dos AG como, por exemplo, os ácidos carboxílicos voláteis, são carregados pelo fluxo de ar sintético para uma célula de condutividade contendo água destilada sob monitoramento contínuo (Zhou, 2016). Em contraste, o período de indução medido no PetroOXY é baseado na diminuição de 10% da pressão da célula como resultado do consumo de oxigênio. Essa medida representa a formação dos produtos primários de oxidação lipídica na fase de propagação (Murta, 2014; Duarte, 2018). A alto valor de IA e baixo valor de IP (Tabela 1) discutidos na seção 3.2.1 parecem estar alinhados com os tempos de indução avaliados na Tabela 5.

A temperatura é o fator determinante nos tempos de indução da FL avaliados pelos três métodos. A OIT determinada por PetroOXY (~ 8 horas, Tabela 5) conduzida a 110 °C foi cerca de 37 vezes maior em relação ao ensaio conduzido por DSC a 160 °C (~ 13 minutos, Figura 9), ambas em atmosfera de oxigênio. A atmosfera da célula de reação também exerce efeito nos períodos de indução. A diferença de mais de 3 vezes no valor de OIT entre o Rancimat (> 24 horas, Tabela 5) e o PetroOXY (~ 8 horas, Tabela 5) foi atribuída a uso de ar sintético, pois ambos os testes foram conduzidos a 110 °C.

A OIT da FL avaliada por Rancimat (Tabela 5) foi superior à dos óleos de soja (12,70 horas), girassol (5,40 horas) e palma (22,69 horas) avaliados nas mesmas condições instrumentais (Andrade, 2022). A nossa observação antecipa o potencial de aplicações da FL quanto a sua estabilidade termo-oxidativa, superior aos óleos edíveis regulares já utilizados comercialmente. Vale a pena destacar que a OIT da FL foi superior à do óleo de palma, considerado de alta resistência termo-oxidativa é frequentemente utilizado na preparação de alimentos por fritura.

Cruz e colaboradores, 2022 reportaram períodos de indução de 0,91 horas e 0,08 horas avaliados por Rancimat para os lipídios extraídos de *T. molitor* e *Z. atratus*, respectivamente. A diferença expressiva entre os valores reportados por e os da FL (Tabela pode ser atribuída ao processo de extração por n-hexano utilizando Soxhlet por 8 horas. Adicionalmente, os autores também reportaram períodos de indução dos mesmos lipídios quando extraídos por n-propano pressurizado superiores a 4:50 horas. Em contraste, Matthäus e colaboradores (2018) reportaram o período de indução do óleo da larva de *H. illucens* obtido por prensagem a frio de 50,5 horas, também avaliado por Rancimat. Ainda que com uma diferença de 10 °C nos ensaios conduzidos por Rancimat nesse estudo em relação a e , as diferenças nos tempos de indução foram atribuídas aos métodos de extração não apenas por possível oxidação de cadeias insaturadas, mas pela possível recuperação de compostos antioxidantes.

Pela primeira vez, reportamos a estabilidade termo-oxidativa da FL extraída das larvas de *Z. atratus* por prensagem mecânica. A comparação entre os períodos de indução avaliados por 3 métodos e a comparação com o estado da arte, evidenciam a alta estabilidade termo-oxidativa da FL, como consequência de uma ação agonista entre o perfil de AG e a presença de compostos antioxidantes, como os carotenoides. Entretanto, vale a pena ressaltar que os métodos acelerados de avaliação dos períodos de indução são realizados em condições extremas em relação às condições de armazenamento e processamento consideradas reais. Portanto, implicando em predições de estabilidade oxidativa não exatas.

Tabela 5 – Períodos de indução da FL avaliados por Rancimat e PetroOXY

Técnica	Tempo de indução (horas)
Rancimat	>24
PetroOXY	7:59

5.4 Avaliação da composição centesimal do sólido remanescente da prensagem

O sólido remanescente do processo de prensagem foi caracterizado quanto a sua composição centesimal (Tabela 5). Após a obtenção da FL com rendimento de 36% (m m^{-1} , seção 3.1) cerca de 18% de lipídios (m m^{-1}) foram determinados no sólido remanescente. A persistência dos lipídios no sólido remanescente após a prensagem corrobora a disposição estrutural do exoesqueleto de insetos com complexos lipídicos, conforme discutido na seção 3.1. O teor de lipídios totais tipicamente reportados para larvas de *Z. atratus* pode chegar a 43% (m m^{-1}). Apesar de aparentemente superestimado em cerca de 11% (m m^{-1}), o alto teor de lipídios totais avaliado nesse estudo ($\sim 54\%$, m m^{-1}) pode ter sido afetado pela migração de sólidos para a FL durante a prensagem conforme discutido na seção 3.1.

A nossa avaliação evidenciou que o controle de temperatura da prensa (40 °C) resultou em um rendimento de extração de cerca de 66% (m m^{-1}) dos lipídios totais. Adicionalmente, o controle de temperatura utilizado nesse estudo parece favorecer o rendimento de extração por compensar o efeito de baixa contrapressão na prensa, causado pelo baixo teor de fibras da amostra (5,45%, Tabela 5) já discutido na seção 3.1. O teor de fibras reportado neste estudo (5,45%, Tabela 5) foi comparável aos previamente reportados para larvas de *Z. atratus* (4,9%).

O teor de proteínas (26,11%, Tabela 5) foi cerca de 2,5 vezes superior aos tipicamente reportados para larvas de *Z. atratus* (10,5%) mas inferior as larvas de *H. ilucens* (32,3%) (Yusoff, 2022) e *T. molitor* ($\sim 49\%$) (Liu, 2020; Fialho, 2021). A concentração de outros nutrientes pelo desengorduramento das larvas é um método já conhecido para a obtenção de concentrados proteicos de insetos (Brogan, 2023).

O teor de cinzas avaliado (0,06%, Tabela 5) foi muito inferior aos valores tipicamente reportados para larvas de *Z. atratus* (2,4%–8,2%). Essa discrepância foi atribuída à dieta fornecida às larvas, pois também não observamos resíduos na corrida TG da FL (Figura 5).

Nesse estudo, nós destacamos a potencial aplicação da prensagem das larvas de *Z. atratus*, capaz de fornecer um sólido remanescente com teor de proteínas e carboidratos que

pode ser utilizado como ingrediente na formulação de dietas para humanos e animais, além da obtenção da FL. A prensagem mecânica supera as desvantagens previamente reportadas pelas extrações baseadas em solventes orgânicos e fluidos pressurizados por ser considerada verde, segura e acessível.

Tabela 5 – Composição centesimal do sólido remanescente da prensagem das larvas de *Z. atratus*.

Nutriente	(%)
Umidade	2,26 ± 0,78
Proteínas	26,11± 0,53
Lipídios	17,78 ± 4,65
Fibras	5,45 ± 0,09
Cinzas	0,067 ± 0,0
Carboidratos	48,33

6 CONCLUSÃO

A prensagem mecânica realizada a 40 °C foi capaz de extrair mais da metade dos lipídios totais das larvas de *Z. atratus*. Nesse estudo nós demonstramos que os lipídios extraídos apresentaram índices de peróxido e de cor comparáveis a óleos edíveis já utilizados comercialmente, ainda que com um alto índice de acidez. A composição majoritária da FL consistente com moléculas de TAG esterificadas com AG, foi comprovada pelas técnicas de FTIR-ATR e ¹H RMN. A espectroscopia na região do visível confirmou a presença de carotenoides na FL.

A avaliação dos compostos voláteis confirmou a presença de substâncias odoríferas tipicamente associadas ao odor característico de óleos e gorduras como, por exemplo, o 1-decanol. Entretanto, a determinação dos níveis dos compostos detectados é essencial para futuros estudos que relacionem os compostos voláteis com os atributos de aroma da FL em avaliações sensoriais.

O perfil de AG apresentou alto teor de SFA (~ 45%) com abundância do ácido palmítico (~36%), impactando nos índices de qualidade nutricional. Os valores de AI, TI, h/H e n-6/n-3 evidenciaram que a FL pode servir como um ingrediente para a formulação das dietas de humanos e animais desde que devidamente balanceada, mas não para consumo

direto.

Em contrapartida, as avaliações térmicas e termo oxidativas evidenciaram a potencial estabilidade térmica da FL comparável e em alguns casos superior aos óleos edíveis já utilizados comercialmente. Nesse estudo, nós evidenciamos de forma compreensiva a alta estabilidade oxidativa da FL pela combinação de resultados de COX e das técnicas de TG, DSC, Rancimat e PetroOXY. A combinação do perfil de AG rico em SFA com a presença de cromóforos de ação antioxidantes exerce ação agonista incrementando a estabilidade termo oxidativa da FL. Além dos carotenoides reportados nesse estudo, nós não descartamos a presença de tocoferóis, tocotrienóis e esteróis também antioxidantes.

Nesse estudo, também destacamos a sustentabilidade da prensagem pela concentração de proteínas e carboidratos no sólido remanescente, causada pelo desengorduramento da amostra. A prensagem utilizada nesse estudo agrega valor aos produtos obtidos e está inserida no conceito de economia circular.

7.

Manuscrito: From Larvae to Oil: Physicochemical Characterization and Thermo-Oxidative Stability of Lipids Extracted from Zophobas atratus

From Larvae to Oil: Physicochemical Characterization and Thermo-Oxidative Stability of Lipids Extracted from *Zophobas atratus*

<i>Periódico a ser submetido (1ª submissão):</i>	<i>Food Chemistry</i> , ISSN 1873-7072.
<i>Maior percentil (Scopus):</i>	https://www.scopus.com/sourceid/24039
<i>Periódico a ser submetido (2ª submissão):</i>	<i>International Journal of Biological Macromolecules</i> ISSN 0141-8130.
<i>Maior percentil (Scopus):</i>	https://www.scopus.com/sourceid/17544

RESUMO

This study characterized the physicochemical properties of the lipid fraction (LF) extracted from *Zophobas atratus* larvae through mechanical pressing at 40°C. The extraction yield was 36% (w/w). Visible spectroscopy confirmed the presence of β -carotene (16.75 mg/100 g) and other carotenoids in the LF. Fourier transform infrared spectroscopy with attenuated total reflectance and proton nuclear magnetic resonance (¹H NMR) analysis indicated that the LF primarily comprised triacylglycerols esterified with fatty acids (FAs). The FA profile revealed 45.40% saturated FAs and 54.61% unsaturated FAs. The combination of an SFA-rich profile and the presence of antioxidants contributed synergistically to enhanced thermooxidative stability, as evidenced by differential scanning calorimetry (DSC), Rancimat, and PetroOXY analyses. The mechanical pressing process concentrated proteins and carbohydrates in the residual solid fraction, increasing its potential for industrial applications with sustainability benefits.

Keywords: edible insects, entomophagy, oils and fats, oxidative stability, *Zophobas morio*.

* Corresponding author: Nayah Prado and Carolina Oliveira de Souza (Graduate Program in Food Science, Faculty of Pharmacy, Federal University of Bahia, Salvador, BA, Brazil. E-mail: carolods@ufba.br).

REFERÊNCIAS:

ADMIN. EU Consumer Acceptance of Edible Insects: Survey Report – **International Platform of Insects for Food and Feed, Brussels**. Disponível em: <https://ipiff.org/eu-consumer-acceptance-of-edible-insects-survey-report/>. Acesso em: 1 out. 2024.

AGUILAR, J. G. S. An overview of lipids from insects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 33, p. 101967, maio 2021.

ALVES, R. N.; LIRA, E. A. F.; PIMENTEL, D. A. Toxicological evaluation of *Tenebrio molitor* oil in rats. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 6, p. 2820-2826, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11483-019-01831-1>.

ANDRADE, A. B. et al. Influence of under-fermented cocoa mass in chocolate production: Sensory acceptance and volatile profile characterization during the processing. **LWT**, v. 149, p. 112048, set. 2021.

ANDRADE, M. L. et al. Viability of palm oil in edible vegetable oil blends preparation for employment in immersion frying. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 16, p. 8719–8732, 24 jan. 2022.

AOAC INTERNATIONAL. Official methods of analysis of AOAC International, 21. ed. Rockville: 2005.

AOAC INTERNATIONAL. Official methods of analysis of AOAC International, Official Method 945.18-B ed. Gaithersburg: AOAC International Publisher, 2019.

AOCS. AOCS Cd 3d-63 - Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists Society: Fats, Oils and Lipid Related Analytical Methods. Champaign, USA: AOCS, 2009.

AOCS. AOCS Cd 12b-92 - Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists Society: Fats, Oils and Lipid Related Analytical Methods. Champaign, USA: AOCS, 2009.

ARAÚJO, A. et al. Alimentos à base de insetos e o comportamento do consumidor: o que a literatura científica tem desvendado? **ResearchGate**, 2022.

AUDIE, J.; BOYD, C. The synergistic use of computation, chemistry and biology to discover novel peptide-based drugs: the time is right. **Current Pharmaceutical Design**, v. 16, p. 567-582, 2010.

ARAÚJO, R. R. S. et al. Nutritional composition of insects *Gryllus assimilis* and *Zophobas morio*: Potential foods harvested in Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 76, p. 22–26, mar. 2019.

ASSY, N.; NASSAR, F.; GROSOVSKI, M. Monounsaturated fat enriched with olive oil in non-alcoholic fatty liver disease. **Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention**, p. 1151–1156, 2010.

ASTM. Standard Test Method for Oxidation Stability of Middle Distillate Fuels—Rapid Small Scale Oxidation Test (RSSOT). Disponível em: <https://www.astm.org/d7545-14r19e01.html>. Acesso em: 4 out. 2024.

BEAT DIGITAL. Este tipo de gusanos son capaces de degradar el plástico hasta un 70%, 2023. Disponível em: <https://beatdigital.mx/este-tipo-de-gusanos-son-capaces-de-degradar-el-plastico-hasta-un-70/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911–917, 1 ago. 1959.

BOREL, P. et al. Using black soldier fly larvae reared on fruits and vegetables waste as a sustainable dietary source of provitamin A carotenoids. **Food Chemistry**, v. 359, p. 129911, 15 out. 2021.

BOUKID, F. et al. Impact of diets including agro-industrial by-products on the fatty acid and sterol profiles of larvae biomass from *Ephestia kuehniella*, *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*. **Insects**, v. 12, n. 8, p. 672, 26 jul. 2021.

BROGAN, E. N. et al. Characterization of lipids in insect powders. **LWT**, v. 184, p. 115040–115040, 28 jun. 2023.

BRUKER BIOSPIN. Ascend NMR Magnets. (s.d.). Recuperado de:
<https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/mr/nmr/ascend-nmr-magnets.html>.

BURR, G. O.; MILLER, E. S. Ultraviolet absorption spectra of fatty acids and their application to chemical problems. **Chemical Reviews**, v. 29, n. 2, p. 419–438, 1 out. 1941.

CALDEIRA, V. F. et al. Chemistry and fatty acid profile of new fixed oils from two *Cenostigma* species: different promising raw material for use in cosmetic emulsions. **Industrial Crops and Products**, v. 196, p. 116451–116451, 28 fev. 2023.

CAO, J. et al. Effect of fatty acid and tocopherol on oxidative stability of vegetable oils with limited air. **International Journal of Food Properties**, v. 18, n. 4, p. 808–820, 20 jan. 2015.

CAPPELLOZZA, S. et al. A first attempt to produce proteins from insects by means of a circular economy. **Animals**, v. 9, n. 5, p. 278, 24 maio 2019.

CEMIN, P. et al. Chocolates with Brazilian cocoa: Tracking volatile compounds according to consumers' preference. **Food Research International**, v. 159, p. 111618, set. 2022.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN (CINVESTAV). *Tenebrio molitor*: **una opción prometedora para la degradación de plásticos**, 2022. Disponível em: <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/tenebrio-molitor-una-opcion-prometedora-para-la-degradacion-de-plasticos/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

CHAPMAN, R. F. **Integument**. In: **The insects: structure and function**. Cambridge: University Press, 1998. p. 415–440.

CHANTAKUN, K. et al. Fatty acid profile and thermal behavior of fat-rich edible insect oils compared to commonly consumed animal and plant oils. **Food Science of Animal Resources**, v. 44, n. 4, p. 790–804, jul. 2024.

CHESETO, X.; KINYURU, J.; NDUNG’U, M.; TORTO, B. Uso de óleos de insetos adultos (*Ruspolia differens* e *Schistocerca gregaria*) em produtos alimentícios: avaliação da aceitação sensorial de biscoitos, 2020.

CHEUNG, T. L.; MORAES, M. S. Inovação no setor de alimentos: insetos para consumo humano. **Interações**, v. 17, n. 2, p. 151–163, 2016.

CHIA, S. Y. et al. Insects for sustainable animal feed: Inclusive business models involving smallholder farmers. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 12, p. 296–313, 2019. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 19 mar. 2025.

CODEX ALIMENTARIUS. Codex standards for fats and oils from vegetable sources CXS 210-1999. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y2774e/y2774e04.htm>. Acesso em: 11 out. 2024.

CORBU, A. R.; ROTARU, A.; NOUR, V. Edible vegetable oils enriched with carotenoids extracted from by-products of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*): the investigation of some characteristic properties, oxidative stability and the effect on thermal behaviour. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 142, n. 2, p. 735–747, 12 out. 2019.

COSTA-NETO, E. M. Insects as food: An ethnozoological study of insect consumption in Brazil. **Human Ecology**, v. 31, n. 1, p. 51–68, 2003.

CRUZ, R. M. S. et al. Composition and oxidative stability of oils extracted from *Zophobas morio* and *Tenebrio molitor* using pressurized n-propane. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 181, p. 105504, fev. 2022.

CRUZ, V. A. et al. Oil extraction from black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal by dynamic and intermittent processes of supercritical CO₂ – global yield, oil characterization, and solvent consumption. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 195, p. 105861, 1 abr. 2023.

CRUZ, V. A. et al. Extraction, characterization, and use of edible insect oil – A review. **Food Chemistry**, v. 463, p. 141199, jan. 2025.

DIDHAM, M. et al. Sensing the addition of vegetable oils to olive oil: the ability of UV–VIS and MIR spectroscopy coupled with chemometric analysis. **Food Analytical Methods**, v. 13, n. 3, p. 601–607, 5 dez. 2019.

DINH, T. T. N.; TO, K. V.; SCHILLING, M. W. Fatty acid composition of meat animals as flavor precursors. **Meat and Muscle Biology**, v. 5, n. 1, 10 ago. 2021.

DIJKSTRA, A. J. Vegetable oils: composition and analysis. **Encyclopedia of Food and Health**, p. 357–364, 2016.

DRAGOJLOVIĆ, D. et al. Comparison of nutritional profiles of super worm (*Zophobas morio*) and yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) as alternative feeds used in animal husbandry: Is super worm superior? **Animals**, v. 12, n. 10, p. 1277, 17 maio 2022.

DUARTE, A. M. et al. A comparative study of the thermal and oxidative stability of moringa oil with olive and canola oils. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, p. 1943–1952, 2018.

DUARTE, B. et al. Quinoa variety identification based on fatty acid composition and multivariate chemometrics approaches. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 114, p. 104798, dez. 2022.

DUPONT, J. et al. Food uses and health effects of corn oil. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 9, n. 5, p. 438–470, out. 1990.

EFSA – EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. Safety of dried yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. **EFSA Journal**, v. 19, n. 1, p. 6343, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6343>.

EUROPEAN COMMISSION. Approval of fourth insect as a novel food. Disponível em: https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food/authorisations/approval-insect-novel-food_en. Acesso em: 21 nov. 2024.

FAO. Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector. Roma, 2021.

FAPESP. Insetos comestíveis. **Revista Pesquisa FAPESP.** São Paulo, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/insetos-comestiveis/>. Acesso em: 20 mar. 2025

FARD, S. M. S. M.; AFSHAR, P. G.; MILANI, M. A comparison of the quality characteristics of the virgin and refined olive oils supplied in Tarom region, Iran (2019). **Journal of Human, Environment, and Health Promotion**, v. 6, n. 2, p. 83–90, 1 jun. 2020.

FERNANDES, C. E. et al. Nutritional and lipid profiles in marine fish species from Brazil. **Food Chemistry**, v. 160, p. 67–71, out. 2014.

FERNÁNDEZ, M. et al. Fatty acid compositions of selected varieties of Spanish dry ham related to their nutritional implications. **Food Chemistry**, v. 101, n. 1, p. 107–112, 1 jan. 2007.

FIALHO, A. T. S. et al. Nutritional composition of larvae of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) and crickets (*Gryllus assimilis*) with potential usage in feed. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 73, n. 2, p. 539–542, mar. 2021.

FIGUEIREDO, A. et al. Evaluation of lipid composition and nutritional quality of olive oil varieties using ESI-MS, GC-FID and chemometrics techniques. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 1 jan. 2024.

FINKE, M. D. Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. **Zoo Biology**, v. 21, n. 3, p. 269–285, 2002. DOI: 10.1002/zoo.10031.

GAHUKAR, R. T. Entomophagy and human food security. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 31, n. 3, p. 129–144, 2011.

GALGOWSKA, M.; PIETRZAK-FIEĆKO, R. Evaluation of the nutritional and health values of selected Polish mushrooms considering fatty acid profiles and lipid indices. **Molecules**, v. 27, n. 19, p. 6193, 21 set. 2022.

- GENG, L.; LIU, K.; ZHANG, H. Lipid oxidation in foods and its implications on proteins. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1192199, 2023. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1192199>.
- GONÇALVES, C. et al. Entomofagia - consumo atual e potencial de futuro. **Associação Portuguesa de Nutrição**, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21011/apn.2022.2913>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- GONZÁLEZ, C. M.; GARZÓN, R.; ROSELL, C. M. Insects as ingredients for bakery goods. A comparison study of *H. illucens*, *A. domestica* and *T. molitor* flours. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 51, p. 205–210, jan. 2019.
- GUILLÉN, M. D.; RUIZ, A. Rapid simultaneous determination by proton NMR of unsaturation and composition of acyl groups in vegetable oils. **Food Chemistry**, v. 105, n. 11, p. 688–696, 1 nov. 2003.
- HALL, F. G. et al. Functional properties of tropical banded cricket (*Gryllodes sigillatus*) protein hydrolysates. **Food Chemistry**, v. 224, p. 414–422, jun. 2017.
- HAMAM, M.; D'AMICO, M.; DI VITA, G. Advances in the insect industry within a circular bioeconomy context: a research agenda. **Environmental Sciences Europe**, v. 36, n. 1, 15 fev. 2024.
- HAMAM, M. et al. Climate change perception and innovative mitigation practices adopted by Hungarian farms. **Agris on-line Papers in Economics and Informatics**, v. 15, n. 3, p. 57–72, 30 set. 2023.
- HOSPITAL, X. F.; HIERRO, E.; FERNÁNDEZ, M. Survival of *Listeria innocua* in dry fermented sausages and changes in the typical microbiota and volatile profile as affected by the concentration of nitrate and nitrite. **International Journal of Food Microbiology**, v. 153, n. 3, p. 395–401, fev. 2012.
- HUIS, A. VAN; RUMPOLD, B. A.; VAN DER FELS-KLERX, H. J.; TOMBERLIN, J. K. Advancing edible insects as food and feed in a circular economy. **Journal of Insects as Food and Feed**, v. 7, n. 5, p. 935–948, 2021.
- INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION. 74. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:3976:ed-2:v1:en>. Acesso em: 1 out. 2024.

JAFARI, M.; KADIVAR, M.; KERAMAT, J. Detection of adulteration in Iranian olive oils using instrumental (GC, NMR, DSC) methods. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 86, n. 2, p. 103–110, 19 dez. 2008.

JANSSEN, R. H. et al. Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 11, p. 2275–2278, 14 mar. 2017.

JEON, Y.; SON, Y.; KIM, S.; YUN, E.; KANG, H.; HWANG, I. Physicochemical properties and oxidative stabilities of mealworm (*Tenebrio molitor*) oils under different roasting conditions. **Food Science and Biotechnology**, v. 25, n. 1, p. 105–110, 2016.

JEON, S. Y. et al. Monitoring of lipid oxidation in edible oils using induction period. **Food Science and Biotechnology**, v. 25, n. 1, p. 1–7, 2016.

KARAMAN, S. et al. Recovery potential of cold press byproducts obtained from the edible oil industry: physicochemical, bioactive, and antimicrobial properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 8, p. 2305–2313, 19 fev. 2015.

KIERONCZYK, B. et al. Effects of replacing soybean oil with selected insect fats on broilers. **Animal Feed Science and Technology**, v. 240, p. 170–183, jun. 2018.

KIM, T. K. et al. Edible insects as a protein source: A review of public perception, processing technology, and research trends. **Food Science of Animal Resources**, v. 42, n. 3, p. 407–424, 2022. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e4>.

KLUEPFEL, C.; PRASERT, S.; LEE, C. M. Allergic reactions to edible insects: Implications for food safety and consumer acceptance. **Food Control**, v. 108, p. 106818, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106818>.

KNOTHE, G. Structure indices in FA chemistry. How relevant is the iodine value? **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 79, n. 9, p. 847–854, 2002. <https://doi.org/10.1007/s11746-002-0569-4>.

KOUŘIMSKÁ, L.; ADÁMKOVÁ, A. Nutritional and sensory quality of edible insects. **NFS Journal**, v. 4, n. 4, p. 22–26, out. 2016.

- KOUŘIMSKÁ, L.; TILAMI, S. K. Assessment of the nutritional quality of plant lipids using atherogenicity and thrombogenicity indices. **Nutrients**, v. 14, n. 18, p. 3795, 1 jan. 2022.
- LAWAL, K. G. et al. Lipid nutritional indices, regioisomeric distribution, and thermal properties of *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* larvae fat. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 25, n. 3, p. 101951–101951, 1 set. 2022.
- LEE, J.; LEE, H.; LEE, M. Physicochemical properties of mealworm (*Tenebrio molitor* larva) oil and its hypolipidemic effect as a replacement for dietary saturated fat in mice. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 124, n. 7, 6 maio 2022.
- LEUNG, D. et al. Biodiesel from *Zophobas atratus* larva oil: process optimization and FAME characterization. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, p. 1036–1040, 2012.
- LI, M. et al. Edible insects: a new sustainable nutritional resource worth promoting. **Foods**, v. 12, n. 22, p. 4073, 1 jan. 2023.
- LIMOEIRO, R. et al. Análise de técnicas de extração de lipídios de insetos: solventes orgânicos e alternativas de menor impacto. **Revista de Tecnologia e Inovação**, Passo Fundo, 2020. Disponível em: https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/simposio-sial-anais/2020/Tecnologia/t-33.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.
- LIU, C. et al. Growth performance and nutrient composition of mealworms (*Tenebrio molitor*) fed on fresh plant materials-supplemented diets. **Foods**, v. 9, n. 2, 5 fev. 2020.
- LIU, D. et al. Characterization of Jinhua ham aroma profiles in specific to aging time by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). **Meat Science**, v. 168, p. 108178, 7 maio 2020.
- LIU, X. et al. Volatile profile and flavor characteristics of ten edible oils. **Analytical Letters**, v. 54, n. 9, p. 1423–1438, 12 ago. 2020.
- LÓPEZ-BECEIRO, J. et al. Comparison of olive, corn, soybean and sunflower oils by PDSC. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 104, p. 169–175, dez. 2010.

- LORENZO, J. M. et al. Effect of fat replacement by olive oil on the physico-chemical properties, fatty acids, cholesterol and tocopherol content of pâté. **Grasas y Aceites**, v. 67, n. 2, p. e133, 11 abr. 2016.
- LUCAS, A. J. S. et al. Edible insects: An alternative of nutritional, functional and bioactive compounds. **Food Chemistry**, v. 311, p. 126022, maio 2020.
- LUTTERODT, H. et al. Fatty acid profile, thymoquinone content, oxidative stability, and antioxidant properties of cold-pressed black cumin seed oils. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, n. 9, p. 1409–1413, nov. 2010.
- MACHADO, S. S. N. et al. Insect residues as an alternative and promising source for the extraction of chitin and chitosan. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 254, p. 127773, 1 jan. 2024.
- MALEK, M. A. et al. Multi-modal compositional analysis of layered paint chips of automobiles by the combined application of ATR-FTIR imaging, Raman microspectrometry, and SEM/EDX. **Molecules**, v. 24, n. 7, 8 abr. 2019.
- MARIOD, A. A. Insects and their potential as protein sources for humans and animals. In: MARIOD, A. A. (Ed.). *Wild Fruits: Composition, Nutritional Value and Products*. **Springer**, 2013.
- MARTIN, C. A. et al. Ácidos graxos poliinsaturados ômega-3 e ômega-6: importância e ocorrência em alimentos. **Revista de Nutrição**, v. 19, n. 6, p. 761–770, dez. 2006.
- MARTIN, C. A. et al. Fatty acid contents of Brazilian soybean oils with emphasis on trans fatty acids. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 19, n. 1, 2008.
- MASZEWSKA, M. et al. Oxidative stability of selected edible oils. **Molecules**, v. 23, n. 7, p. 1746, 17 jul. 2018.
- MATTHÄUS, B. et al. Renewable resources from insects: exploitation, properties, and refining of fat obtained by cold-pressing from *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 121, n. 7, p. 1800376, 11 jun. 2019.

- MBA, A. R. F. et al. Lipid and amino acid profiles support the potential of *Rhynchophorus phoenicis* larvae for human nutrition. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 60, p. 64–73, jul. 2017.
- MENDEZ-SANCHEZ, C. et al. Prediction of fat content in edible insect powders using handheld FT-IR spectroscopic devices. **LWT**, v. 207, p. 116652, 19 ago. 2024.
- MENENDEZ, J. A.; LUPU, R. Fatty acid synthase and the lipogenic phenotype in cancer pathogenesis. **Nature Reviews Cancer**, v. 7, n. 10, p. 763–777, out. 2007.
- MLČEK, J. et al. Fat from Tenebrionidae bugs – Sterols content, fatty acid profiles, and cardiovascular risk indexes. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 69, n. 3, p. 247–254, 22 ago. 2019.
- MONTALBÁN, A. et al. Growth performance, diet digestibility, and chemical composition of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) fed agricultural by-products. **Insects**, v. 14, n. 10, p. 824–824, 20 out. 2023.
- MOHAN BABU, M. et al. Influence of ZrO₂ addition on structural and biological activity of phosphate glasses for bone regeneration. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4058, 12 set. 2020.
- MUKHAMETOV, A. et al. Effects of ω -3 fatty acids and ratio of ω -3/ ω -6 for health promotion and disease prevention. **Food Science and Technology**, 1 jan. 2022.
- MURTA VALLE, M. L.; LEONARDO, R. S.; DWECK, J. Comparative study of biodiesel oxidation stability using Rancimat, PetroOXY, and low P-DSC. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 116, p. 113–118, 2014.
- NASCIMENTO, R. Q. et al. Utilization of agro-industrial residues in the rearing and nutritional enrichment of *Zophobas atratus* larvae: new food raw materials. **Molecules**, v. 27, n. 20, p. 6963–6963, 17 out. 2022.
- NG, M. H.; CHOO, Y. M. Improved method for the qualitative analyses of palm oil carotenes using UPLC. **Journal of Chromatographic Science**, v. 54, n. 4, p. 633–638, 2 mar. 2016.
- NMR chemical shifts of impurities.

NOYENS, I. et al. **Processing of insects as a whole or as fractions**. Disponível em: https://vb.nweurope.eu/media/15862/literature-review_processing-of-insects-as-a-whole-or-as-fractions.pdf. Acesso em: 9 out. 2024.

OJHA, S.; BUßLER, S.; SCHLÜTER, O. Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing. **Waste Management**, v. 118, p. 1–10, 2020.

OLIVEIRA, M. C. et al. Extraction and characterization of insect oil from *Tenebrio molitor* larvae: Physicochemical properties and potential applications. **Foods**, v. 13, n. 23, p. 3867, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/23/3867>.

OLOFSSON, J. et al. Integrating enzyme fermentation in lignocellulosic ethanol production: life-cycle assessment and techno-economic analysis. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, 23 fev. 2017.

OMEGA-3 and Omega-6 fatty acids. Disponível em: <https://www.oliveoilsource.com/olictionary/omega-3-and-omega-6-fatty-acids>. Acesso em: 29 out. 2024.

OONINCX, D. G. A. B.; DE BOER, I. J. M. Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans – a life cycle assessment. **PLoS ONE**, v. 7, n. 12, p. e51145, 19 dez. 2012.

ORKUSZ, A. et al. Consumers' attitudes facing entomophagy: Polish case perspectives. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 7, p. 2427, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072427>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PAI, Z. P. et al. Catalytic oxidation of fatty acids. I. Epoxidation of unsaturated fatty acids. **Reaction Kinetics and Catalysis Letters**, v. 98, n. 1, p. 1–8, 3 set. 2009.

PEREZ-SANTA ESCOLASTICA, C. et al. The flavour of edible insects: A comprehensive review on volatile compounds and their analytical assessment. **Trends in Food Science & Technology**, jul. 2022.

PEREZ-SANTA ESCOLASTICA, C. et al. Comparing the aromatic profile of seven unheated edible insect species. **Food Research International**, v. 164, p. 112389, fev. 2023.

PHUAH, E. et al. Physicochemical characterization of edible insect oils: insights into fatty acid composition, thermal behavior and quality parameters. **ASEAN Journal on Science and Technology for Development**, v. 40, p. 63–70, 2024.

PROBST, L. et al. Sustainable, safe and nutritious food: new nutrient sources. Luxembourg: **European Commission**, 2015. (Business Innovation Observatory, Contract No 190/PP/ENT/CIP/12/C/N03C01).

PURSCHE, B. et al. Pilot-scale supercritical CO₂ extraction of edible insect oil from *Tenebrio molitor* L. larvae - Influence of extraction conditions on kinetics, defatting performance and compositional properties. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 119, n. 2, p. 1600134, 17 maio 2016.

QI, B. et al. Differential scanning calorimetry study—assessing the influence of composition of vegetable oils on oxidation. **Food Chemistry**, v. 194, p. 601–607, 1 mar. 2016.

RAMOS-ESCUADERO, F. et al. Quality, stability, carotenoids and chromatic parameters of commercial Sacha inchi oil originating from Peruvian cultivars. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 11, p. 4901–4910, 26 jul. 2019.

RAMOS-BUENO, R. P. et al. Fatty acid profiles and cholesterol content of seven insect species assessed by several extraction systems. **European Food Research and Technology**, v. 242, n. 9, p. 1471–1477, 13 fev. 2016.

RAMOS-BUENO, R. P.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, J. P. Impact of solvent residues on the quality and safety of edible insect oil extraction. **Journal of Food Science**, v. 81, n. 2, p. 350–357, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13156>.

RAMOS-ELORDUY, J. et al. Potential of insects for food and feed. **Insects**, v. 13, n. 1, p. 41, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4450/13/1/41>.

RAVZANAADII, N. et al. Nutritional value of mealworm, *Tenebrio molitor* as food source. **International Journal of Industrial Entomology**, v. 25, n. 1, p. 93–98, 2012. DOI: 10.7852/ijie.2012.25.1.093.

REGULATION - 2021/1372 - EN - EUR-Lex. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1372>. Acesso em: 1 out. 2024.

REGULATION - 2017/893 - EN - EUR-Lex. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/893/oj>. Acesso em: 1 out. 2024.

RODRÍGUEZ, M. A. P. et al. Ácidos graxos das séries ômega-3 e ômega-6 e sua utilização no tratamento de doenças cardiovasculares: uma revisão. **Revista Saúde & Ciência**, v. 5, n. 2, 2016.

RUMBOS, C. I.; ATHANASSIOU, C. G. The superworm, *Zophobas morio* (Coleoptera: Tenebrionidae): a “sleeping giant” in nutrient sources. **Journal of Insect Science**, v. 21, n. 2, 1 mar. 2021.

RUPPERT, E. E.; FOX, R. S.; BARNES, R. D. **Invertebrate zoology: a functional evolutionary approach**. 7. ed. Belmont, CA: Thomson-Brooks/Cole, 2005.

SANTOS, O. V. et al. Artisanal oil obtained from insects’ larvae (*Speciomerus ruficornis*): fatty acids composition, physicochemical, nutritional and antioxidant properties for application in food. **European Food Research and Technology**, 247(7), 1803–1813, 27 abr. 2021.

SANTOS-SILVA, J.; BESSA, R. J. B.; SANTOS-SILVA, F. Effect of genotype, feeding system and slaughter weight on the quality of light lambs. **Livestock Production Science**, 77, 187–194, 2002.

SATRIANA, S. et al. Development of methods used in the extraction of avocado oil. **European Journal of Lipid Science and Technology**, 121(1), 1800210, 23 nov. 2018.

SCALA, A. et al. Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. **Scientific Reports**, 10(1), 19448, 10 nov. 2020.

SCOTT, K. J. Detection and measurement of carotenoids by UV/VIS spectrophotometry. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, 00(1), F2.2.1–F2.2.10, abr. 2001.

SHAHIDI, F.; HOSSAIN, A. Role of lipids in food flavor generation. **Molecules**, 27(15), 5014, 1 jan. 2022.

SHAW, J.; STOBART, R. H. Osmotic and ionic regulation in insects. **Advances in Insect Physiology**, 315–399, 1963.

- SIGER, A.; JÓZEFIK, M.; GÓRNAS, P. Cold-pressed and hot-pressed rapeseed oil: the effects of roasting and seed moisture on the antioxidant activity, canolol, and tocopherol level. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, 16(1), 69–81, 30 mar. 2017.
- SILVA, A. R.; OLIVEIRA, J. P.; SOUZA, F. M. Métodos de extração de óleos vegetais: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 24(3), 151–158, 2020.
- SILVA, M. S. et al. A new population of pequi (*Caryocar* spp.) developed by Brazilian indigenous people has agro-industrial and nutraceutical advantages. **European Food Research and Technology**, 246(9), 1715–1724, 4 jun. 2020.
- SILVA, R. M. et al. Proximate and fatty acid profile analysis of *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* using different killing methods. **Food Chemistry**, 138719, 1 fev. 2024.
- SIMOPOULOS, A. P. The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. **Experimental Biology and Medicine**, 233(6), 674–688, 2008. <https://doi.org/10.3181/0711-MR-311>.
- SLOW, H. S. et al. Mealworm (*Tenebrio molitor*) oil characterization and optimization of the free fatty acid pretreatment via acid-catalyzed esterification. **Fuel**, 299, 120905, set. 2021.
- SIRAM, K. et al. Pharmaceutical nanotechnology: brief perspective on lipid drug delivery and its current scenario. In: **Biomedical Applications of Nanoparticles**, 91–115, 2019.
- SMETANA, S.; SCHIMITT, E.; MATHYS, A. Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: attributional and consequential life cycle assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, 144, 285–296, 1 maio 2019.
- SON, Y.-J. et al. Could defatted mealworm (*Tenebrio molitor*) and mealworm oil be used as food ingredients? **Foods**, 9(1), 40, 2 jan. 2020.
- SOUZA, C. X. Extração de óleos de matrizes vegetais por prensagem mecânica e uso de solventes alternativos. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos)** – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/234047/TCC%20-%20Carolina%20Xavier.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SPRINGMANN, M. et al. Options for keeping the food system within environmental limits. **Nature**, 562(7728), 519–525, out. 2018.

SRISUKSAI, K. et al. Physicochemical properties and fatty acid profile of oil extracted from black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). **Veterinary World**, 518–526, mar. 2024.

STULL, V. J. et al. Impact of edible cricket consumption on gut microbiota in healthy adults, a double-blind, randomized crossover trial. **Scientific Reports**, 9(1), 4036, 2019.

SURENDRA, K. C. et al. Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. **Renewable Energy**, 98, 197–202, dez. 2016.

TAN, H. S. G. et al. Tasty but nasty? Exploring the role of sensory-liking and food appropriateness in the willingness to eat unusual novel foods like insects. **Food Quality and Preference**, 48, 293–302, mar. 2016.

TZOMPA-SOSA, D. A. et al. Insect lipid profile: aqueous versus organic solvent-based extraction methods. **Food Research International**, 62, 1087–1094, 1 ago. 2014.

TZOMPA-SOSA, D. A. et al. Four insect oils as food ingredient: physical and chemical characterisation of insect oils obtained by an aqueous oil extraction. **Journal of Insects as Food and Feed**, 1–14, 29 jan. 2019.

THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/en>. Acesso em: 1 out. 2024.

ULBRICHT, T. L. V.; SOUTHGATE, D. A. T. Coronary heart disease: seven dietary factors. **The Lancet**, 338(8773), 985–992, out. 1991.

UGUR, A. E. et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) processing and temperature on physicochemical characterization of insect oils extracted from *Acheta domesticus* (house cricket) and *Tenebrio molitor* (yellow mealworm). *Waste and Biomass Valorization*, **Springer Nature**, 2020.

UTRILLA-VÁZQUEZ, M. et al. Analysis of volatile compounds of five varieties of Maya cocoa during fermentation and drying processes by Venn diagram and PCA. **Food Research International**, 129, 108834, 1 mar. 2020.

VAN HUIS, A. et al. Advancing edible insects as food and feed in a circular economy.

Journal of Insects as Food and Feed, 7(5), 935–948, 2021.

VARELAS, V. Food wastes as a potential new source for edible insect mass production for food and feed: a review. **Fermentation**, 5(3), 81, 2 set. 2019.

VERHEYEN, G. R. et al. Insects as an alternative source for the production of fats for cosmetics. *Journal of Cosmetic Science*, 69(3), 187–202, 2018.

WHITFIELD, F. B.; MOTTRAM, D. S. Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 31(1–2), 1–58, jan. 1992.

WORLD POPULATION PROSPECTS 2022: SUMMARY OF RESULTS. UN

DESA/POP/2022/TR/NO. 3. Disponível em:

https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf. Acesso em: 1 out. 2024.

WHO; FAO. Joint consultation: fats and oils in human nutrition. **Nutrition Reviews**, 53(7), 202–205, 27 abr. 2009.

YANG, H.; IRUDAYARAJ, J.; PARADKAR, M. Discriminant analysis of edible oils and fats by FTIR, FT-NIR and FT-Raman spectroscopy. **Food Chemistry**, 93(1), 25–32, nov. 2005.

YI, L. et al. Lipid profile and biodiesel potential of edible insect oil: new insights into sustainable energy. **Sustainability**, 14(4), 1998, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14041998>.

YUSOFF, N. A. M.; THIAN, H. C.; KOMILUS, C. F. Proximate composition of larvae, prepupae and adult in black soldier fly (*Hermetia illucens*). **Journal of Agrobiotechnology**, 13(1S), 109–117, 7 out. 2022.

ZANQUI, A. B. et al. Production of blends of edible oil and carrot carotenoids using compressed propane: enhancement of stability and nutritional characteristics. **The Journal of Supercritical Fluids**, 171, 105189, 10 fev. 2021.

ZHANG, L.; ZHOU, L.; ZHANG, H. Microbiological safety of edible insects: a review.

Journal of Insects as Food and Feed, 5(1), 1–9, 2019.

<https://doi.org/10.3920/JIFF2018.0023>.

ZHANG, Y. et al. Effects of lipid oxidation on the quality of edible oils: a review. **Journal of Food Science and Technology**, 58(12), 4530–4540, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05056-5>.

ZHENG, L. et al. Exploring the potential of grease from yellow mealworm beetle (*Tenebrio molitor*) as a novel biodiesel feedstock. **Applied Energy**, 101, 618–621, jan. 2013.

ZHOU, J.; XIONG, Y.; XU, S. Evaluation of the oxidation stability of biodiesel stabilized with antioxidants using the PetroOXY method. **Fuel**, 184, 808–814, 2016.

ŻOŁNIERCZYK, A. K.; SZUMNY, A. Sensory and chemical characteristic of two insect species: *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* larvae affected by roasting processes. **Molecules**, 26(9), 2697, 4 maio 2021.