



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

TAYANE DE JESUS FREITAS

**FORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS COM ÓLEOS
COMESTÍVEIS MICROENCAPSULADOS: UM ESTUDO DE
PATENTES E DE ARTIGOS**

UFBA

SALVADOR

2022



TAYANE DE JESUS FREITAS

**FORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS COM ÓLEOS
COMESTÍVEIS MICROENCAPSULADOS: UM ESTUDO DE
PATENTES E DE ARTIGOS**

Dissertação 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. Camila Duarte Ferreira Ribeiro
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Deborah Murowaniecki Otero
Coorientadora

SALVADOR

2022

TAYANE DE JESUS FREITAS

**FORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS COM ÓLEOS
COMESTÍVEIS MICROENCAPSULADOS: UM ESTUDO DE
PATENTES E DE ARTIGOS**

A Comissão Julgadora dos trabalhos de defesa de Dissertação de Mestrado do(a) candidato(a) **Tayane de Jesus Freitas**, em sessão pública realizada em 16/09/2022.

Prof^a. Dr^a. Camila Duarte Ferreira Ribeiro (Orientador)

Faculdade de Farmácia

Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador, BA)

Prof^a. Dr^a. Giani Andrea Linde Colauto (Membro titular)

Escola de Nutrição

Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador, BA)

Prof^a. Dr^a. Itaciara Larroza Nunes (Membro titular)

Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos/Centro de Ciências Agrárias

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, Florianópolis, SC)

Salvador, 16 de setembro de 2022.

Dedico este trabalho,

À minha mãe, minha irmã, meus sobrinhos e a toda minha família e amigos que fizeram parte dessa caminhada.

Meus agradecimentos,

A Deus, primeiramente, por ter me dado força e saúde para trilhar essa caminhada e superar as dificuldades encontradas pelo caminho.

À minha mãe, por todo cuidado, amor, carinho, dedicação e compreensão.

À minha irmã, pelo carinho e pelas palavras de apoio necessárias para a minha trajetória.

Aos meus sobrinhos, Gui, Edu, Bela e Lili, que se tornaram o meu refúgio, a quem eu sempre procurava para espairer e deixar o meu dia mais leve.

A toda minha família, pelo carinho e compreensão da minha ausência nos eventos familiares.

Aos meus irmãos felinos, Brisa e Chuvisco, pela companhia e por serem abrigo nos momentos de cansaço e exaustão.

À minha orientadora, Camila, pelo carinho, atenção, amizade, orientação, apoio e confiança. Você foi fundamental na condução do meu trabalho e na minha chegada até aqui.

À minha coorientadora, Deborah, por todo apoio, aprendizado e orientação.

Aos meus colegas de turma, Superturma 2020.1, pela força e parceria necessárias para superar os percalços de um mestrado em formato remoto.

Aos meus amigos, coordenadora e colegas de trabalho, pelos momentos de descontração, pela amizade, apoio e compreensão.

Aos membros da banca, por todas as contribuições valorosas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto (nº do processo: 409924/2021-0).

E à Coordenação Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida (nº do processo: 88887.610846/2021-00).

Muito obrigada!

“A grande conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas”.

(Paulo Coelho)

RESUMO

A deficiência de micronutrientes é um problema de saúde pública relevante que ainda acomete diferentes países. Aliado a isso, a população tem buscado alimentos nutricionalmente melhores, inclusive com apelo aos compostos bioativos. Assim, os óleos comestíveis surgem como uma alternativa eficaz para amenizar os agravos decorrentes dessas carências nutricionais bem como para melhorar a qualidade da dieta. Entretanto, como os seus constituintes são sensíveis à oxidação, a indústria alimentícia tem investido em tecnologias que protejam e preservem esses óleos e seus componentes, como a técnica de microencapsulamento, que minimiza a degradação dos óleos e facilita seu processamento e aplicação nas matrizes alimentícias com fins de fortificação. Nesse contexto, a presente proposta teve como objetivo geral analisar a fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados no contexto tecnológico e científico. Para selecionar as patentes sobre microencapsulação de óleos e sua incorporação em alimentos, a busca foi realizada nas bases de dados Espacenet e Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). Já para a busca dos artigos científicos sobre o uso de óleos microencapsulados na fortificação de alimentos, foi realizada uma busca em dez bases de dados. O primeiro documento de patente foi depositado em 1999 e em 2015 houve um aumento significativo no número de patentes depositadas, com a China ocupando o primeiro lugar no desenvolvimento de tecnologias de microencapsulamento. Dentre as patentes que mencionaram a finalidade da microencapsulação, a melhoria da estabilidade oxidativa dos óleos foi o objetivo mais citado. Melhoria das propriedades organolépticas dos óleos e dos produtos alimentícios acrescidos com as microcápsulas, melhor solubilidade e proteção do óleo, liberação do composto encapsulado no local desejado e fortificação de alimentos foram outros objetivos mencionados nos documentos de patente. Tanto nas patentes quanto nos artigos científicos, a técnica de microencapsulamento mais empregada na indústria de alimentos foi o *spray drying*, a lecitina de soja e o óleo de peixe foram o emulsificante e o óleo microencapsulado, respectivamente, mais aplicados nas matrizes alimentícias. Os materiais de parede mais utilizados nas patentes foram amido modificado, maltodextrina e goma arábica, enquanto nos artigos foram maltodextrina, quitosana, goma arábica, caseinato de sódio e as proteínas do soro de leite. Os produtos de panificação e confeitaria, os produtos cárneos e os laticínios foram os grupos de alimentos mais enriquecidos com os óleos microencapsulados tanto nas patentes quanto nos artigos. Em relação aos efeitos dos óleos microencapsulados nos alimentos fortificados, foram relatados nos artigos modificações na composição nutricional, principalmente em termos dos teores de macronutrientes, como aumento no percentual de lipídios e proteínas, servindo como uma estratégia para a indústria alimentícia melhorar a composição desses alimentos fortificados. Os estudos de estabilidade apresentados nos artigos demonstraram que o microencapsulamento protege e preserva os óleos e seus compostos bioativos, mantendo a qualidade e características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais dos alimentos. Diante dos resultados expostos, conclui-se que o microencapsulamento de óleos comestíveis vem se expandindo ao longo dos anos e aumentando as possibilidades de uso pela indústria de alimentos, mas, devido à escassez de estudos, foi identificada a necessidade de pesquisas futuras que avaliem a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes óleos microencapsulados acrescidos aos alimentos.

Palavras-chave: *Enriquecimento. Lipídios. Compostos bioativos. Oxidação lipídica. Microencapsulamento.*

ABSTRACT

Micronutrient deficiency is a relevant public health problem that still affects different countries. Allied to this, the population has been looking for nutritionally better foods, including the appeal to bioactive compounds. Thus, edible oils emerge as an effective alternative to alleviate the problems resulting from these nutritional deficiencies as well as to improve the quality of the diet. However, as its constituents are sensitive to oxidation, the food industry has invested in technologies that protect and preserve these oils and their components, such as the microencapsulation technique, which minimizes the degradation of oils and facilitates their processing and application in food matrices with fortification purposes. In this context, the present proposal had as general objective to analyze the fortification of foods with microencapsulated edible oils in the technological and scientific context. To select patents on microencapsulation of oils and their incorporation into foods, the search was carried out in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases. As for the search for scientific articles on the use of microencapsulated oils in food fortification, a search was carried out in ten databases. The first patent document was filed in 1999 and in 2015 there was a significant increase in the number of patents filed, with China ranking first in the development of microencapsulation technologies. Among the patents that mentioned the purpose of microencapsulation, the improvement of the oxidative stability of the oils was the most cited objective. Improvement of the organoleptic properties of oils and food products added with microcapsules, better solubility and protection of the oil, release of the encapsulated compound at the desired location and food fortification were other objectives mentioned in the patent documents. Both in patents and in scientific articles, the microencapsulation technique most used in the food industry was spray drying, soy lecithin and fish oil were the emulsifier and microencapsulated oil, respectively, most applied in food matrices. The wall materials most used in the patents were modified starch, maltodextrin and gum arabic, while in the articles they were maltodextrin, chitosan, gum arabic, sodium caseinate and whey proteins. Bakery and confectionery products, meat products and dairy products were the food groups most enriched with microencapsulated oils in both patents and articles. Regarding the effects of microencapsulated oils in fortified foods, changes in the nutritional composition were reported in the articles, mainly in terms of macronutrient contents, such as an increase in the percentage of lipids and proteins, serving as a strategy for the food industry to improve the composition of these foods. fortified. The stability studies presented in the articles showed that the microencapsulation protects and preserves the oils and their bioactive compounds, maintaining the quality and physical-chemical, microbiological and sensory characteristics of the food. In view of the above results, it is concluded that the microencapsulation of edible oils has been expanding over the years and increasing the possibilities of use by the food industry, but, due to the scarcity of studies, the need for future research was identified to evaluate the bioaccessibility, bioavailability and cytotoxicity of these microencapsulated oils added to foods.

Keywords: *Enrichment. Lipids. Bioactive compounds. Lipid oxidation. Microencapsulation.*

LISTA DE FIGURAS

<i>CAPÍTULO II</i>	29
Figure 1 Annual distribution of publication of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases	33
Figure 2 Distribution of the codes of International Patent classification most used in the patent documents in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases	34
Figure 3 Profile of the studied patent documents from Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI)	35
Figure 4 Profile of patent documents on microencapsulation of oils from Espacenet and the National Institute of Industrial Property (INPI)	35
Figure 5 Distribution of the industrial application areas mentioned in the patent documents from Espacenet and the National Institute of Industrial Property (INPI)	36
Figure 6 Distribution of microencapsulation techniques in foods mentioned in the patent documents	43
Figure 7 Types of oils mentioned in patent documents for the production of microcapsules used in food	44
Figure 8 Types of wall materials used for microencapsulation in the patent documents	45
Figure 9 Distribution of patent documents deposited by countries in the Espacenet (A) and National Institute of Industrial Property (INPI) (B) databases	46
Figure 10 Distribution of article publications by countries in Scopus	47
Figure 11 Main depositors of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases	48
Figure 12 Main inventors of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases	49

CAPÍTULO III	57
Figura 1 Esquema da busca de artigos sobre o uso de óleos microencapsulados aplicados em alimentos para fins de fortificação em 10 bases científicas (a) e os critérios de elegibilidade adotados para a seleção dos artigos (b)	63
Figura 2 Representação do microencapsulamento de óleos comestíveis	64
Figura 3 Técnicas utilizadas para o microencapsulamento de óleos comestíveis ...	77
Figura 4 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por <i>spray drying</i>	78
Figura 5 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por <i>spray chilling</i>	79
Figura 6 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por liofilização	80
Figura 7 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por coacervação complexa	81
Figura 8 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por emulsificação	82
Figura 9 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por gelificação iônica	83
Figura 10 Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por revestimento em leito fluidizado	84
Figura 11 Óleos comestíveis microencapsulados	85
Figura 12 Representação dos grupos de materiais de parede empregados no microencapsulamento de óleos comestíveis (a), representados pelas proteínas (b) e carboidratos (c) mais utilizados.....	87
 CAPÍTULO IV	 102
Figura 1 Alimentos fortificados com óleos comestíveis microencapsulados	107
Figura 2 Análises físico-químicas mais recorrentes na avaliação da estabilidade dos alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis	149
Figura 3 Testes sensoriais aplicados na avaliação da estabilidade dos alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis	151

Figura 4	Análise de co-ocorrência de palavras-chave dos artigos experimentais (a) e de revisão (b) que abordaram a fortificação de alimentos com óleos microencapsulados	157
----------	---	------------

LISTA DE TABELAS

<i>CAPÍTULO II</i>	29
Table 1 Patent documents from the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases on lipid microcapsules used in food	37
Table 2 Microencapsulated oils and their applications in food products	49
 <i>CAPÍTULO III</i>	 57
Tabela 1 Principais técnicas de microencapsulamento, óleos comestíveis, materiais de parede e emulsificantes usados no processo e caracterização do microencapsulamento e das microcápsulas formadas	65
 <i>CAPÍTULO IV</i>	 102
Tabela 1 Quantidades de óleo e de material de parede utilizadas no microencapsulamento, teor do composto bioativo nas microcápsulas, alimento fortificado, quantidade de microcápsulas inseridas no alimento e composição nutricional do alimento não fortificado e fortificado	113
Tabela 2 Condições de armazenamento e principais características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais dos alimentos fortificados com óleos microencapsulados	135

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO I - Fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados: um estudo de patentes e de artigos</i>	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 Microencapsulamento de óleos comestíveis sobre o aspecto tecnológico	18
3.2 Microencapsulamento de óleos comestíveis e sua aplicação em alimentos sobre o aspecto científico	20
4 CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	26
 <i>CAPÍTULO II – Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs</i>	 29
 <i>CAPÍTULO III – Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte I: aspectos gerais e caracterização das microcápsulas</i>	 57
 <i>CAPÍTULO IV – Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte II: alimentos utilizados, efeitos na composição nutricional, estudos de estabilidade, de metabólicos e de citotoxicidade</i>	 102

Capítulo I

Fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados: um estudo de patentes e de artigos

1 INTRODUÇÃO

As deficiências nutricionais estão associadas a uma má nutrição, que pode ocorrer quando não se tem acesso à alimentação em quantidade e qualidade adequadas. Em todo o mundo, estima-se que a má nutrição pode afetar uma em cada três pessoas e que esse déficit no estado nutricional possa ter repercussões importantes sobre as condições de saúde (PEREIRA; YOKOO; ARAUJO, 2022). Aliado a isso, a população tem buscado cada vez mais alimentos *clean lebal*, ou seja, com poucos ingredientes e sem nomes complicados na lista, como os aditivos sintéticos, com vistas a melhorar a qualidade da alimentação.

Para prevenir ou reduzir as deficiências específicas de nutrientes, aumentar o valor nutricional dos alimentos e promover a saúde da população, a indústria alimentícia tem apostado na estratégia de fortificação ou enriquecimento de alimentos, que compreende a incorporação de componentes dentro de uma matriz alimentícia (VILLAMIL et al., 2020), sendo os óleos comestíveis uma opção para ser incorporada aos alimentos.

Os óleos comestíveis, em decorrência do alto teor de ácidos graxos essenciais e dos compostos bioativos presentes (carotenoides, tocoferóis, polifenóis, fitoesteróis, entre outros), proporcionam diferentes benefícios à saúde, como efeito antioxidante, antimicrobiano e anti-inflamatório, podendo ser utilizados na elaboração de novas formulações alimentícias (MOHAMMED et al., 2017).

Contudo, os óleos comestíveis são sensíveis, instáveis e sua oxidação é afetada por fatores externos e internos, como temperatura, luz, exposição ao oxigênio, composição de ácidos graxos, presença de antioxidantes e pró-oxidantes (MOHAMMED et al., 2017), o que torna mais difícil a sua aplicação nas matrizes alimentícias (FU et al., 2020). Assim, a incorporação direta desses óleos nas formulações de produtos alimentícios resultaria na sua degradação, e de seus componentes bioativos, o que prejudicaria substancialmente sua bioatividade, podendo também ocasionar consequências sensoriais negativas na qualidade dos alimentos (MEHTA et al., 2022).

À vista disso, a microencapsulação, além de reduzir reações indesejadas dos óleos comestíveis com os fatores ambientais, também facilita o manuseio e aplicação desses óleos nos alimentos, melhora as propriedades de liberação controlada e mascara o sabor e odor (ERATTE et al., 2018).

A microencapsulação é conhecida como uma tecnologia em desenvolvimento que está ganhando cada vez mais espaço em várias indústrias, incluindo a indústria alimentícia. O

microencapsulamento é um processo no qual os óleos comestíveis, como núcleo ou agentes ativos, são cercados por materiais de parede, formando microcápsulas de tamanhos que variam de 1 a 1000 μm (SINGH et al., 2022). Os encapsulantes devem ser de grau alimentício e capazes de formar uma camada protetora ao redor dos agentes ativos, regulando a sua liberação no meio ambiente. Os métodos de microencapsulação utilizam diferentes materiais de parede (carboidratos, lipídios e proteínas), e também empregam emulsificantes quando necessário. Várias são as técnicas de microencapsulamento disponíveis, podendo ser escolhida aquela que mais se adequa ao óleo comestível utilizado, ao objetivo da microencapsulação e à matriz alimentícia em que serão aplicadas as microcápsulas (SANI et al., 2020).

Existem diversas indústrias de alimentos com produtos potenciais para inclusão de óleos comestíveis microencapsulados, incluindo laticínios, produtos cárneos, produtos de panificação e bebidas (MEHTA et al., 2022). Além da fortificação de alimentos, como foi referido por Beikzadeh *et al.* (2020) e Kawecki, Stangierski e Konieczny (2021a), que adicionaram microcápsulas de óleo de linhaça em pães e de óleo de peixe em salsichas, respectivamente, diferentes motivos para aplicação das microcápsulas de óleos nos alimentos têm sido relatadas por vários pesquisadores, como substituição parcial da gordura animal por óleo de chia microencapsulado em hambúrgueres (HECK et al., 2018; HECK et al., 2019) ou da margarina também pelas microcápsulas de óleo de chia na formulação de biscoitos (VENTURINI et al., 2019); liberação de ômega-3 presente no óleo de peixe microencapsulado, carregado por suco, iogurte e barra de cereal, no local desejado (SANGUANSRI et al., 2013); proteção e estabilidade oxidativa do óleo de chia microencapsulado e aplicado em biscoitos (ALMEIDA et al., 2018).

Para a fortificação de alimentos variados, diferentes óleos comestíveis têm sido utilizados. Biscoitos, sorvete, manteiga e iogurte enriquecidos com óleos de peixe (DAMERAU et al., 2022), linhaça (GOWDA et al., 2018), chia (ULLAH et al., 2020) e de palma (RUTZ et al., 2016), respectivamente, foram desenvolvidos.

Dessa forma, a aplicação de óleos comestíveis microencapsulados em alimentos pode ser uma alternativa viável e inovadora para a indústria alimentícia desenvolver novos alimentos com propriedades desejáveis, que supram a demanda daqueles consumidores que priorizam uma alimentação cada vez mais saudável, rica em nutrientes e funcional, e que possam prevenir os agravos nutricionais decorrentes da deficiência de nutrientes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- ✓ Analisar a fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados no contexto tecnológico e científico.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar a propriedade intelectual relacionada a patentes de óleos microencapsulados aplicados em alimentos;
- ✓ Analisar as técnicas de microencapsulamento empregadas nos óleos comestíveis, bem como os óleos, os materiais de parede e os emulsificantes mais utilizados nesse processo, relacionando-os com a caracterização das microcápsulas;
- ✓ Avaliar a utilização de óleos comestíveis microencapsulados na fortificação de alimentos;
- ✓ Analisar o efeito das microcápsulas de óleos nos alimentos fortificados sob o aspecto nutricional;
- ✓ Compreender a estabilidade físico-química, microbiológica e sensorial das matrizes alimentícias fortificadas com os óleos microencapsulados sob diferentes condições de armazenamento;
- ✓ Pesquisar a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes óleos comestíveis e de seus componentes.
- ✓ Analisar as perspectivas futuras de estudos a partir da análise de co-ocorrência.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tendência atual dos consumidores é buscar por alimentos que satisfaçam suas necessidades básicas e que também proporcionem efeitos benéficos para a saúde humana, melhorando o funcionamento do corpo e aumentando a oferta de nutrientes. A ideia de produzir alimentos com maior valor agregado à saúde apoia-se no enriquecimento de gêneros alimentícios com ingredientes que apresentem tais propriedades, como os compostos bioativos, por exemplo (KAWECKI *et al.*, 2021b).

Potencializar o valor nutricional dos alimentos e oferecer opções mais saudáveis são propostas da fortificação de matrizes alimentícias com microcápsulas de óleos comestíveis, visto que estes apresentam em sua composição ácidos graxos poli-insaturados e compostos antioxidantes, e essa prática já vem sendo aprovada pelas indústrias de alimentos e pelos consumidores (JAMSHIDI *et al.*, 2020). O uso de alimentos fortificados evita a necessidade de mudança de hábitos alimentares e quantidades adequadas de nutrientes podem ser fornecidas regularmente, melhorando a dieta e prevenindo ou corrigindo eventuais deficiências nutricionais apresentadas pela população (PATEL *et al.*, 2022).

A correta utilização desses óleos pela indústria alimentícia perpassa necessariamente pelo conhecimento da sua composição, visto que as tecnologias de processamento podem provocar a degradação dos compostos bioativos que constituem esses óleos. Tecnologias avançadas, como a microencapsulação, vêm sendo empregadas, tornando, assim, possível a preservação e aplicação dos óleos comestíveis microencapsulados em matrizes alimentícias (MARCONI, 2016).

3.1 Microencapsulamento de óleos comestíveis sobre o aspecto tecnológico

A patente é um título de propriedade temporário, oficial, concedido pelo Estado, por força de lei, ao seu titular ou seus sucessores (pessoa física ou pessoa jurídica), que passam a possuir os direitos exclusivos sobre o bem, seja de um produto, de um processo de fabricação ou aperfeiçoamento de produtos e processos já existentes, objetos de sua patente, sendo que terceiros podem explorar a patente somente com permissão do titular (INPI, 2021). Elas são um bom indicador para medir o progresso tecnológico dos países, pois representam de forma concreta a criação e a difusão do conhecimento na atividade produtiva (FERREIRA; GUIMARÃES; CONTADOR, 2009). Na área de microencapsulamento de óleos comestíveis para aplicação em alimentos, as informações que possivelmente costumam ser objeto de

proteção incluem a técnica de microencapsulação empregada, o tipo de óleo e quais materiais de parede utilizados e o objetivo do microencapsulamento do óleo.

Prospecções tecnológicas consistem em estudos que mapeiam informações presentes em bancos de dados de patentes, permitem conhecer o estado atual da tecnologia, possíveis rotas tecnológicas e áreas que empregam a tecnologia e, além disso, fornecem uma direção para pesquisas futuras (FREITAS *et al.*, 2022).

Os estudos prospectivos sobre a temática em questão abordaram a evolução anual no número de depósitos, os principais óleos usados, as áreas de aplicação das microcápsulas, bem como a origem, os detentores e inventores da tecnologia em estudo.

Ribeiro *et al.* (2021) produziram um estudo prospectivo com o objetivo de avaliar o cenário mundial em relação ao microencapsulamento de óleos e seus benefícios, principalmente na indústria alimentícia, correlacionando-o com os documentos de patentes depositados. Os pesquisadores concluíram que existe uma tendência ao crescimento de depósitos de patentes relacionadas à temática, apontando que muitas inovações têm sido realizadas, e verificaram, a respeito da origem da tecnologia patenteada, uma concentração nos países desenvolvidos, com domínio pelo Japão, Estados Unidos e China. Constatou-se também que, no âmbito nacional, o número de patentes depositadas pelo Brasil é muito pequeno, revelando que o uso da tecnologia de microencapsulamento aparece como uma grande oportunidade de geração de patentes, principalmente pelas inúmeras possibilidades de aplicação dessa tecnologia no desenvolvimento de novos produtos alimentícios.

Em outra prospecção tecnológica, Castro *et al.* (2021) identificaram as principais tendências internacionais no microencapsulamento de óleos vegetais comestíveis por meio de uma análise de patentes depositadas em escritórios nacionais e internacionais. Concluiu-se que o microencapsulamento de óleos vegetais vem sendo estudado pelas universidades e centros de pesquisa pelo mundo. Contudo, esses estudos ainda são despreziosos em relação à geração de propriedade intelectual. As patentes analisadas apresentaram diferentes aplicações dos óleos microencapsulados, tais como na indústria de alimentos e na preservação de compostos bioativos, e a China destacou-se como o principal país depositante. Por fim, os pesquisadores também perceberam que o microencapsulamento é uma tecnologia aplicada aos óleos vegetais comestíveis que pode proporcionar um aumento do potencial produtivo e do incentivo à inovação tecnológica na agroindústria.

3.2 Microencapsulamento de óleos comestíveis e sua aplicação em alimentos sobre o aspecto científico

Os trabalhos de revisão mais recentes sobre o microencapsulamento de óleos comestíveis e sua aplicação em matrizes alimentícias têm abordado a temática sobre a perspectiva da proteção contra a oxidação conferida aos óleos que são submetidos a esse processo, sem a perda da qualidade sensorial dos alimentos, como também o impacto positivo à saúde dos indivíduos que consumirem esses alimentos enriquecidos. Outras questões levantadas pelos pesquisadores incluem a necessidade de novos estudos para avaliação do efeito tóxico das microcápsulas de óleos ao organismo e análise da estabilidade dessas matrizes adicionadas de óleos microencapsulados, bem como a viabilidade econômica de todo o processo de microencapsulação às indústrias alimentícias.

A necessidade de novos estudos para avaliação do efeito tóxico das microcápsulas de óleos ao organismo é levantada pelos pesquisadores.

Mehta *et al.* (2022) elaboraram uma revisão com o objetivo de fornecer conhecimento sobre os avanços recentes nas estratégias de microencapsulação. Os autores expuseram que o uso de compostos bioativos naturais, presentes nos óleos comestíveis, como ingredientes alimentícios ou agentes terapêuticos apresenta algumas limitações, pois sua bioatividade é afetada pelas condições de processamento e armazenamento, e que o microencapsulamento é uma estratégia utilizada por vários pesquisadores com o intuito de prevenir a degradação dos componentes bioativos e também aumentar a biodisponibilidade desses nutrientes em seu local de absorção. Os autores concluíram que a tecnologia de microencapsulação, usada como alternativa para fortificação de alimentos, está ganhando popularidade entre os consumidores devido às vantagens inerentes à entrega de ingredientes ativos e aos benefícios associados à saúde, e que a projeção da pesquisa Global Market Insights de 2017, é que o mercado de alimentos funcionais com ingredientes ativos encapsulados deve chegar a US\$ 45 bilhões até 2024. Como desafio, os autores propuseram que a indústria alimentícia explorasse ainda mais o uso de proteínas vegetais como materiais encapsulantes, a fim de alcançar um público maior, como os vegetarianos e veganos.

A fortificação de alimentos com proporções equilibradas de ácidos graxos ômega-3/ômega-6, os produtos alimentícios desenvolvidos mais recentemente, as tecnologias inovadoras e os desafios da fortificação de alimentos com ácidos graxos ômega-3 foram estudados por Patel *et al.* (2022). A microencapsulação foi uma das tecnologias apresentadas pelos autores como técnica para retardar ou inibir a oxidação dos ácidos graxos poli-insaturados

que compõem os óleos comestíveis, bem como o desenvolvimento de sabores e odores indesejáveis quando aplicados nas matrizes alimentícias. Como desvantagens da fortificação com óleos comestíveis microencapsulados, os pesquisadores citaram o custo do produto final, uma vez que o processo de microencapsulamento pode ser mais caro do que o próprio composto encapsulado.

As características físico-químicas, reológicas, microbiológicas e sensoriais de iogurtes contendo microcápsulas carregadas de óleos comestíveis ricos em ácidos graxos poli-insaturados foram discutidas com ênfase particular nos mecanismos de biodisponibilidade, bem como nos efeitos nutricionais e terapêuticos (GUMUS; GHARIBZAHEDI, 2021). Além disso, algumas soluções práticas e inovadoras também foram propostas para melhorar o processo de enriquecimento, a qualidade físico-química e sensorial do produto e os benefícios para a saúde. Os pesquisadores concluíram que, no geral, as microcápsulas desenvolvidas foram adequadas como transportadoras de ácidos graxos ômega-3 em formulações de iogurtes fortificados, pois esses ingredientes lipídicos funcionais mostraram uma baixa taxa de oxidação nos produtos lácteos desenvolvidos. Eles também constataram que a microencapsulação pode favorecer o aumento da absorção e biodisponibilidade de ômega-3 e que a ingestão diária desses iogurtes fortificados com óleos microencapsulados resultou em redução significativa do perfil lipídico e de fatores de risco relacionados à obesidade dos consumidores.

Uma visão geral das recentes técnicas de encapsulamento aplicadas ao óleo de linhaça, sua aplicação na indústria de alimentos e seus efeitos nas propriedades das matrizes alimentícias foram apresentadas por Kouamé *et al.* (2021). Os autores trouxeram que a incorporação de óleo de linhaça em formulações alimentícias é limitada por diversos fatores, principalmente por sua sensibilidade à oxidação, que acaba afetando negativamente as características sensoriais dos produtos alimentícios, e que as técnicas de microencapsulação são um trunfo para preservar os componentes do óleo, como o ácido alfa linolênico, durante o processamento dos alimentos e permitir uma maior biodisponibilidade. Os resultados discutidos indicaram que a microencapsulação melhorou a atividade antioxidante de gêneros alimentícios, dentre eles iogurte, sorvete, pão e patê, estendeu a vida útil dos produtos, ao prevenir sua oxidação, e melhorou suas características sensoriais. Os pesquisadores também ressaltaram a necessidade de mais estudos *in vivo* e *in vitro* para ajudarem nas pesquisas sobre a incorporação e uso do óleo de linhaça em diferentes alimentos.

Rousta *et al.* (2021) elaboraram um estudo de revisão a fim de identificar tendências na produção de novos produtos funcionais à base de cereais por meio da tecnologia de

microencapsulação. A maioria dos estudos na literatura mostra que a utilização de compostos bioativos microencapsulados em vez de livres pode ser mais eficaz para enriquecer ou fortificar produtos à base de cereais (massas alimentícias, bolos, biscoitos, pães), sem ter um impacto negativo significativo nas suas propriedades físico-químicas e de textura. Os autores apontaram que o *spray drying* foi a técnica mais utilizada no microencapsulamento de óleos comestíveis e seus compostos bioativos, o que pode ser explicado por suas vantagens como flexibilidade e baixo custo. Também foi mostrado pelos pesquisadores que embora muitos componentes bioativos microencapsulados tenham sido incorporados com sucesso em produtos de panificação em escala laboratorial, eles podem não ser adequados para expansão em instalações de produção industrial, pois os equipamentos especiais e os materiais usados para microencapsular os óleos comestíveis aumentarão os custos de produção, o que não é interessante, uma vez que a vantagem dos baixos custos associados aos produtos à base de cereais pode ser perdida. Nesse mesmo estudo foi ressaltada a importância de considerar os efeitos tóxicos dos materiais utilizados no microencapsulamento para uma incorporação segura aos alimentos.

Os recentes desenvolvimentos na microencapsulação de materiais ricos em carotenoides, incluindo os óleos comestíveis, suas vantagens, limitações e os avanços na incorporação das micropartículas ricas em carotenoides em produtos alimentícios foram estudados por Santos *et al.* (2021). Os autores afirmaram que a produção de gêneros alimentícios de valor agregado e com propriedades nutricionais aprimoradas, foi o objetivo principal da incorporação de micropartículas ricas em carotenoides nos alimentos, como as micropartículas de óleo de palma, uma vez que os carotenoides apresentam atividades pró-vitamina A e antioxidantes. No entanto, devido às cores típicas desses compostos bioativos, as micropartículas também podem ser utilizadas como pigmentos naturais, aumentando a atratividade dos alimentos. Além disso, os pesquisadores mostraram que um pequeno número de estudos sobre aspectos decisivos para a incorporação de micropartículas ricas em carotenoides em alimentos em nível industrial revela tendências que devem ser investigadas no futuro, a exemplos de como os carotenoides microencapsulados são afetados durante o processamento das matrizes alimentícias, a aceitação sensorial dos produtos incorporados com micropartículas contendo materiais ricos em carotenoides e os efeitos de diferentes técnicas de microencapsulação e agentes encapsulantes na bioacessibilidade e biodisponibilidade de carotenoides presentes nos óleos comestíveis microencapsulados e aplicados nos alimentos.

Venugopalan *et al.* (2021) destacaram em seu estudo de revisão os principais desafios relacionados à incorporação de óleos ricos em ácidos graxos ômega-3 aos alimentos, os diferentes tipos de tecnologias de microencapsulamento disponíveis para criar formas fluidas e em pó destes óleos e os métodos de caracterização das propriedades dos óleos microencapsulados. Do ponto de vista prático, os pesquisadores concluíram que as microemulsões costumam ser as mais adequadas para proteger os óleos marinhos comestíveis ricos em ômega-3, pois podem ser facilmente formuladas, a partir de processos de homogeneização, usando ingredientes de qualidade alimentar, como diferentes emulsificantes de grau alimentício (proteínas, polissacarídeos, fosfolipídios e surfactantes). Os autores ressaltaram que pesquisas futuras serão importantes para identificar as tecnologias de microencapsulamento ideais para produtos alimentícios específicos. Além disso, a viabilidade econômica desses processos deve ser esclarecida antes que possam encontrar ampla adoção comercial.

Os benefícios do óleo de peixe para a saúde humana, a limitação da sua aplicação em alimentos, as técnicas utilizadas para incorporar o óleo de peixe em produtos alimentares, dentre elas a microencapsulação, os produtos que vem sendo fortificados com este óleo e os efeitos da sua incorporação em produtos alimentícios foram discutidos por Jamshidi *et al.* (2020). Os pesquisadores constataram que as técnicas de microencapsulação são uns dos métodos mais comuns utilizados para fortificar produtos alimentícios com óleo de peixe, proporcionando proteção aos produtos fortificados, além de reduzir os efeitos das condições ambientais. Os autores também propõem novos estudos para avaliar as características sensoriais e a vida útil dos alimentos fortificados com óleo de peixe microencapsulado.

Villamil *et al.* (2020) desenvolveram seu estudo com o objetivo de descrever a tendência atual da literatura científica que mostra o impacto da incorporação de fontes ricas em ácidos graxos insaturados nas propriedades tecnológicas dos queijos. Os pesquisadores descobriram que para veículos como queijo fresco, cheddar e mussarela, a microencapsulação parece ser a melhor alternativa para evitar a oxidação lipídica dos óleos comestíveis, principalmente quando se adiciona óleo de peixe. Os autores concluíram também que, de acordo com o tipo de queijo, a etapa de inclusão dos óleos microencapsulados é crucial para permitir maior retenção de óleo no produto final.

4 CONCLUSÃO

A aplicação de óleos comestíveis microencapsulados em alimentos tem sido uma estratégia que a indústria alimentícia tem utilizado para melhorar a qualidade dos alimentos produzidos. Sobre o aspecto tecnológico, percebeu-se que os documentos de patentes depositados vêm crescendo a taxas variáveis ao longo dos anos, ampliando as possibilidades de aplicação das microcápsulas. A China foi o país de destaque em relação à origem, detentores e inventores da tecnologia patenteada em relação à microencapsulação de óleos comestíveis, reflexo dos investimentos que são aplicados na área de ciência e tecnologia no país, mostrando que investimentos adicionais ainda precisam ser feitos para impulsionar essa tecnologia em países como o Brasil.

Para prevenir ou reduzir as deficiências nutricionais, que ainda acomete uma parcela significativa da população mundial, bem como para atender à demanda populacional em relação à saudabilidade alimentícia, microcápsulas de óleos comestíveis têm sido utilizadas na fortificação de diversas matrizes alimentícias. A técnica de *spray drying* foi a mais usada entre os estudos científicos. O óleo de peixe, rico em ácidos graxos poli-insaturados, a maltodextrina e a lecitina de soja foram os componentes mais empregados no processo de microencapsulamento. Os pesquisadores alcançaram valores de eficiência de microencapsulamento superiores a 90,0%, mostrando que a microencapsulação protegeu os óleos comestíveis, proporcionando melhor retenção de seus compostos bioativos. Produtos de panificação e confeitaria, os cárneos e os laticínios foram as matrizes mais beneficiadas com a aplicação das microcápsulas de óleos, sendo que a composição nutricional destes sofreu influência dos constituintes das microcápsulas, podendo ser uma estratégia para a indústria alimentícia melhorar a composição desses alimentos fortificados, como o teor de proteínas e de ácidos graxos ômega-3, por exemplo.

Em relação à estabilidade dos alimentos enriquecidos durante o período de armazenamento, as características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais foram mantidas na maioria dos alimentos, apontando que a adição de óleos comestíveis microencapsulados pode aprimorar a qualidade nutricional dos alimentos sem perder a qualidade original do produto, aspecto desejado tanto pela indústria quanto pelos consumidores.

Dentre os poucos estudos que avaliaram a bioacessibilidade e biodisponibilidade dos óleos e de seus compostos bioativos nos alimentos fortificados, foi reforçada a importância da microencapsulação em proporcionar proteção a esses componentes para que possam atender às

necessidades nutricionais dos consumidores e promover efeitos benéficos à saúde. Já em relação à citotoxicidade, são necessários mais estudos para elucidar o efeito citotóxico destas microcápsulas no organismo dos indivíduos que consumirem os alimentos enriquecidos.

Diante dos resultados apresentados, entende-se que a fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados é uma estratégia que pode garantir a melhoria do valor nutricional dos alimentos, sem acarretar grandes impactos na qualidade sensorial, auxiliando na diminuição das carências nutricionais. Muitos estudos já foram desenvolvidos nessa temática, mas outros tipos de alimentos ainda podem ser explorados como matrizes para aplicação das microcápsulas, como aqueles voltados para o público vegetariano/vegano e intolerantes ao glúten e/ou lactose, por exemplo, e outros óleos podem ser mais utilizados, como os de linhaça, chia e palma. Sendo assim, este trabalho poderá contribuir para o campo científico, tecnológico, social e econômico em um futuro próximo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. M. C. *et al.* Textural, color, hygroscopic, lipid oxidation, and sensory properties of cookies containing free and microencapsulated chia oil. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, p. 926-939, 2018.
- BEIKZADEH, S. *et al.* Comparison of properties of breads enriched with omega-3 oil encapsulated in β -glucan and *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells. **Applied Food Biotechnology**, v. 7, p. 11-20, 2020.
- CASTRO, J. P. *et al.* Tendências mundiais de geração de conhecimento e propriedade intelectual sobre o microencapsulamento de óleos vegetais com destaque para o óleo de café. **Cadernos de Prospecção**, v. 14, n. 1, p. 298-311, 2021.
- DAMERAU, A. *et al.* Food fortification using spray-dried emulsions of fish oil produced with maltodextrin, plant and whey proteins - Effect on sensory perception, volatiles and storage stability. **Molecules**, v. 27, 2022.
- ERATTE, D. *et al.* Recent advances in the microencapsulation of omega-3 oil and probiotic bacteria through complex coacervation: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 71, p. 121-131, 2018.
- FERREIRA, A. A.; GUIMARÃES, E. R.; CONTADOR, J. C. Patente como instrumento competitivo e como fonte de informação tecnológica. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 2, p. 209-221, 2009.
- FREITAS, T. J. *et al.* Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs. **Recent Patents on Nanotechnology**, v. 16, p. 219-234, 2022.
- FU, J. *et al.* Improving oxidative stability and release behavior of docosahexaenoic acid algae oil by microencapsulation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, p. 2774-2781, 2020.
- GOWDA, A. *et al.* Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, p. 1705-1715, 2018.
- GUMUS, C. E.; GHARIBZAHEDI, S. M. T. Yogurts supplemented with lipid emulsions rich in omega-3 fatty acids: New insights into the fortification, microencapsulation, quality properties, and health-promoting effects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 110, p. 267-279, 2021.
- HECK, R. T. *et al.* Oxidative stability of burgers containing chia oil microparticles enriched with rosemary by green-extraction techniques. **Meat Science**, v. 146, p. 147-153, 2018.
- HECK, R. T. *et al.* Volatile compounds and sensory profile of burgers with 50% fat replacement by microparticles of chia oil enriched with rosemary. **Meat Science**, v. 148, p. 164-170, 2019.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI. Manual Básico para Proteção por Patentes de Invenções, Modelos de Utilidade e Certificados de Adição. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes/guia-basico/ManualdePatentes20210706.pdf>. Acesso em: 06 de setembro 2022.

JAMSHIDI, A. *et al.* Advantages of techniques to fortify food products with the benefits of fish oil. **Food Research International**, v. 137, 2020.

KAWECKI, K.; STANGIERSKI, J.; KONIECZNY, P. An analysis of oxidative changes and the fatty acid profile in stored poultry sausages with liquid and microencapsulated fish oil additives. **Molecules**, v. 26, 2021a.

KAWECKI, K. *et al.* Influence of fish oil and microencapsulated fish oil additives on water binding and the rheological properties of poultry sausage batters. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, p. 1127-1133, 2021b.

KOUAMÉ, K. J. E.-P. *et al.* Novel trends and opportunities for microencapsulation of flaxseed oil in foods: A review. **Journal of Functional Foods**, v. 87, 2021.

MARCONI, L. F. C. B. Caracterização de óleos comestíveis de alto valor agregado: propriedades físico-químicas, perfil cromatográfico e atividade antioxidante. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Alimentos. Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

MEHTA, N. *et al.* Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: a comprehensive review. **Applied Sciences**, v. 12, 2022.

MOHAMMED, N. K. *et al.* Quality changes of microencapsulated *Nigella sativa* oil upon accelerated storage. **International Journal of Food Properties**, v. 20, p. S2395–S2408, 2017.

PATEL, A. *et al.* Futuristic food fortification with a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of lifestyle diseases. **Trends in Food Science & Technology**, v. 120, p. 140–153, 2022.

PEREIRA, R. A.; YOKOO, E. M.; ARAUJO, M. C. Evolução da má-nutrição na população brasileira. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2022.

RIBEIRO, C. D. F. *et al.* Estudo prospectivo sobre microencapsulamento de óleos vegetais no Brasil e no mundo: uma análise até 2013. **Cadernos de Prospecção**, v. 14, n. 1, p. 281-297, 2021.

ROUSTA, L. K. *et al.* Use of encapsulation technology to enrich and fortify bakery, pasta, and cereal-based products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 118, p. 688–710, 2021.

RUTZ, J. K. *et al.* Elaboration of microparticles of carotenoids from natural and synthetic sources for applications in food. **Food Chemistry**, v. 202, p. 324-333, 2016.

SANGUANSRI, L. *et al.* Omega-3 fatty acids in ileal effluent after consuming different foods containing microencapsulated fish oil powder – an ileostomy study. **Food & Function**, v. 4, p. 74-82, 2013.

SANI, I. K. *et al.* Physico-chemical, organoleptic, antioxidative and release characteristics of flavoured yoghurt enriched with microencapsulated *Melissa officinalis* essential oil. **International Journal of Dairy Technology**, v. 73, p. 542-551, 2020.

SANTOS, P. D. F. *et al.* Microencapsulation of carotenoid-rich materials: A review. **Food Research International**, v. 147, 2021.

SINGH, H.; KUMAR, Y.; MEGHWAL, M. Encapsulated oil powder: Processing, properties, and applications. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, 2022.

ULLAH, R., *et al.* Effect of microcapsules of chia oil on Ω -3 fatty acids, antioxidant characteristics and oxidative stability of butter. **Lipids in Health and Disease**, v. 19, 2020.

VENTURINI, L. H. *et al.* Partial substitution of margarine by microencapsulated chia seeds oil in the formulation of cookies. **Food and Bioprocess Technology**, v. 12, p. 77-87, 2019.

VENUGOPALAN, V. K. *et al.* Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. **Foods**, v. 10, 2021.

VILLAMIL, R.-A. *et al.* Cheese fortification through the incorporation of UFA-rich sources: A review of recent (2010-2020) evidence. **Heliyon**, v. 6, 2020.

Capítulo II

Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs

DOI: 10.2174/1872210515666210422123001

Prospective study on microencapsulation of oils and its application in foodstuffs

Tayane de Jesus Freitas¹, Larissa Santos Assunção², Vanessa de Lima Silva², Tainara Santos Oliveira¹, Ismara Santos Rocha Conceição², Bruna Aparecida Souza Machado³, Itaciara Larroza Nunes^{2,4}, Deborah Murowaniecki Otero², Camila Duarte Ferreira Ribeiro^{1,2*}

¹Faculty of Pharmacy, Federal University of Bahia, Salvador, Brazil; ²Nutrition School, Federal University of Bahia, Salvador, Brazil; ³University Center SENAI CIMATEC, National Service of Industrial Learning, Laboratory of Pharmaceutical's Formulations, SENAI Institute of Innovation (ISI) in Advanced Health Systems (CIMATEC ISI SAS), Salvador, Brazil; ⁴Department of Food Science and Technology, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

*Address correspondence to this author at the Department of Food Science, Nutrition School, Federal University of Bahia, P.O. Box: 40.110.907, Salvador, Brazil; Tel/Fax: ++55-71-99132-0655; E-mail: camiladuartef@ufba.br

Abstract: Background: Edible oils have gained the interest of several industrial sectors for the different health benefits they offer, such as the supply of bioactive compounds and essential fatty acids. Microencapsulation is one of the techniques that has been adopted by industries to minimize the degradation of oils, facilitating their processing.

Objective: To evaluate the intellectual property related to patent documents referring to microencapsulated oils used in foods.

Methods and Results: This prospective study investigated the dynamics of patents filed in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases, and it mapped technological developments in microencapsulation in comparison with scientific literature. The years 2015 and 2018 showed the greatest growth in the number of patents filed in the Espacenet and INPI databases, respectively with China leading the domains of origin, inventors, and owners of microencapsulation technology. The largest number of applications of microcapsules were observed in the food industry, and the foods containing microencapsulated oils were powdered seasonings, dairy products, rice flour, nutritional formulae, pasta, nutritional supplements, and bread. The increase in oxidative stabilities of oils was the most cited objective to microencapsulate oils. Spray drying was the most widely used microencapsulation technique, and maltodextrin, gum arabic, and modified starch were the most widely used wall materials.

Conclusion: Microencapsulation of oils has been expanding over the years and increasing the possibilities of the use of microcapsules, but further investments and development of policies and incentive programs to boost this technology need to be made in less developed countries. For future perspectives, the microencapsulation technique is already a worldwide trend in the food industry, enabling the development of new products to facilitate their insertion in the consumer market.

Keywords: Bioactive compounds, microencapsulated oil, microcapsules, food industry, patent application, technological prospection.

1. INTRODUCTION

Microencapsulated edible oils have been incorporated in several foods such as seasoning powders [1], milk, soy milk [2], goat milk powder, cow milk powder, rice flour [3], fermented drinks [4], nutritional formulae [5,6,7], pasta [8], nutritional supplements [9], and bread [10]. In addition to the food industry, lipid microcapsules can be applied to the development of new technologies and products in other sectors such as the pharmaceutical industry.

Edible oils have attracted the interests of food, textile, cosmetic, and pharmaceutical industries owing to their functional properties, safety, natural origin, and comprehensive acceptance by consumers. These oils have gained attention because of their health benefits, e.g., the presence of essential fatty acids such as omega-3 in some oils. The oils act as sources of calories and as conductors of fat-soluble vitamins such as A, D, E, and K. Additionally, many of these oils are rich in bioactive compounds such as carotenoids, tocopherols, polyphenols, and phytosterols [11,12].

Despite their great potential, these oils are chemically unstable. When exposed to oxygen and environments with a high amount of light, heat, and humidity, they become susceptible to oxidation and lose volatile compounds, decreasing the quality of oil and enriched products [11]. Therefore, considering the functional properties of bioactive compounds present in edible oils, the food industry has invested in technologies that will preserve such properties during the processing, storage, and transportation of foods and facilitate the incorporation of oils in processed foods. One of the techniques that has been widely adopted by industries to minimize oil degradation is microencapsulation [13,14].

Microencapsulation can be used to obtain oils in the form of a stable powder, which can easily be dispersed in water and incorporated in food. This technology comprises packing solids, liquid droplets, or gaseous material with thin polymeric covers forming small particles called microcapsules, which can range from 0.2 μm to 5000 μm . The roof is known as the wall and the encapsulated material as the core. The main function of the wall is to increase the life span of the core by delaying its isomerization and oxidation [15,16].

Microcapsules have been used in the food industry for several reasons such as reducing the reactivity of the nucleus with external environmental factors, reducing the transfer or evaporation rate of the encapsulated material to the external environment, facilitating handling by modifying the original physical characteristics of the material, arranging the main material in a uniform manner to facilitate its incorporation in the product, controlling the release of the encapsulated material at the desired time, and masking the flavor of the core [17].

Microcapsules containing different types of oils have been used in foods such as cheese, yogurt, milk, bread, biscuits, infant formula, and sausages [11]. These microencapsulated oils have been used for food fortification such as the incorporation of fish oil in sausage [18], flaxseed oil in yogurt [19], chia oil in biscuits [20], and palm oil in bread [21].

Nanofluids increase the performance of heat exchange as compared to pure liquids. Therefore, in addition to microcapsules, which are being used for innovation in industries, nanoparticles are being used for the development and improvement of nanofluid technologies to optimize heat transfer in industrial processes [22,23,24,25,26].

Prospective studies, which map information present in patent databases, allow us to know the current state of technology, possible technological routes, and areas employing the technology. Additionally, they provide a direction for future research [27].

The benefits of oil microencapsulation have gained the interest of many industries, especially the food industry. Therefore, the present study aimed to evaluate the intellectual property related to patents referring to microencapsulated oils in foods.

2. MATERIALS AND METHODS

To select the relevant patents on microencapsulation of oils in foods, the scope was defined and a search was conducted on the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases till May 2020.

The analyses involved classifying the most prevalent technologies for the microencapsulation of oils by analyzing the main claims and descriptions in each patent document, organizing the details in trends, and deducing significant patterns in advanced technologies.

We used keywords, such as microencap* and oil* to search the patents, and associated them with the International Patent Classification, which was most appropriate for this study (A23L-foods, foodstuffs, and their preparation or treatment such as cooking and modification of nutritive qualities). Approximately 198 patent documents were retrieved from the European Patent Organisation database, and after reducing the data noise by manually examining the patent documents, 148 patent applications that were significantly related to microencapsulation were selected for analyses.

To complement the information, we searched the INPI database using the keywords microencap*, oil*, and food*, and found six patent documents. Furthermore, we included two patent documents to strengthen our discussion, which included patents on palm oil microcapsules and the method for obtaining palm oil microcapsules using spray drying. In Brazil, palm oil is called crude palm oil. Thus, palm oil does not necessarily refer to the word oil in Portuguese, and therefore, it was not included in the six patents retrieved from the INPI database using the keywords microencap*, oil*, and food*. Therefore, we included the two patent documents as they are interesting documents in the field.

The selected patents were exported to the CSVed program and later to Microsoft Excel. Subsequently, to report data on the annual evolution of patents, international classification code, distribution of patent deposits by countries holding the technology, and distribution of patent deposits by companies and inventors, spreadsheets and graphs were created using the GraphPad Prism 7.0. To discuss the origin of technology, figures were created using the Vime website. To discuss the results, scientific articles indexed in the Scopus database were used.

Furthermore, to analyze the patents, we carefully examined their titles, abstracts, and main claims. Subsequently, the main patent information, such as applicant name, application number, area, inventor, country, international classification, and wall material, emulsifier, and oil used for microencapsulation, was organized in a table.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Annual Progress in Filing of Patents

The first patent document on microencapsulation of oil in foods was filed in 1999. Subsequently, till 2014, little evolution was seen in the number of patents registered in this technology. In 2015, there was an increase in the number of patents, especially in Espacenet, where the technology grew at variable rates (Fig. 1). The patent dealing with microencapsulation of palm oil for application in the food industry was filed during this period [28]. This increase may be owing to an increase in investments, mainly from developed countries, in this emerging and potential technology.

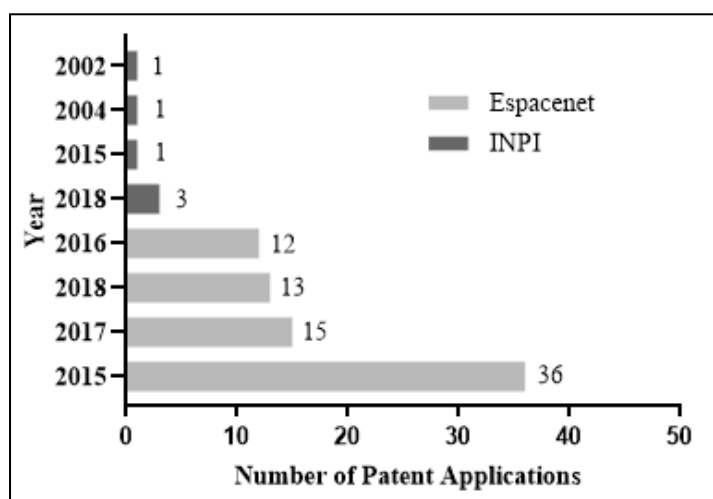


Fig. (1). Annual distribution of publication of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases

The first patent on microencapsulation of oils in INPI was filed in 2002, but little progress has been observed since then. The year 2018 showed a slight increase, but it still falls short when compared to the records in Espacenet, revealing a possible lack of investments and/or deficit in the number of studies conducted on this technology in Brazil. However, it should be noted that the INPI only contains the patent documents filed in Brazil while Espacenet covers the patent documents filed by more than 90 countries.

Over the years, microencapsulation techniques have been extensively used in the pharmaceutical industry to improve the stability of formulations, mask undesirable flavors, and control the release of drugs. Subsequently, these applications have become useful in the food industry [29]. In the 1960s, the first microencapsulation study in foods, which microencapsulated essential oils to prevent oxidation and loss of volatile substances and control the release of aroma, was conducted at the Southwest Research Institute, United States. In addition to aroma, this technology has been applied to incorporate natural additives and ingredients such as dyes, spices, acidulants, vitamins, and minerals that modify the texture, improve nutritional quality, prolong shelf life, and/or control properties of processed foods [30].

New microencapsulation technologies were also developed. In 2002, more than 1000 patents were filed on microencapsulation processes and their applications, and 300 of them were specifically related to the microencapsulation of food ingredients. The success of the development sparked research in the field, and it promoted a large number of applications of microcapsules [31]. The use of microencapsulation to encapsulate compounds of interest produces products with improved characteristics [32].

3.2 International Patent Classification

In this study, the classification codes most commonly found in patent documents in the Espacenet and INPI databases belong to Section A-human needs (agriculture, health, fun and food, and tobacco), as described in Fig. (2).

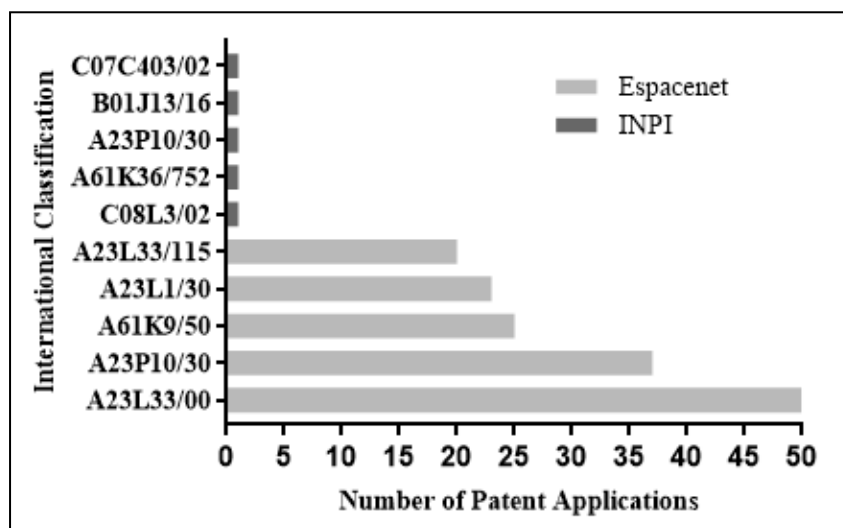


Fig. (2). Distribution of the codes of International Patent Classification most used in the patent documents in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases.

Among the subdivisions, most patent documents referred to the code A23-food or food products processing. The largest number of patents was registered for A23L33/00 code, which refers to changes in the nutritional qualities of foods, diet products, or preparation or treatment of food, and 50 patent documents demonstrated variations in the applicability of this technology between countries.

Currently, several industrial sectors, such as food, pharmaceutical, cosmetic, textile, and agricultural industries, use microencapsulation techniques for different purposes. In the food industry, the growing interests of consumers in food products that can provide health benefits, greater safety in consumption, and extension of shelf life have prompted researchers and companies to replace artificial substances with natural bioactive compounds. However, many bioactive compounds are unstable to extrinsic (temperature, humidity, light, and oxygen) and intrinsic factors (composition, pH, and water activity). Therefore, the food industry has shown interest in technologies that stabilize and preserve the functional properties of these compounds during processing and storage and increase their bioavailability, thus, increasing the use of microencapsulation techniques in this area [14].

3.3 Main Characteristics of Patents

Although 154 patent documents were found using the chosen descriptors, after detailed analyses of the documents and abstracts, it was observed that most studies (52.6%) did not microencapsulate any oil but other components such as vitamin A, carotenoids, and probiotics, among others (Fig. 3). This may have occurred because the word "oil" in these documents is related to the materials involved in the preparation of emulsions required for microencapsulation [11] and not to the actual microencapsulated material.

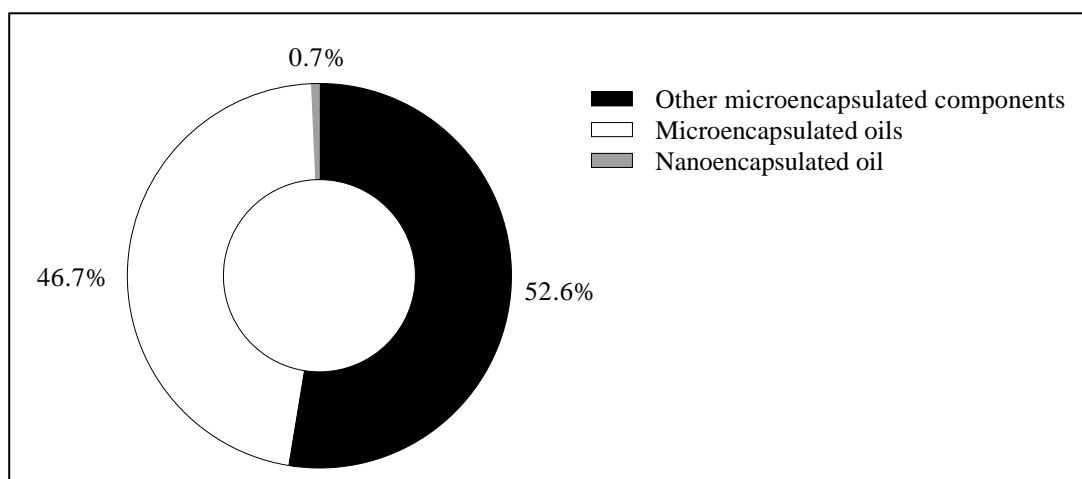


Fig. (3). Profile of the studied patent documents from Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI)

Documents on nanoencapsulation of oil instead of microencapsulation represented 0.7%. The nanoencapsulation technique is often mistakenly classified as microencapsulation, but the size of encapsulated particles varies in the two techniques. Particles measuring between 0.2 and 5000 μm are microcapsules [15], whereas those between 1 and 100 nm are nanocapsules [33].

Among the patent documents on oil microencapsulation, 47.2% were encapsulated edible oils; 30.6% were encapsulated essential oils, such as saffron, clove, and orange oils; and 22.2% did not specify the type of microencapsulated oil. We believe that this omission may be related to the protection of the patent application (Fig. 4).

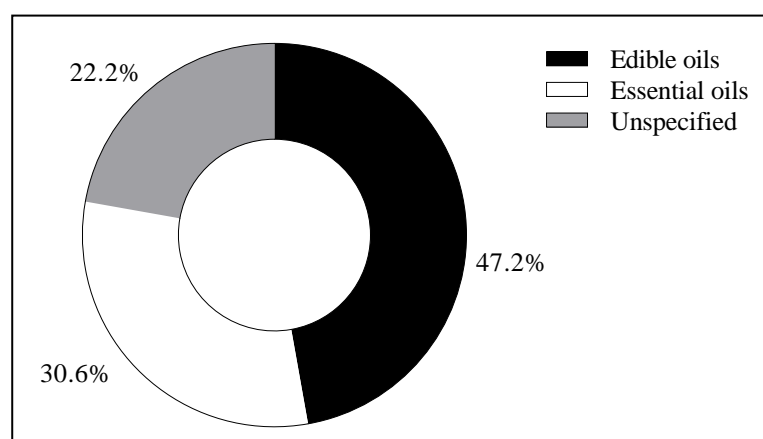


Fig. (4). Profile of patent documents on microencapsulation of oils from Espacenet and the National Institute of Industrial Property (INPI)

For subsequent analyses, patent documents on microencapsulated essential oils were excluded, and those that cited edible oils and did not specify the oil used were selected.

3.3.1 Application areas

After studying the patent documents on microencapsulation of oils from the Espacenet and INPI databases, it was possible to determine the main areas of application of this technology. Among the main areas of application of microencapsulated oils (Fig. 5), 70.0% were related to the food industry, such as RU2557526 (C1) [34], which mentioned the microencapsulation of fish oil to improve organoleptic properties; 6.0% to the food and pharmaceutical industries, such as CN103300379 (A) [35], which mentioned the use of microencapsulated perilla oil in both the industries; 4.0% to the pharmaceutical industry, such as US2013108745 (A1) [36], which used a microencapsulated oil to produce effervescent tablets; 6.0% to other areas, such as US2011064817 (A1) [37], which mentioned the use of oil microcapsules in the cosmetics industry, and MX2007012037 (A) [38], which mentioned the use of microencapsulated oil in agriculture; and 14.0% did not specify the application area.

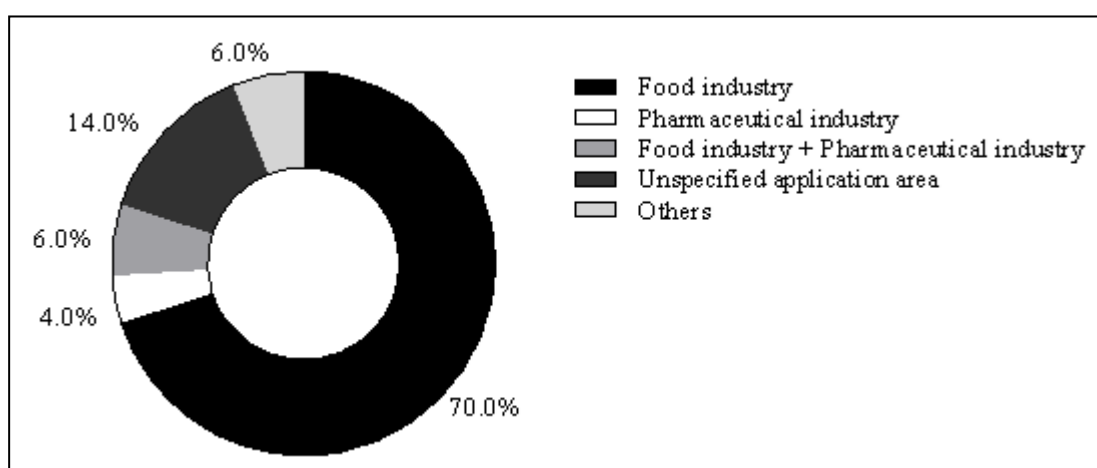


Fig. (5). Distribution of the industrial application areas mentioned in the patent documents from Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI)

3.3.1.1 Application in the food industry

Among the patent documents that cited the application of microencapsulated oils in the food industry, only 28.6% mentioned the foods in which these microcapsules were used, such as seasoning powder, milk, soy milk, goat milk powder, cow milk powder, rice flour, fermented drinks, nutritional formulae, pasta, nutritional supplements, and bread. Most of the documents did not specify the type of food in which the microencapsulated oil was used. This lack of information may have been one of the claims in the patent document, and therefore, the information was not provided.

Table 1 shows the profile of patent documents extracted from Espacenet and INPI, which mentioned the application of microencapsulated oils to the food industry. The objective of microencapsulation of oils, microencapsulation technique used, microencapsulated oils, and foods in which microcapsules are used, are presented.

Table 1. Patent documents from the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases on lipid microcapsules used in food

Title	Patent document number	Edible oil	Food used for the application of microcapsules	Purpose	Technique
Preparation method of <i>ganoderma lucidum</i> spore oil microencapsulated powder	CN108236108 (A) [39]	<i>Ganoderma lucidum</i> spore oil	Unspecified	Oxidative stability	Spray drying
Water-soluble nut oil microcapsules rich in Omega-7 and preparation method of water-soluble nut oil microcapsules rich in Omega-7	CN108741030 (A) [40]	Nut oil	Unspecified	Oxidative stability	Lyophilization
Microencapsulated peony seed oil, compound composition and preparation method of microencapsulated peony seed oil	CN106900885 (A) [41]	Peony seed oil	Unspecified	Oxidative stability	Unspecified
<i>Acer truncatum</i> oil microcapsule and preparation method thereof	CN106262927 (A) [42]	<i>Acer truncatum</i> oil	Unspecified	Oxidative stability	Spray drying
Production process of composite germ powder	CN104544080 (A) [43]	Soy and wheat germ oils	Unspecified	Oxidative stability	Spray drying
Microencapsulated oil powder with selective digestibility and phased antioxidant protection	AU2020100177 (A4) [44]	Unspecified	Unspecified	Oxidative stability	Unspecified
Microcapsulated oil and preparation method thereof	WO2019029370 (A1) [45]	Unspecified	Unspecified	Oxidative stability	Unspecified
Preparation method of water-soluble <i>Euphausia superba</i>	CN107232636 (A) [46]	<i>Euphausia superba</i> oil	Unspecified	Better water solubility and stability	Spray drying

Title	Patent document number	Edible oil	Food used for the application of microcapsules	Purpose	Technique
oil microcapsule powder					
Preparation method of DHA powder applied in milk and soy milk	CN106798309 (A) [2]	Fish oil	Milk and soy milk	Improvement of organoleptic properties	Spray drying
Fish oil microcapsule production method	RU2557526 (C1) [34]	Fish oil	Unspecified	Improvement of organoleptic properties	Spray drying
Method for preparing nutritional food replisher containing intelligence-benefiting factors	CN101744287 (A) [3]	Fish oil	Goat milk powder, cow milk powder, rice flour	Preparation of reinforced nutritional food (fortification)	Unspecified
Microcapsule fat powder of omega-3 enriched meat, egg and milk and preparation method thereof	US2016220521 (A1) [47]	Linseed oil and fish oil or microalgae oil	Unspecified	Enrichment	Unspecified
Novel micro-nanometer grade fish oil/algae oil microcapsule and preparation process thereof	CN105533691 (A) [48]	Fish oil or algal oil	Unspecified	Sustained release	Coacervation
Gi Track Delivery Systems	US2007218125 (A1) [49]	Unspecified	Unspecified	Release of the encapsulated compound in the gastrointestinal tract	Unspecified
Preparation method of groundcherry seed oil microcapsule	CN106579448 (A) [50]	Ground cherry seed oil	Unspecified	Protection of ground cherry seed oil	Unspecified
Goose fatty liver oil microcapsule	CN102871142 (A) [51]	Goose fatty liver oil	Unspecified	Expansion of the market for the use of	Lyophilization

Title	Patent document number	Edible oil	Food used for the application of microcapsules	Purpose	Technique
				goose fatty liver	
Lobster oil seasoning powder and preparation method thereof	CN110638022 (A) [1]	Lobster oil	Seasoning powder	Unspecified	Unspecified
Oral microencapsulated porcupine oil and preparation method thereof	CN106387916 (A) [52]	Porcupine oil	Unspecified	Unspecified	Unspecified
Method for assisting in extracting wood frog spawn oil by ultrasonic method and preparation method of wood frog spawn oil microcapsules	CN105919134 (A) [53]	Wood frog spawn oil	Unspecified	Unspecified	Spray drying
Microencapsulation process for producing microcapsules containing EPA and DHA fatty acids from anchoveta fish oil (<i>Engraulis ringens</i>) suitable for human, consumption, and microcapsules produced using said process	WO2016133410 (A1) [54]	Fish oil	Unspecified	Unspecified	Spray drying
Method for adopting konjac glucomannan as wall material for embedding microalgal oil to prepare microcapsules	CN105231167 (A) [55]	Microalgal oil	Unspecified	Unspecified	Lyophilization
Composition	US2007128341 (A1) [56]	Fish oil	Unspecified	Unspecified	Unspecified

Title	Patent document number	Edible oil	Food used for the application of microcapsules	Purpose	Technique
Microencapsulation process of yeast oil, use and food composition	BR 102015030882- 5 A2A23P 10/30[4]	Yeast oil (<i>Yarrowia lipolytica</i>)	Fermented milk	Unspecified	Spray drying
Flaxseed oil microcapsule and production method thereof	CN108782780 (A) [57]	Flaxseed oil	Unspecified	Unspecified	Spray drying
Nasogastric inter-meal nutritive meal package suitable for cerebral apoplexy patients and preparation method thereof	CN107692195 (A) [5]	Cannabis oil and camellia oil	Nutritional formula	Unspecified	Unspecified
Set of daily three-meal nutritional composition for nasal feeding of stroke patients and preparation method thereof	CN107373640 (A) [6]	Linseed oil, olive oil, and grape seed oil	Nutritional formula	Unspecified	Unspecified
Formula dietotherapy food for emaciated and poor absorption functional groups and preparation method	CN106509867 (A) [7]	Vegetable oil	Nutritional formula	Unspecified	Unspecified
Methods for producing water soluble oil palm leaf powder and concentrate	CN105996023 (A) [28]	Oil palm	Unspecified	Unspecified	Unspecified
<i>Siraitia grosvenorii</i> seed oil microcapsule powder and preparation method thereof	CN102499373 (A) [58]	<i>Siraitia grosvenorii</i> seed oil	Unspecified	Unspecified	Unspecified
25-hydroxy vitamin D3 compositions	US2010112162 (A1) [59]	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Unspecified

Title	Patent document number	Edible oil	Food used for the application of microcapsules	Purpose	Technique
Method of encapsulating food or flavor particles using warm water fish gelatin and capsules produced therefrom	US5603952 (A) [60]	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Coacervation
Method for producing noodle by adding fat or oil thereto	JPS60110257 (A) [8]	Unspecified	Noodle	Unspecified	Unspecified
Nutritional supplement	GB2324457 (A) [9]	Oils such as borage, cod liver or evening primrose oil	Nutritional supplement	Unspecified	Unspecified
Process for producing breads having an internal cavity	DE3426450 (A1) [10]	Unspecified	Bread	Unspecified	Unspecified
Method of encapsulating food or flavor particles using warm water fish gelatin and capsules produced therefrom	CA2208793 (C) [61]	Unspecified	Unspecified	Unspecified	Coacervation

The increasing interests of consumers in food products with high nutritional quality, safety, and health benefits have prompted food industries to seek methods to increase the use of bioactive compounds in their formulations to overcome the detrimental effects of artificial substances. There is a growing interest in stabilization technologies in the food industry to modify the physical properties of bioactive compounds to allow easy handling, preserve the functional properties of bioactive materials during processing and storage, achieve release at the desired time and location, and increase their bioavailability [14].

Microencapsulation has been widely used in formulations and processing of foods in recent decades, making it possible to overcome adversity and succeed in the effective supply of desired nutrients, functional ingredients, and biologically active compounds [62].

Microencapsulation of sensitive oils can prevent their oxidation by moisture, metal ions, oxygen, and heat, making it possible to incorporate them in food. For example, fish oil is susceptible to oxidative deterioration and is insoluble in water; additionally, it has a distinct odor and undesirable rancid taste. Therefore, it has been widely subjected to microencapsulation to facilitate its incorporation in food products [11]. The incorporation of microencapsulated oils in foods facilitates the development of new foods with minimal impact on the organoleptic properties of food products [63].

The patent CN110638022 (A) [1] described the processing of microencapsulated lobster oil to produce a powdered spice that can be directly applied to various foods to enhance their flavor.

The patent CN106798309 (A) [2] presented the preparation of fish oil powder to be used in milk and soy milk to serve as an omega-3 fatty acid supplement. The patent CN101744287 (A) [3] also developed microencapsulated fish oil to fortify some foods, such as goat milk powder, cow milk powder, and rice flour, among others, with the aim of improving cognitive development in children.

The patent BR 102015030882-5 A2A23P 10/30 [4] addressed the microencapsulation of yeast oil to be used in the preparation of fermented milk. Another fermented drink that has been commonly used in the application of microencapsulated oils is yogurt. Goyal *et al.* [19] and Rutz *et al.* [21] microencapsulated linseed oil and palm oil, respectively, and incorporated it into yogurt.

Milk and dairy products are widely consumed by all ages, and they play a fundamental role in nutrition throughout the life of an individual. Thus, they represent a good vehicle for the application of microcapsules, especially for fortification [19].

The patents CN107692195 (A) [5], CN107373640 (A) [6], and CN106509867 (A) [7] mentioned the application of cannabis and camellia oils; linseed oil; and olive, grape seed, and vegetable oils, respectively, in nutritional formulas to be incorporated in the diet therapy of patients with certain pathologies such as stroke.

The patent JPS60110257 (A) [8] discussed the production of pasta containing microencapsulated oil.

The GB2324457 (A) [9] patent referred to the preparation of oil microcapsules such as borage, cod liver, or evening primrose oil and their incorporation in nutritional supplements.

The patent DE3426450 (A1) [10] included the production of bread using microencapsulated oil as one of its ingredients. Takeungwongtrakul *et al.* [63] and González *et al.* [64] added shrimp oil and chia oil microcapsules, respectively to bread. Owing to the widespread consumption of bakery products, the incorporation of nutrients in them would have a significant impact on their quality. Additionally, it is important to highlight the advantages associated with microencapsulated products, such as low cost, long-term preservation, and ease of packaging and transportation [64].

Other food products containing oil microcapsules have also been developed and used, such as biscuits [65,66,67,20], sausages [68,18,69], hamburgers [70,71], chicken nuggets [72,73], mayonnaise [74], muffins [75], chocolates [76], cakes [77], cheese [78], and ice creams [79].

3.3.1.2 Purpose of oil microencapsulation

Of the studied patent documents, 54.3% did not reveal the purpose of microencapsulation of certain types of oils. Such information is often part of the object of protection, and is, therefore, not provided.

Regarding those patents that mentioned the purpose of microencapsulation, the oxidative stability of oils was the most cited objective (20.0%). For oils with high concentrations of unsaturated fatty acids, which are more susceptible to oxidation, microencapsulation becomes an alternative for the preservation of these fatty acids. The wall material forms a barrier to the activity of environmental agents, such as moisture, oxygen, heat, and light, which accelerate the degradation process, thus, providing greater oxidation stability [80].

The improvement of organoleptic properties of oils and the product to be added with the microcapsules [2,34], improved solubility [46], protection of oil [50], sustained release of the microencapsulated oil [48], fortification and enrichment of certain foods [3,47], release of the encapsulated compound at the desired location [49], and expansion of the market for foods that are a source of oils [51] were the other objectives.

3.3.1.3 Microencapsulation techniques

Microencapsulation is one of the modification technologies that has been increasingly studied to change the characteristics of oils to make them suitable for certain applications such as the supply of bioactive compounds and improvement of their properties [81]. The encapsulation of oils in small capsules is a method that protects and provides stability to the compounds present in the lipid matrix, preventing their oxidation owing to moisture, oxygen, light, and heat and avoiding the occurrence of undesirable chemical and physical reactions. Thus, it maintains the biological, functional, and physicochemical properties of oils [82,21,11].

Of the patent documents included in this study, 54.4% did not specify the technique used, 28.6% mentioned the use of spray drying, 8.5% mentioned lyophilization as the technique used, and 8.5% mentioned the use of coacervation (Fig. 6).

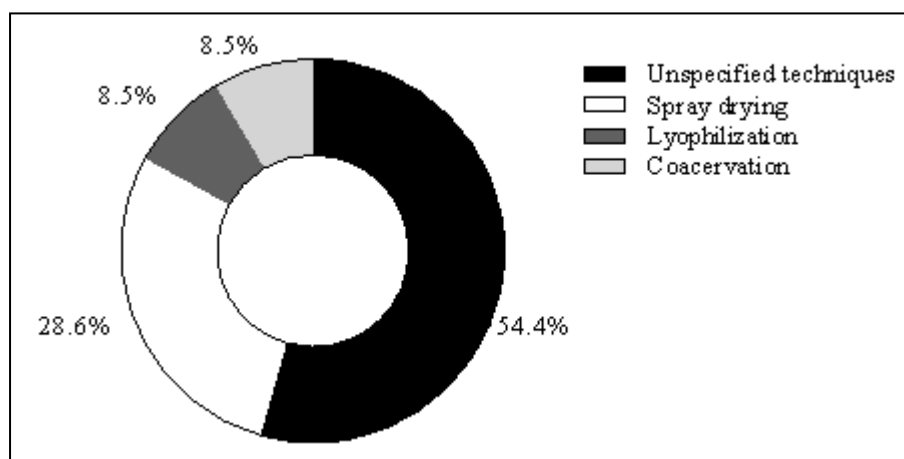


Fig. (6). Distribution of microencapsulation techniques in foods mentioned in the patent documents

The findings of patent documents are in accordance with scientific articles in the same field, which mentioned that spray-drying is the most widely used microencapsulation technique in the food industry owing to its low cost, relatively simple operation, ease of reproducibility, application to a wide variety of encapsulating agents, and ability to produce microparticles with good properties for different uses [83,84,17]. Additionally, the removal of water by spray drying ensures the prevention of microbiological contamination and facilitates the transport and storage of products containing microcapsules [14].

Spray drying is used to obtain a powder instantly by atomizing a liquid in a stream of hot gas. The generally used gas is air or an inert gas such as nitrogen. Depending on the initial feed material and operating conditions, spray drying produces a very fine powder (10-50 μm) or larger size particles (2-3 mm) [17]. In oil microencapsulation, spray drying minimizes lipid oxidation and provides better microbiological stability in contrast to the emulsification technique, where an oil-in-water emulsion is prepared [11,85].

3.3.1.4 Microencapsulated oils

Of all the patent documents studied, 40.0% microencapsulated edible oils of animal origin, 31.4% used edible oils of vegetable origin, and 2.9% used these oils in combination (Fig. 7). The microencapsulated oil was not specified in 25.7% of these documents. We believe that this may have been one of the protective claims in the patent document, corroborating the findings of a previous study [86].

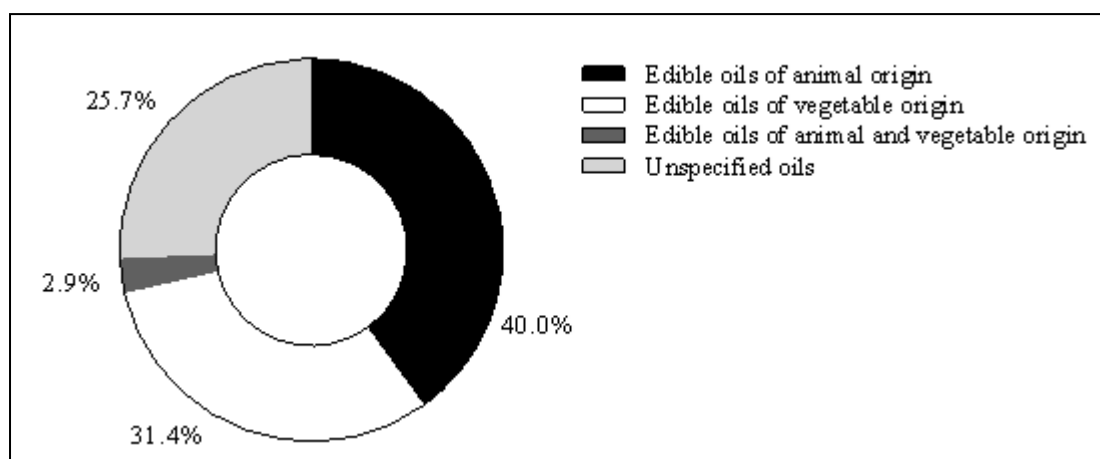


Fig. (7). Types of oils mentioned in patent documents for the production of microcapsules used in food

The edible oils of animal origin mentioned in the patent documents included microalgae, lobster, and fish oils, and the latter was the most used oil. Of the microencapsulated edible oils of vegetable origin, linseed, palm, and walnut oils were the most used. These findings are in agreement with a previous study that reported that fish oil is one of the most widely used encapsulated oil in food products accompanied by some vegetable oils such as linseed oil [11]. In recent years, these oils have been increasingly incorporated in foods owing to the health benefits of omega-3 fatty acids present in them.

Recent scientific studies have reported the use of microencapsulated fish oil in several food products such as chocolates [76], biscuits [65], parsley [68], and chicken nuggets [73]. Flaxseed oil has also been commonly microencapsulated and used in foods such as sausages [69], yogurt [19], and hamburgers [71], whereas chia oil has been incorporated in biscuits [67,20] and bread [64].

3.3.1.5 Wall materials

Among the patent documents included in this study, 60.0% did not specify the wall material used for microencapsulation (Fig. 8). The patents that mentioned the wall materials mostly included modified starch [9,42,57], maltodextrin [51,57,42], and gum arabic [58,52]. This finding is in agreement with a previous study

[14], which reported that the most widely used wall materials for encapsulation of oils contain maltodextrin and gum arabic. Maltodextrin is a low-cost material that offers good film-forming capacity and protection against oxidation of the core materials while gum arabic has good emulsifying properties, which are especially interesting for oil microencapsulation.

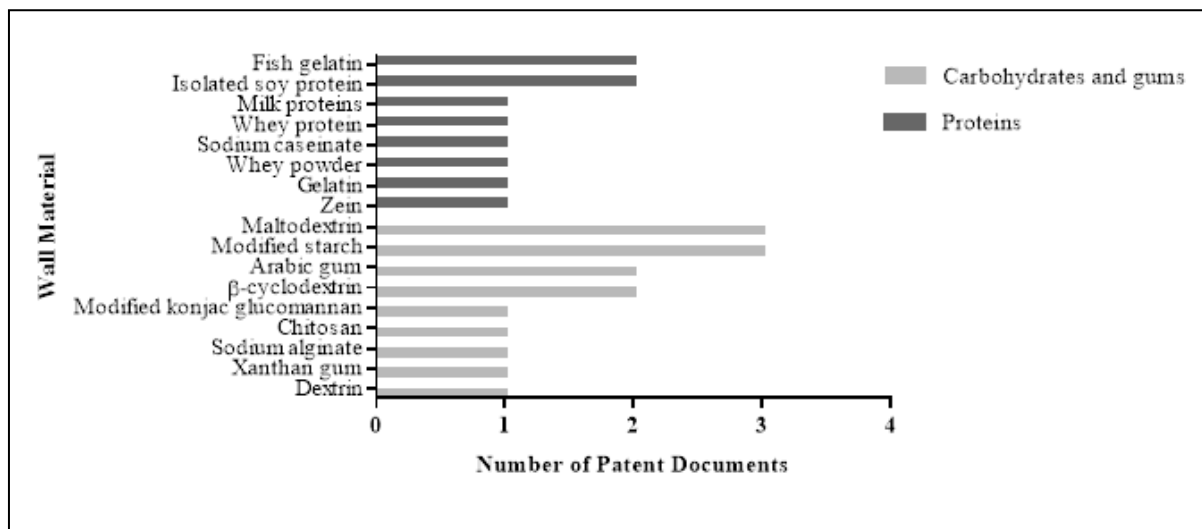


Fig. (8). Types of wall materials used for microencapsulation in the patent documents

The choice of wall material to be used in microencapsulation processes depends on the substance to be encapsulated and the desired characteristics of the final product, and is also dependent on other factors such as encapsulation efficiency, stability during storage, and protection of the active material. The selection of wall material should be based on physical and chemical properties such as solubility, molecular weight, and emulsification, among others. Additionally, the wall material should be soluble in solvents used in the food industry, easily available, and inexpensive [17].

Synthetic polymers and natural biomaterials, such as carbohydrates and proteins, are often used as wall materials for oil microencapsulation [11]. Carbohydrates are considered good encapsulating agents owing to good solubility and low viscosity. However, most of them do not possess the essential interfacial properties for efficient encapsulation. Meanwhile, proteins possess hydrophilic and hydrophobic characteristics that offer necessary physicochemical and functional properties for encapsulation of hydrophobic core materials such as oils. Gums are used in microencapsulation for their emulsion stabilization and film-forming capabilities [17].

In other scientific studies, the commonly used wall materials in oil microencapsulation were whey protein [87,88,19], sodium caseinate [67,74], gelatin [69,89], maltodextrin [18,90,68], and gum arabic [91,92,76].

3.3.1.6 Emulsifiers used in microencapsulation

The inclusion of one or more emulsifying agents facilitates emulsification during microencapsulation and ensures stability of the microencapsulated products. Emulsifiers form films on the surface of emulsified droplets, e.g., in oils; they reduce the interfacial tension between two immiscible liquids and create a repulsive

barrier to prevent the coalescence of dispersed droplets. In general, emulsifying agents can change the characteristics of a system, such as the method of release of active components and the size of droplets [93,94].

Regarding the use of emulsifiers in oil microencapsulation, 85.7% of the patent documents did not specify the emulsifiers used or if they were used or not. Lecithin was cited in two documents [42,9], and glycerol monostearate, gellan gum, and stearic acyl lactylate were cited individually in three patent documents [52,42,47]. Previous studies have shown that lecithin is a commonly used emulsifier in the microencapsulation of oils [77,76,73], since it improves the properties of microcapsules and imparts greater encapsulation efficiency, better oxidative stability, and smaller particle size [95].

3.4 Origin of Technology

Fig. (9) shows the distribution of patent documents from the Espacenet and INPI databases deposited by countries where the patented technology originated.

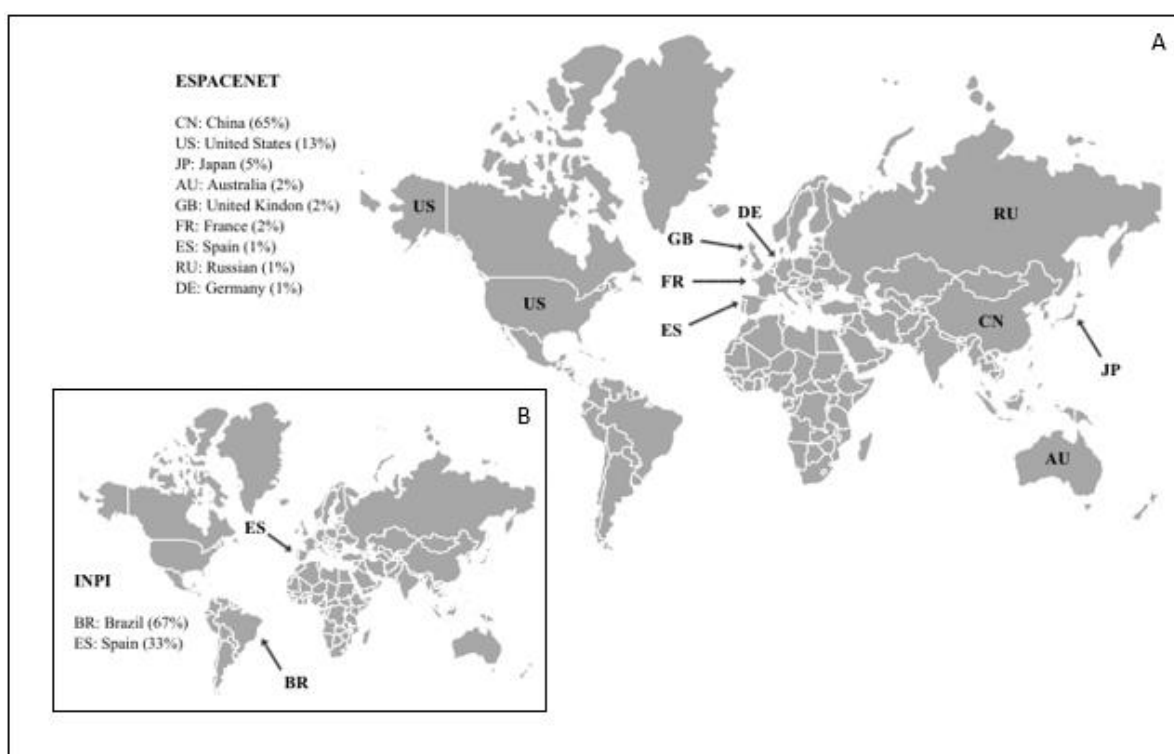


Fig. (9). Distribution of patent documents deposited by countries in the Espacenet (A) and National Institute of Industrial Property (INPI) (B) databases.

Although Indonesia is the largest producer of vegetable oils with the production varying between 40 and 50 million tons in the last four years [96], China occupies the first place in the development of microencapsulation technologies with 65.0% of the studied patents, followed by the United States and Japan with 13.0% and 5.0%, respectively. It is important to note that the data referring to China may still be lower since many patent documents are registered in the native language and not available in English.

Comparing the data available in the Espacenet and INPI databases with that of the Scopus database, between 1999, the year when the first patent on microencapsulation technology was filed, and 2020, it is observed that China remains the dominant country with the largest number of articles published on the topic (12.9%) followed by Brazil, the United States, and Iran comprising 11.2, 6.7, and 6.5%, respectively (Fig. 10).

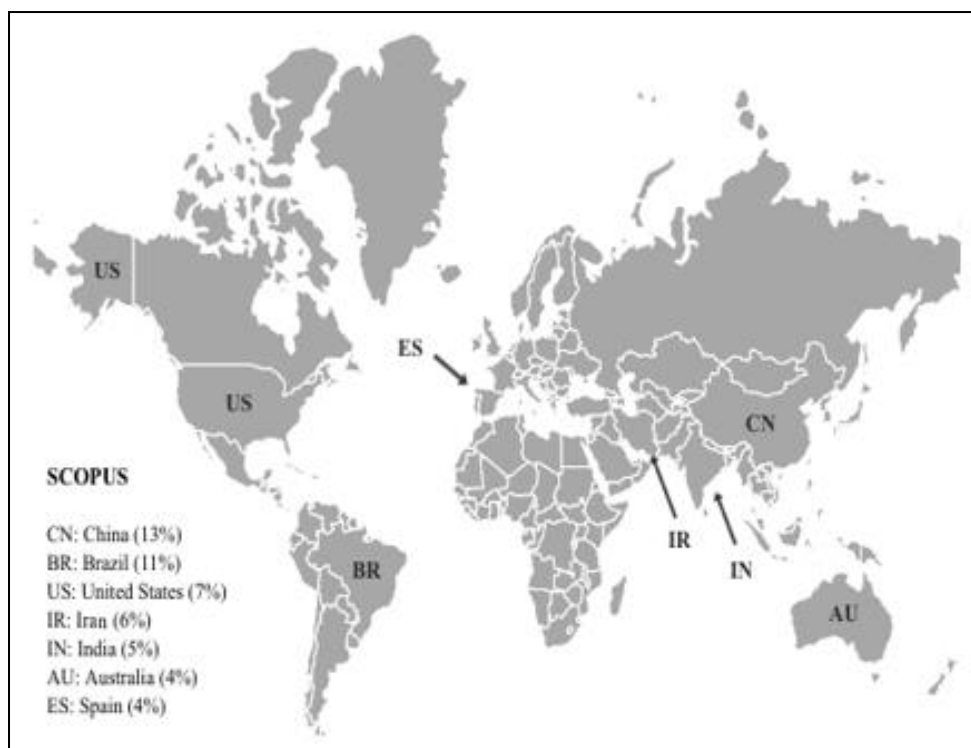


Fig. (10). Distribution of article publications by countries in Scopus

Studies on microencapsulation have been conducted all over the world. However, the advancement in this technique is higher in Asia, comprising 35.0% of the total existing information in the field [97]. This scenario makes it evident that developed countries have mastered the technology in view of the investments that are necessary for product development.

In recent years, the world has seen considerable changes in the development of technological innovations. China has made significant efforts in terms of investments and policies in science and technology and has also produced a series of high-impact reforms in this area, which have improved both research and development and higher education. Thus, innovation in China plays an increasingly important role in its economy, and the path of innovation is being followed by research and international partnerships fostered by Chinese companies [98].

3.5 Production Technology Holders

Of the 154 patent documents included in this study, the Chinese company, Healming Health Science Co. Ltd., which presents a medicinal and nutritional approach of elaboration of foods or food formulas by incorporating microencapsulated components, held the maximum number of patents (23) followed by Jilin University, China, with four patents (Fig. 11). Therefore, the dominance of China as the holder of this technology

can be sufficiently highlighted, and this may be a result of the massive investment of this country in microencapsulation technologies and scientific research in universities, which consequently leads to technological development in the country.

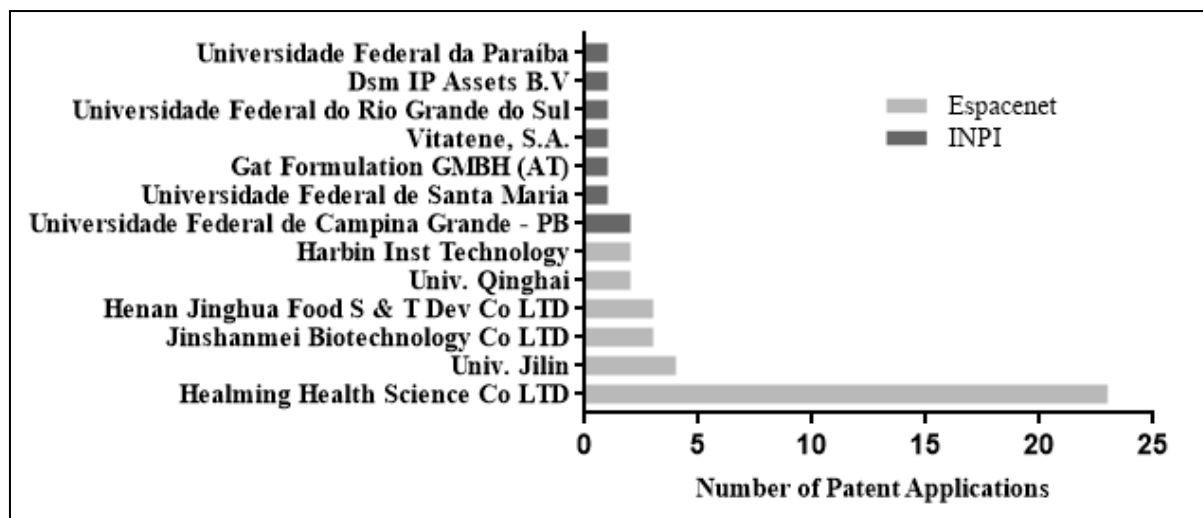


Fig. (11). Main depositors of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases.

In Brazil, probably because of the incentive to scientific research, universities have stood out as holders of patents on microencapsulation technology, and the Federal University of Campina Grande has the largest number of patents registered in the country with two of them related to the microencapsulation of essential oils. The Federal University of Santa Maria holds the patent document that deals with the microencapsulation of yeast oil and its use in fermented milk [99]. However, despite many studies being conducted in the area, the number of patent documents is still low, possibly owing to little dissemination of the culture of innovation and protection of innovation, demonstrating the need for more investments in the implantation of this technology in the country and more incentives for the protection of innovations.

3.6 Technology Inventors

After evaluating the main inventors, it was observed that five out of ten were Asians. As for the number of patents per inventor, Anran Hu, with 26 registrations, had the largest number of patents (Fig. 12). Therefore, the dominance of China as the main inventor of technology can be highlighted again, a scenario similar to that of the holders.

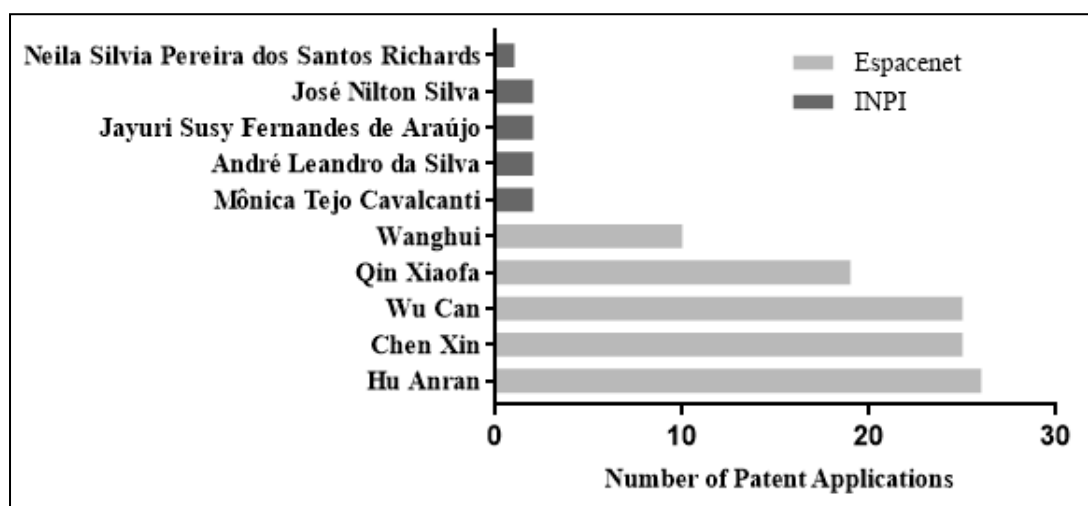


Fig. (12). Main inventors of patent documents on oil microencapsulation in the Espacenet and National Institute of Industrial Property (INPI) databases.

In Brazil, the maximum number of patent documents on oil microencapsulation technology per inventor is equivalent to two, which shows the need for greater investment in this technology in the country. The authors André Leandro da Silva and Mônica Tejo Cavalcanti have two patent documents filed by the Federal University of Campina Grande, which stands out as the holder of the technology in Brazil.

4. GLOBAL MARKET INSIGHTS

Microencapsulation has gained the interest of many industries, especially the food industry, owing to the enhanced properties of oils processed using this technique, such as better oxidative stability, better solubility, ease of handling and processing, and better organoleptic properties, as well as the enhanced properties of the products containing these oils, such as an improvement in nutritional quality.

Despite the increasing use of microencapsulation in the textile, ink, agricultural, and other industries, it is still difficult to find food products containing oil microcapsules in the market, unlike nanotechnology, which has a specific database [100], where it is possible to find some foods containing oil nanocapsules.

However, since several foods containing microencapsulated oils have already been developed, it is quite common to use microcapsules in foods (Table 2).

Table 2. Microencapsulated oils and their applications in food products

Microencapsulated oil	Product	References
Fish oil	Biscuits	[65]
	Sausages	[18]
	Sausages	[68]
	Sausages	[101]

	Hamburgers	[70]
	Chicken nuggets	[73]
	Chicken nuggets	[72]
	Muffins	[75]
	Chocolate	[76]
	Cakes	[77]
	Cheese	[78]
	Mayonnaise	[102]
Shrimp oil	Bread	[63]
	Biscuits	[66]
Palm oil	Yogurt	[21]
Linseed oil	Yogurt	[19]
	Sausages	[69]
	Ice cream	[79]
	Bread	[103]
Chia oil	Bread	[64]
	Biscuits	[67]
	Biscuits	[20]
	Mayonnaise	[74]
	Butter	[104]
Linseed oil + chia oil	Hamburgers	[71]

Among the edible oils of animal origin, fish oil is already present in biscuits, sausages, hamburgers, chicken nuggets, muffins, chocolate, cake, cheese, and mayonnaise, and shrimp oil is present in bread, biscuits, and yogurt.

Among the edible oils of vegetable origin, palm oil has been incorporated in yogurt; linseed oil in ice cream, bread, sausage, and yogurt; chia oil in biscuits, bread, mayonnaise, and butter; and the last two oils in burgers.

CONCLUSION

Based on the analyses of patent documents deposited in the Espacenet and INPI databases, it can be concluded that the microencapsulation technology has been growing at variable rates over the years, expanding the application possibilities of microcapsules. The main results are summarized as follows:

- Regarding the origin, holders, and inventors of the patented technology, the highest patent contributions were from developed countries, and China was at the forefront of microencapsulation technology. This is believed to be a result of the investments that are applied in the area of science and technology in the country, stimulating technological development and scientific research.
- Spray drying was the most widely used microencapsulation technique.
- Animal oils have mostly been employed in microencapsulation, and fish oil was the most widely used oil.
- The technique has been used widely in the food industry; the foods containing microencapsulated oils were seasoning powder, soy milk, milk, goat milk powder, cow milk powder, rice flour, fermented drinks, nutritional formulae, pasta, nutritional supplements, and bread.
- The most widely used wall materials were maltodextrin, gum arabic, and modified starch.

Thus, this prospective study revealed that microencapsulation has been increasingly used in different areas of the industry, meeting the objective of supplying the market with high-quality products. However, additional investments still need to be made to boost this technology in countries such as Brazil.

CONSENT FOR PUBLICATION

Not applicable.

AVAILABILITY OF DATA AND MATERIALS

Not applicable.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors confirm to have no conflicts of interest associated with any aspect of this study.

FUNDING

This work was financially supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Process n° 423478/2016-8).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their special gratitude to members of the Centro Universitário do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial and the Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (SENAI/CIMATEC) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERENCES

- [1] Liu J, Cheng J, Tan S, Qian K, Mei T, Wang L. Lobster oil seasoning powder and preparation method thereof. CN110638022 (A), 2020.
- [2] Chen L. Preparation method of DHA powder applied in milk and soy milk. CN106798309 (A), 2017.
- [3] Junjie C, Juwu H, Hua X. Method for preparing nutritional food replenisher containing intelligence-benefiting factors. CN101744287 (A), 2010.
- [4] Richards NSPS, Mattanna P, Silva PV. Microencapsulation process of yeast oil, yeast oil, use and food composition. BR 102015030882-5 A2A23P 10/30, 2015.
- [5] Wang Z, Liu D, Cheng C, Ding F, Qiu J, Li J, Zhang Y. Nasogastric inter-meal nutritive meal package suitable for cerebral apoplexy patients and preparation method thereof. CN107692195 (A), 2018.
- [6] Wang Z, Liu D, Qiu J, Zhao H, Yun K, Li J, Xin C. Set of daily three-meal nutritional composition for nasal feeding of stroke patients and preparation method thereof. CN107373640 (A), 2017.
- [7] Gao P, Xiao M. Formula dietotherapy food for emaciated and poor absorption function groups and preparation method. CN106509867 (A), 2017.
- [8] Sugimoto K, Tooyama M. Method for producing noodle by adding fat or oil thereto. JPS60110257 (A), 1985.
- [9] Plummer NT. Nutritional supplement. GB2324457 (A), 1998.
- [10] Rokuta S, Kasanuki T, Nakamura T, Sogo Y, Kato T, Yoshioka T. Process for producing breads having an internal cavity. DE3426450 (A1), 1985.
- [11] Bakry AM, Abbas S, Ali B, *et al.* Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2016; 15: 143-182.
- [12] Ferreira CD, Nunes IL. Oil nanoencapsulation: development, application, and incorporation into the food Market. *Nanoscale Res Lett* 2019; 14(9).
- [13] Timilsena YP, Wang B, Adhikari R, *et al.* Advances in microencapsulation of polyunsaturated fatty acids (PUFAs)-rich plant oils using complex coacervation: A review. *Food Hydrocoll* 2017; 69: 369-381.
- [14] Corrêa-Filho LC, Moldão-Martins M, Alves VD. Advances in the application of microcapsules as carriers of functional compounds for food products. *Appl Sci* 2019; 9(3).
- [15] Aghbashlo M, Mobli H, Madadlou A, *et al.* Fish oil microencapsulation as influenced by spray dryer operational variables. *Int J Food Sci Technol* 2013; 48(8): 1707-1713.
- [16] Fang Z, Bhandari B. Encapsulation of polyphenols - a review. *Trends Food Sci Technol* 2010; 21: 510-523.
- [17] Gharsallaoui A, Roudaut G, Chambin O, *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Res Int* 2007; 40: 1107-1121.
- [18] Domínguez R, Pateiro M, Agregán R, *et al.* Effect of the partial replacement of pork backfat by microencapsulated fish oil or mixed fish and olive oil on the quality of frankfurter type sausage. *J Food Sci Technol* 2017; 54(1): 26-37.
- [19] Goyal A, Sharma V, Sihag MK, *et al.* Fortification of dahi (Indian yoghurt) with omega-3 fatty acids using microencapsulated flaxseed oil microcapsules. *J Food Sci Technol* 2016; 53(5): 2422-2433.
- [20] Venturini LH, Moreira TFM, Silva TBV, *et al.* Partial Substitution of Margarine by Microencapsulated Chia Seeds Oil in the Formulation of Cookies. *Food Bioproc Tech* 2019; 12: 77-87.
- [21] Rutz JK, Borges CD, Zambiasi RC, *et al.* Microencapsulation of palm oil by complex coacervation for application in food systems. *Food Chem* 2017; 220: 59-66.
- [22] Ganji DD, Peiravi MM, Abbasi M. Evaluation of the heat transfer rate increases in retention pools nuclear waste. *Int. J. Nano Dimens* 2015; 6(4): 385-398.
- [23] Sheikholeslami M, Nimafar M, Ganji DD. Nanofluid heat transfer between two pipes considering Brownian motion using AGM. *Alex Eng J* 2017; 56: 277-283.
- [24] Peiravi MM, Alinejad J, Ganji DD, *et al.* 3D optimization of baffle arrangement in a multi-phase nanofluid natural convection based on numerical simulation. *Int J Numer Method H* 2020; 30(5): 2583-2605.

- [25] Peiravi MM, Alinejad J, Ganji DD, et al. Numerical study of fins arrangement and nanofluids effects on three-dimensional natural convection in the cubical enclosure. *Trans Phenom Nano Micro Scales* 2019; 7(2): 97-112.
- [26] Alinejad J, Peiravi MM. Numerical analysis of secondary droplets characteristics due to drop impacting on 3D cylinders considering dynamic contact angle. *Meccanica* 2020; 55: 1975-2002.
- [27] Santos FCG, Kalid RA. Prospecção tecnológica: um estudo das tecnologias aplicada ao beneficiamento e derivados do cacau. *Res Soc Dev* 2020; 9(3).
- [28] Nicholas MHK, Halimah M, Wee TL. Methods for producing water soluble oil palm leaf powder and concentrate. CN105996023 (A), 2016.
- [29] Gibbs BF, Kermasha S, Alli I, et al. Encapsulation in the food industry: a review. *Int J Food Sci Nutr* 1999; 50: 213-224.
- [30] Ré MI. Microencapsulação – em busca de produtos “inteligentes”. *Ciência hoje* 2000; 27(162): 24-29.
- [31] Gouin S. Microencapsulation – industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends Food Sci Technol* 2004; 15(7-8): 330-347.
- [32] Brasileiro JSL. Microencapsulação de compostos bioativos: inovação em diferentes áreas. Master Thesis, Porto: Universidade Fernando Pessoa 2011.
- [33] Choi Y, Hong S. Qualitative and quantitative analysis of patent data in nanomedicine for bridging the gap between research activities and practical applications. *World Pat Inf* [Internet]. 2020;60:101943. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2019.101943>.
- [34] Isaev VA, Bentsianov LM, Simonenko SV, Seliverstov VK, Zhukov AGE. Fish oil microcapsules production method. RU2557526 (C1), 2015.
- [35] Jiang Z, Chen L, Li R. Method for preparing perilla oil powder through composite condensation microencapsulation. CN103300379 (A), 2013.
- [36] Wahren R, Skjævestad B. Coated effervescent tablet. US2013108745 (A1), 2013.
- [37] Casana GV, Gimeno SM, Gimeno SB, Moser M, Casaña GV. Continuous multi-microencapsulation process for improving the stability and storage life of biologically active ingredients. US2011064817 (A1), 2011.
- [38] Bustos FM, Pagola BM. Starch esters derivatized and/or converted by thermoplastic extrusion so that they are applied for microencapsulating flavourings and the like applications. MX2007012037 (A), 2009.
- [39] Zhou D, Wang J, Shi Q, Ge F, Peng Y. Preparation method of ganoderma lucidum spore oil microencapsulated powder. CN108236108 (A), 2018.
- [40] Tu X, Du L, Zeng H, Chen H, Shuai X, Zhang M, Ma F. Water-soluble nut oil microcapsules rich in Omega-7 and preparation method of water-soluble nut oil microcapsules rich in Omega-7. CN108741030 (A), 2018.
- [41] Han L, Zhang S, Liu K, Zhang X, Li X, He Q, Guo J, Hou H. Microencapsulated peony seed oil, compound composition and preparation method of microencapsulated peony seed oil. CN106900885 (A), 2017.
- [42] Liu N, Li C, Zhao P, Li C. Acer truncatum oil microcapsule and preparation method thereof. CN106262927 (A), 2017.
- [43] Sun X. Production process of composite germ powder. CN104544080 (A), 2015.
- [44] Wang HC. Microencapsulated oil powder with selective digestibility and phased antioxidant protection. AU2020100177 (A4), 2020.
- [45] Chang P, Liu B, Kong X. Microcapsule oil and preparation method therefor. WO2019029370 (A1), 2020.
- [46] Zhang L, Zhao W. Preparation method of water-soluble euphausia superba oil microcapsule powder. CN107232636 (A), 2017.
- [47] Lai Z, Zhang L. Microcapsule fat powder of omega-3 enriched meat, egg and milk, and preparation method thereof. US2016220521 (A1), 2016.
- [48] Huo J, Wang L, Huang J, Yang T, Zhang G, Liu H, Zhang B. Novel micro-nanometer grade fish oil/algae oil microcapsule and preparation process thereof. CN105533691 (A), 2016.

- [49] Head R, Sanguansri L, Augustin MA. Gi Track Delivery Systems. US2007218125 (A1), 2007.
- [50] Zhang D, Zhai L, Sun T, Xu Y, Wang X, Lin W. Preparation method of groundcherry seed oil microcapsule. CN106579448 (A), 2017.
- [51] Wang B, Hou J, Ge W, Zhang M, Yue B. Goose fatty liver oil microcapsule. CN102871142 (A), 2013.
- [52] Huang A, Sinabianmu. Oral microencapsulated porcupine oil and preparation method thereof. CN106387916 (A), 2017.
- [53] Zhang T, Zhao C. Method for assisting in extracting wood frog spawn oil by ultrasonic method and preparation method of wood frog spawn oil microcapsules. CN105919134 (A), 2016.
- [54] Paján Lan HP. Microencapsulation process for producing microcapsules containing EPA and DHA fatty acids from anchoveta fish oil, engraulis ringens, suitable for human consumption, and microcapsules produced using said process. WO2016133410 (A1), 2016.
- [55] Lin X, Huang J, Zhang C, Zhu F, Liu S. Method for adopting konjac glucomannan as wall material for embedding microalg al oil to prepare microcapsules. CN105231167 (A), 2016.
- [56] Bakkene G, Nordvi B, Johansen A-G, Gutierrez M. Composition. US2007128341 (A1), 2007.
- [57] Lu X. Flaxseed oil microcapsule and production method thereof. CN108782780 (A), 2018.
- [58] Changbao L, Xuehui W, Jian S, Li L, Xiangrong Y, Quanguang H, Ezhen Z, Fen L, Zhichun L. *Siraitia grosvenorii* seed oil microcapsule powder and preparation method thereof. CN102499373 (A), 2012.
- [59] Tritsch J-C, Yu L-Q, Mazzaro ST. 25-Hydroxy vitamin D3 compositions. US2010112162 (A1), 2010.
- [60] Soper, JC. Method of encapsulating food or flavor particles using warm water fish gelatin, and capsules produced therefrom. US5603952 (A), 1997.
- [61] Soper JC. Method of encapsulating food or flavor particles using warm water fish gelatin, and capsules produced therefrom. CA2208793 (C), 1996.
- [62] Rosenberg M, Rosenberg Y, Frenkel L. Microencapsulation of model oil in wall matrices consisting of SPI and maltodextrins. *AIMS Agric Food* 2016; 1: 33-51.
- [63] Takeungwongtrakul S, Benjakul S, H-Kittikun A. Characteristics and oxidative stability of bread fortified with encapsulated shrimp oil. *Ital J Food Sci* 2015; 27.
- [64] González A, Martínez ML, León AE, et al. Effects on bread and oil quality after functionalization with microencapsulated chia oil. *J Sci Food Agric* 2018; 98: 4903-4910.
- [65] Jeyakumari A, Janarthanan G, Chouksey MK, et al. Effect of fish oil encapsulates incorporation on the physico-chemical and sensory properties of cookies. *J Food Sci Technol* 2016; 53(1): 856-863.
- [66] Takeungwongtrakul S, Benjakul S. Biscuits fortified with micro-encapsulated shrimp oil: characteristics and storage stability. *J Food Sci Technol* 2017; 54(5): 1126-1136.
- [67] Almeida MMC, Francisco CRL, Oliveira A, et al. Textural, Color, Hygroscopic, Lipid Oxidation, and Sensory Properties of Cookies Containing Free and Microencapsulated Chia Oil. *Food Bioprocess Technol* 2018; 11: 926-939.
- [68] Lorenzo JM, Munekata PES, Pateiro M, et al. Healthy Spanish salchichón enriched with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. *Food Res Int* 2016; 89: 289-295.
- [69] Bolger Z, Brunton NP, Monahan FJ. Effect of mode of addition of flaxseed oil on the quality characteristics of chicken sausage containing vitamin E and omega 3 fatty acids at levels to support a health claim. *Food Funct* 2017; 8: 3563-3575.
- [70] Keenan DF, Resconi VC, Smyth TJ, et al. The effect of partial-fat substitutions with encapsulated and unencapsulated fish oils on the technological and eating quality of beef burgers over storage. *Meat Sci* 2015; 107: 75-85.
- [71] Heck RT, Vendruscolo RG, Etchepare MA, et al. Is it possible to produce a low-fat burger with a healthy n-6/n-3 PUFA ratio without affecting the technological and sensory properties? *Meat Sci* 2017; 130: 16-25.

- [72] Jiménez-Martín E, Pérez-Palacios T, Carrascal JR, et al. Enrichment of chicken nuggets with microencapsulated omega-3 fish oil: effect of frozen storage time on oxidative stability and sensory quality. *Food Bioproc Tech* 2016; 9: 285-297.
- [73] Pérez-Palacios T, Ruiz-Carrascal J, Jiménez-Martín E, et al. SOLOMANDO, J. C.; ANTEQUERA, T. Improving the lipid profile of ready-to-cook meat products by addition of omega-3 microcapsules: effect on oxidation and sensory analysis. *J Sci Food Agric* 2018; 98: 5302-5312.
- [74] Rojas VM, Marconi LFCB, Guimarães-Inácio A, et al. Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils. *Food Chem* 2019; 274: 220-227.
- [75] Nasrin TAA, Anal AK. Enhanced oxidative stability of fish oil by encapsulating in culled banana resistant starch-soy protein isolate based microcapsules in functional bakery products. *J Food Sci Technol* 2015; 52(8): 5120-5128.
- [76] Fadini AL, Alvim ID, Ribeiro IP, et al. Innovative strategy based on combined microencapsulation technologies for food application and the influence of wall material composition. *LWT* 2018; 91: 345-352.
- [77] Santhanam AK, Lekshmi M, Chouksey MK, et al. Delivery of omega-3 fatty acids into cake through emulsification of fish oil-in-milk and encapsulation by spray drying with added polymers. *Dry Technol* 2015; 33: 83-91.
- [78] Farbod F, Kalbasi A, Moini S, et al. Effects of storage time on compositional, micro-structural, rheological and sensory properties of low fat Iranian UF-Feta cheese fortified with fish oil or fish oil powder. *J Food Sci Technol* 2015; 52(3): 1372-1382.
- [79] Gowda A, Sharma V, Goyal A, et al. Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. *J Food Sci Technol* 2018; 55(5): 1705-1715.
- [80] Oliveira TS. Microencapsulação e estabilidade oxidativa do óleo de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) com concentrados proteicos vegetais. Master Thesis, Manaus: Universidade Federal do Amazonas 2019.
- [81] Hamad AF, Han J-H, Kim B-C, et al. The intertwine of nanotechnology with the food industry. *Saudi J Biol Sci* 2018; 25: 27-30.
- [82] Marfil PHM, Paulo BB, Alvim ID, et al. Production and characterization of palm oil microcapsules obtained by complex coacervation in gelatin/gum arabic. *J Food Process Eng* 2018; 41.
- [83] Carneiro HCF, Tonon RV, Grosso CRF, et al. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *J Food Eng* 2013; 115: 443-451.
- [84] Moreira GEG. Obtenção e caracterização de extrato microencapsulado de resíduo agroindustrial de acerola. Master Thesis, Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte 2007.
- [85] Encina C, Márquez-Ruiz G, Holgado F, et al. Effect of spray-drying with organic solvents on the encapsulation, release and stability of fish oil. *Food Chem* 2018; 263: 283-291.
- [86] Silva VDL, Oliveira TS, Souza CO De, Druzian JI, Aparecida B, Machado S, et al. Technological Prospection of Oil Nanoparticles: Primary Characteristics and Profiles. *Recent Pat Nanotechnol.* 2020;14:1-13.
- [87] Du P, Zhang G, Li C, et al. Characteristic of microencapsulated 1,3-dioleoyl-2- palmitoylglycerol and its application in infant formula powder. *Int J Food Prop* 2018; 21(1): 2355-2365.
- [88] Fernandes RVB, Guimarães IC, Ferreira CLR, et al. Microencapsulated Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) essential oil as a biopreservative in minas frescal cheese. *J. Food Process Preserv* 2017; 41.
- [89] Kim YK, Nam MS, Bae HC. Characteristics of Gouda Cheese Supplemented with Chili Pepper Extract Microcapsules. *Korean J Food Sci Anim Resour* 2017; 37(6): 833-839.
- [90] Dordoni R, Garrido GD, Marinoni L, et al. Enrichment of whole wheat cocoa biscuits with encapsulated grape skin extract. *Int J Food Sci* 2019; 2019.
- [91] Ahmadi N, Nasirpour A, Sheikhzeinodin M, et al. Microencapsulation of ubiquinone using complex coacervation for functional yoghurt. *Food Sci Biotechnol* 2015; 24(3): 895-904.
- [92] Comunian TA, Chaves IE, Thomazini M, et al. Development of functional yogurt containing free and encapsulated echium oil, phytosterol and sinapic acid. *Food Chem* 2017; 237: 948-956.

- [93] Chatterjee S, Judeh ZMA. Impact of the type of emulsifier on the physicochemical characteristics of the prepared fish oil-loaded microcapsules. *J Microencapsul* 2017; 34(4): 366-382.
- [94] Secolin VA. Microencapsulação de compostos bioativos de *Camellia sinensis* em sistemas lipídicos por spray drying. Master Thesis, Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo 2014.
- [95] Chang C, Varankovich N, Nickerson MT. Microencapsulation of canola oil by lentil protein isolate-based wall materials. *Food Chem* 2016; 212: 264-273.
- [96] Foreign Agricultural Service – FAS. United States Department of Agriculture (USDA). Oilseeds: World Markets and Trade 2020.
- [97] Moreira ACG. Microencapsulação de Óleos Essenciais. Master Thesis. Porto: Universidade do Porto 2014.
- [98] Tartaruga IGP. Inovações tecnológicas na China: lições e perspectivas, 2017. Available from: <http://panoramainternacional.fee.tche.br/article/inovacoes-tecnologicas-na-china-licoes-e-perspectivas/>.
Acess: 2020 jul 30.
- [99] Mattanna P. Seleção, otimização da produção e aplicação de óleo microbiano em iogurtes. Doctor Thesis, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria 2014.
- [100] StatNano. Nanotechnology Products Database [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 20]. Available from: <https://product.statnano.com/>.
- [101] Stangierski J, Rezler R, Kawecki K, et al. Effect of microencapsulated fish oil powder on selected quality characteristics of chicken sausages. *J Sci Food Agric* 2020; 100: 2043-2051.
- [102] Rahmani-Manglano NE, González-Sánchez I, García-Moreno PJ, et al. Development of fish oil-loaded microcapsules containing whey protein hydrolysate as film-forming material for fortification of low-fat mayonnaise. *Foods* 2020; 9(545).
- [103] Beikzadeh S, Shojaee-Aliabadi S, Dadkhodazade E, et al. Comparison of properties of breads enriched with omega-3 oil encapsulated in β -glucan and *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells. *Appl Food Biotechnol* 2020; 7(1): 11-20.
- [104] Ullah R, Nadeem M, Imran M, et al. Effect of microcapsules of chia oil on Ω -3 fatty acids, antioxidant characteristics and oxidative stability of butter. *Lipids Health Dis* 2020; 19(10).

Capítulo III

Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte I: aspectos gerais e caracterização das microcápsulas

Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte I: aspectos gerais e caracterização das microcápsulas

Tayane de Jesus Freitas¹, Itaciara Larroza Nunes², Ronald Bruce Pegg³, Deborah Murowaniecki Otero^{1,4}, Camila Duarte Ferreira Ribeiro^{1,4}

¹Faculdade de Farmácia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

²Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

³Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Ciências Agrícolas e Ambientais, Universidade da Geórgia, Estados Unidos

⁴Escola de Nutrição, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

Periódico a ser submetido (1ª Trends in Food Science and Technology (ISSN: 0924-2244) submissão):

Maior percentil (Scopus): 99% (Qualis CAPES: A1)

***Autor correspondente:** Camila Duarte Ferreira Ribeiro (Av. Araújo Pinho - nº 32 – Canela, Cep: 40.110-150 - Salvador - BA – Brasil. Tel/Fax: ++55-71-99132-0655. E-mail: camiladuarte@ufba.br).

Resumo

Fundamentação: Os agravos nutricionais, decorrentes de uma alimentação deficiente em nutrientes, ainda são presentes nos dias atuais e a fortificação de alimentos tem sido empregada para prevenir ou reduzir esses agravos. Os óleos comestíveis são ricos em compostos bioativos que exercem importantes funções no organismo humano e promovem benefícios. Porém, esses óleos são sensíveis a fatores ambientais, principalmente aqueles que induzem às reações de oxidação e degradação lipídica. Por isso, tecnologias vêm sendo desenvolvidas para proteger e preservar os óleos e seus constituintes, como a microencapsulação, e facilitar a sua incorporação nos alimentos.

Escopo e abordagem: Esta revisão, conduzida a partir da busca de estudos realizada em dez bases científicas, descreve as técnicas de microencapsulação de óleos comestíveis, os principais óleos, materiais de parede e emulsificante empregados e a caracterização geral das microcápsulas.

Principais resultados e conclusões: O *spray drying* tem sido a técnica mais utilizada pela indústria alimentícia no encapsulamento de óleos comestíveis. Dentre os óleos comestíveis mais microencapsulados, o óleo de peixe tem se destacado, principalmente por ser fonte de ácidos graxos ômega-3. Outros óleos vegetais também sido utilizados, como o de linhaça, chia e palma. Os carboidratos foram os materiais de parede mais empregados no microencapsulamento dos óleos comestíveis, com ênfase para maltodextrina, quitosana e goma arábica. Tanto proteínas de origem animal quanto vegetal também foram usadas como agente encapsulante, como caseinato de sódio, proteínas do soro de leite e proteína de soja. Lecitina de soja e Tween 80 foram os emulsificantes mais aplicados no processo de microencapsulação de óleos. A maioria dos estudos alcançaram eficiência de encapsulamento superior a 80,0% e formato esférico das microcápsulas produzidas. No geral, o microencapsulamento promoveu proteção aos óleos comestíveis.

Palavras-chave: compostos bioativos, oxidação lipídica, *spray drying*, óleo de peixe, indústria alimentícia.

1. Introdução

A má nutrição pode levar a carências nutricionais que podem causar efeitos prejudiciais e duradouros no crescimento e desenvolvimento e na saúde geral dos indivíduos, sendo que,

na maioria das vezes, esses agravos nutricionais são decorrentes de uma alimentação deficiente em nutrientes (Yue et al., 2016), que podem ser minimizados a partir do consumo de alimentos fortificados. A fortificação ou enriquecimento de alimentos é um método utilizado na tentativa de reforçar o valor nutritivo dos alimentos, favorecendo a manutenção ou recuperação da saúde no sentido da prevenção ou redução das carências nutricionais (Rousta et al., 2021). Do mesmo modo, alimentos que proporcionam benefícios à saúde são cada vez mais procurados pelos consumidores. Isso desencadeou o desenvolvimento de produtos alimentícios com ingredientes que possuam propriedades funcionais, além dos tradicionalmente utilizados na indústria alimentícia (Silva et al., 2022).

Os óleos comestíveis desempenham um papel importante na dieta, pois são fontes de energia, incluindo ácidos graxos essenciais, e podem conter vitaminas lipossolúveis e compostos bioativos, como carotenoides, tocoferóis, polifenóis e fitoesteróis (Adhami et al., 2019) que favorecem o suprimento das demandas nutricionais dos sujeitos. Entretanto, a utilização e incorporação desses óleos em alimentos para fins de fortificação é limitada, uma vez que eles são suscetíveis à degradação oxidativa, como as reações de oxidação dos lipídios, levando a perdas de propriedades nutricionais e sensoriais nos produtos alimentícios e, conseqüentemente, à redução da aceitação dos consumidores. Além disso, alguns dos produtos da reação de oxidação lipídica, como hidroperóxidos e aldeídos, apresentam alta toxicidade, o que pode levar a problemas crônicos de saúde se consumidos regularmente por longos períodos (Venugopalan et al., 2021).

Posto isso, a microencapsulação, que corresponde a uma técnica na qual componentes na forma líquida, gasosa ou sólida são aprisionados dentro de um material de revestimento para formar uma microcápsula, vem sendo empregada nos óleos comestíveis. Essa técnica fornece uma barreira entre o material do núcleo (óleo) e os fatores ambientais (Singh et al., 2022).

Essa tecnologia de microencapsulação dos óleos comestíveis visa protegê-los da degradação oxidativa durante as condições de processamento e armazenamento, como a auto-oxidação, foto-oxidação e reações com metais, que provocarão a oxidação lipídica (Sani et al., 2020). O microencapsulamento destes óleos apresenta vários benefícios, como controlar a liberação em um determinado momento e local específicos, mascarar gostos ou odores desagradáveis, modificar as características físicas, facilitar o manuseio e processamento, minimizar as perdas nutricionais, promover melhora na estabilidade oxidativa no armazenamento, além de facilitar o transporte (Jamshidi et al., 2020, Morsy & Elsabagh, 2021, Nayana et al., 2021). Ademais, o microencapsulamento não apenas previne a rápida geração

de hidroperóxidos e alterações sensoriais indesejáveis, mas também aumenta a eficácia protetora e a bioacessibilidade e biodisponibilidade dos óleos e seus compostos bioativos, uma vez que previne ou reduz interações indesejáveis com outros elementos alimentares (Gumus & Gharibzahedi, 2021).

Existem diversas técnicas de microencapsulamento que podem ser aplicadas aos óleos. A escolha mais propícia do método a ser utilizado se fundamenta na finalidade da aplicação das microcápsulas, que, além de poderem ser utilizadas na fortificação de alimentos, também podem ser aplicadas com o objetivo de melhorar a estabilidade oxidativa e prolongar a vida de prateleira ou também para substituir parcialmente a gordura usada na produção de alimentos (Jamshidi et al., 2020).

A escolha do material de parede ideal é uma etapa fundamental para alcançar uma boa eficiência de encapsulamento e essa escolha depende da interação com o componente a ser encapsulado e da técnica de microencapsulamento a ser desenvolvida (Nayana et al., 2021). As propriedades gerais esperadas para este material incluem: ter baixo custo, sabor suave, capacidade de emulsificação e proporcionar proteção aos óleos encapsulados (Abedi et al., 2016). A depender do método de microencapsulamento empregado, poderão ser utilizados mais de um encapsulante, já que muitas vezes um único material não dispõe de todas as características necessárias ao processo (Rutz et al., 2017).

Recentemente, alguns autores têm estudado as técnicas de microencapsulamento aplicadas aos óleos comestíveis (Feizollahi et al., 2018; Jamshidi et al., 2020; Kouamé et al., 2021), como também os principais óleos empregados e seus benefícios (Singh et al., 2022) e os materiais de parede mais usados (Comunian et al., 2016; Venugopalan et al., 2021). No entanto, são necessários mais estudos que relacionem as características do processo de microencapsulamento com as propriedades das microcápsulas formadas e os efeitos na proteção dos óleos e seus compostos bioativos.

Portanto, esta revisão tem como objetivo avaliar as técnicas que vêm sendo empregadas no microencapsulamento de óleos comestíveis para fins de fortificação de alimentos, bem como os óleos, os materiais de parede e os emulsificantes mais utilizados nesse processo e relacioná-los com a eficiência do microencapsulamento, morfologia e tamanho das microcápsulas.

2. Metodologia

O levantamento dos artigos sobre o uso de óleos microencapsulados aplicados em alimentos para fins de fortificação/enriquecimento foi realizado nas bases científicas

apresentadas na Fig. 1a. Uma busca avançada foi efetuada usando as seguintes combinações de descritores: oil* AND microencap* AND food* AND fortifi* OR enrich* OR enhanc*, oil* AND microencap* AND food* AND *toxici*, oil* AND microencap* AND food* AND bioacce*, oil* AND microencap* AND food* AND bioava*. A pesquisa não se limitou a um recorte temporal específico e foi conduzida entre os meses de julho e agosto de 2022.

O número total de artigos encontrados em todas as bases de dados equivale a 14.105 estudos, sendo que o percentual de cada uma das bases está representado na Fig. 1a. Para a exclusão dos artigos duplicados, foi utilizado o *software* gerenciador de referências EndNote Web. Após a leitura dos títulos dos artigos, foram excluídos aqueles que não estavam de acordo com a temática em estudo. Um total de 121 artigos teve seu resumo lido, sendo excluídos os estudos que não realizaram a aplicação em alimentos e aqueles que aplicaram as microcápsulas de óleos com outros fins que não a fortificação (Fig. 1b).

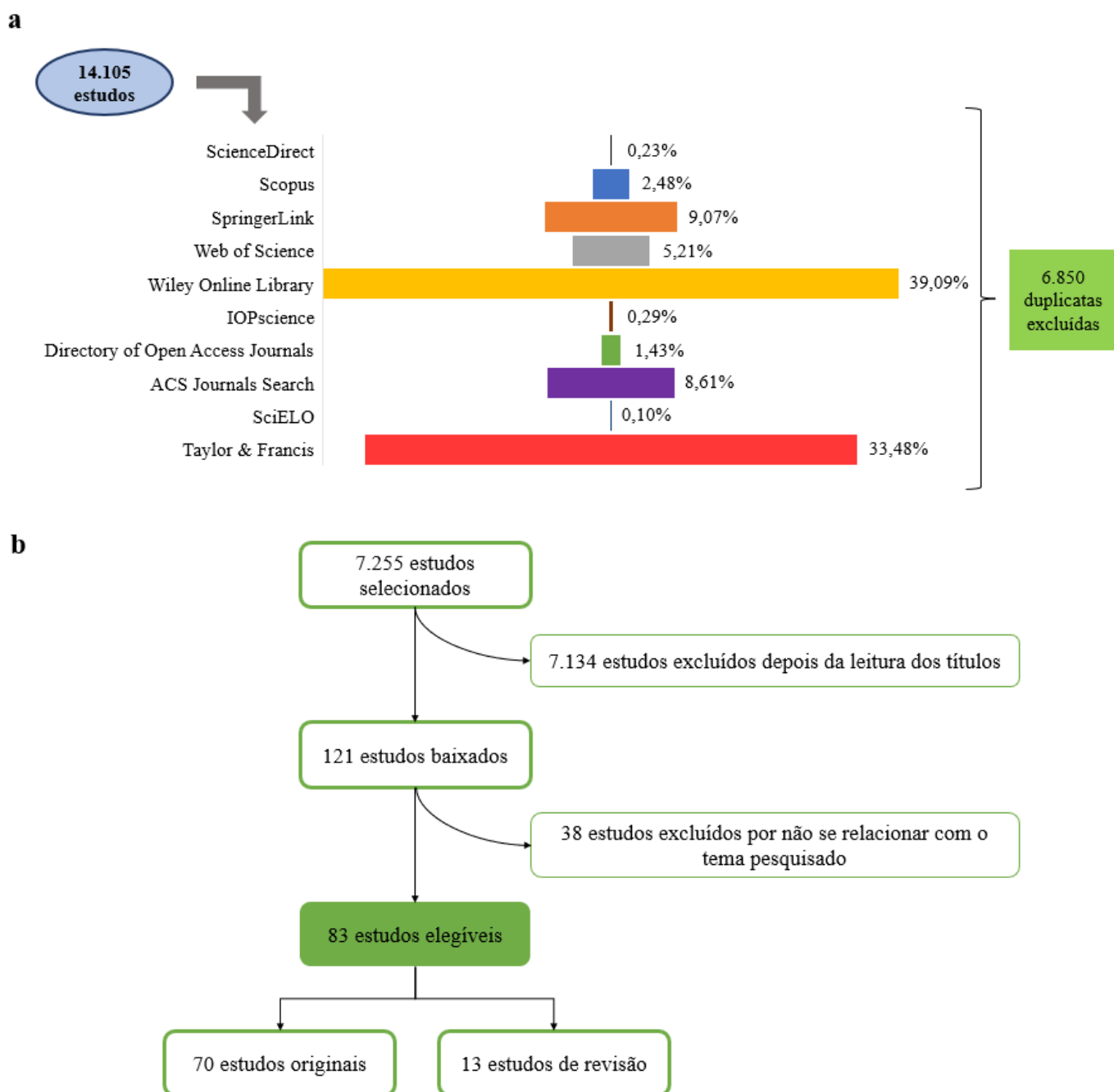


Fig. 1. Esquema da busca de artigos sobre o uso de óleos microencapsulados aplicados em alimentos para fins de fortificação em 10 bases científicas (a) e os critérios de elegibilidade adotados para a seleção dos artigos (b).

Foram selecionados 83 estudos elegíveis (Fig. 1b) e estes foram lidos e analisados quanto à caracterização do microencapsulamento e das microcápsulas formadas.

3. Microencapsulamento de óleos

A microencapsulação consiste em uma tecnologia para revestir ou encapsular componentes sensíveis às condições ambientais adversas, como luz, umidade e oxigênio (Kawecki et al., 2021a). Esta técnica baseia-se no recobrimento do material do núcleo por uma matriz homogênea/heterogênea (material de parede ou agente encapsulante) a fim de desenvolver uma barreira física e protetora entre o componente e o meio ambiente, com formação de microcápsulas de 1 – 1000 μm (Fig. 2) (Rahmani-Manglano et al., 2020; Mehta et al., 2022).

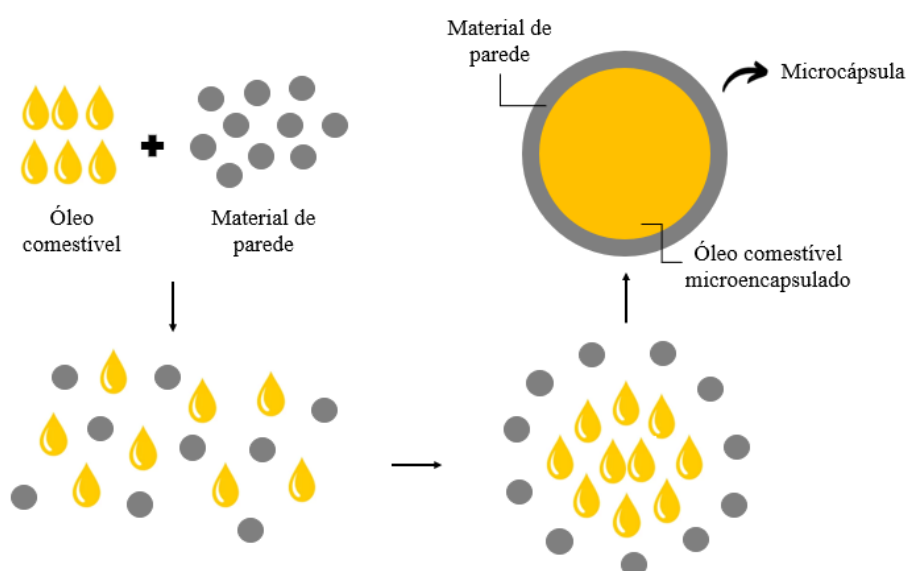


Fig. 2. Representação do microencapsulamento de óleos comestíveis. Autoria própria (2022).

Na Tabela 1 são apresentados os aspectos gerais do microencapsulamento de óleos comestíveis e a caracterização das microcápsulas produzidas, dados que foram coletados nos estudos avaliados e que serão discutidos a seguir.

Tabela 1

Principais técnicas de microencapsulamento, óleos comestíveis, materiais de parede e emulsificantes usados no processo e caracterização do microencapsulamento e das microcápsulas formadas.

Técnica de microencapsulamento	Óleo microencapsulado (O)	Materiais de parede (MP)	Emulsificante	Proporção O:MP (óleo:material de parede)	Caracterização do microencapsulamento / das microcápsulas	Referência
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de noz	Proteína isolada de soja + maltodextrina + pectina	NR	1:2	NR	Akhtar et al. 2022
<i>Spray drying</i>	Óleo de linhaça	Maltodextrina	NR	1. 1:4 2. 2:4	NR	Bueno et al. 2022
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Maltodextrina + proteína concentrada de soro do leite; 2. Proteína de soja + proteína concentrada de soro do leite; 3. Proteína de ervilha + proteína concentrada de soro do leite 4. Proteína de soja + maltodextrina 5. Proteína de ervilha + maltodextrina	NR	1:1	EE (%) : 1. 65,70 ± 0,52 2. 66,79 ± 4,75 3. 61,06 ± 0,93 4. 63,66 ± 1,87 5. 57,27 ± 4,39; Rendimento : NR Tamanho : NR Morfologia : As microcápsulas contendo maltodextrina apresentaram formato mais esférico e superfície mais lisa do que aquelas	Damerau et al. 2022

					contendo proteína concentrada de soro do leite.	
Gelificação iônica	Óleo de peixe	Alginato de sódio + proteína isolada de tremoço	NR	NR	EE (%) : 95,62 ± 1,13; Rendimento : NR Tamanho : 0,82 ± 0,06 µm; Morfologia : formato esférico.	Elsebaie et al. 2022
<i>Spray drying</i>	Óleo de camarão + óleo de semente de <i>Camellia oleifera</i>	Alginato de sódio + proteína isolada de feijão mungo	NR	NR	EE (%) : 72,09 ± 2,97; Rendimento : NR Tamanho : 1,796 ± 0,043 µm; Morfologia : formato esférico e superfície irregular.	Gulzar et al. 2022
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de pequi	1. Goma de caju + quitosana 2. Goma de caju + gelatina	NR	NR	EE (%) : 1. 93,65 ± 0,37 2. 83,75 ± 2,88; Rendimento : 1. 53,29 ± 1,32 2. 53,98 ± 1,15; Tamanho : NR Morfologia : formatos esféricos e sem sinais de rachadura.	Silva et al. 2022

1. Liofilização 2. <i>Spray drying</i>	Óleo de Sacha inchi	1. Zeína 2. Maltodextrina e amido modificado	1. Tween 80 e lecitina de soja 2. NR	NR	NR	Suwannasang et al. 2022
<i>Spray drying + spray chilling</i>	Óleo de peixe	Goma arábica + leite em pó desnatado + suco de uva	Tween 80	NR	EE (%) : 94,64 ± 0,17; Rendimento : NR Tamanho : NR Morfologia : superfície rugosa e formato esférico.	Fadini et al. 2021
Liofilização	Óleo de chia	Proteína isolada de soja	NR	1:2	EE (%) : 55,1 ± 3,9; Rendimento : NR Tamanho : NR Morfologia : NR	González et al. 2021
NR	Óleo de linhaça + óleo de alho	NR	NR	NR	NR	Kairam et al. 2021
NR	Óleo de peixe	Gelatina suína	NR	NR	NR	Kawecki et al. 2021a
NR	Óleo de peixe	Gelatina suína	NR	NR	NR	Kawecki et al. 2021b
NR	Óleo de peixe	Gelatina suína	NR	NR	NR	Kawecki et al. 2021c
Gelificação iônica	Óleo de peixe	1. Alginato de sódio 2. Alginato de sódio + quitosana	Lecitina de soja	NR	EE (%) : 1. 82,55 2. 90,78; Rendimento : NR	Morsy & Elsabagh 2021

					Tamanho: 0,87µm.	
					Morfologia: formato esférico e superfície lisa e sem rachaduras.	
<i>Spray drying</i>	Oleína de palma + óleo de linhaça	Goma arábica + proteína de soro de leite	NR	1:2	EE (%): 40,0 ± 0,04; Rendimento: 62,1 ± 0,10;	Nayana et al. 2021
					Tamanho: NR	
					Morfologia: formato esférico e superfície mais uniforme, lisa e sem fissuras.	
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de peixe	Proteína isolada de soja + inulina	NR	NR	NR	Rios-Mera et al. 2021
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Maltodextrina 2. Maltodextrina + quitosana	Lecitina de soja	NR	NR	Solomando et al. 2021
NR	1. Óleo de peixe (OP) 2. Óleo de alho (OA) 3. Óleo de peixe + óleo de alho	Alginato de cálcio	Lecitina de soja	NR	EE (%): NR Rendimento: NR Tamanho: 618 a 1.200 µm; Morfologia: NR	Sridhar et al. 2021
<i>Spray drying</i>	Óleo de girassol + óleo de gergelim	Proteína isolada de soja + proteína isolada de	Lecitina de soja	NR	NR	Srivastava & Mishra, 2021

		soro de leite + maltodextrina				
Liofilização	Óleo de linhaça	1. Leveduras 2. Beta-glucano	Tween 80	NR	NR	Beikzadeh et al. 2020
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Fard et al. 2020
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Proteína hidrolisada de soro de leite + xarope de glicose	NR	NR	EE (%): 98,07 ± 0,04; Rendimento: NR Tamanho: 12,5 ± 5,5 µm; Morfologia: formato esférico e superfície lisa.	Rahmani-Manglano et al. 2020
Liofilização	Óleo de café verde + óleo de noz	Ácido esteárico	NR	1:2,03	EE (%): NR Rendimento: NR Tamanho: <86 µm; Morfologia: formato irregular.	Rojas et al. 2020
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Maltodextrina 2. Maltodextrina + quitosana	Lecitina de soja	NR	NR	Solomando et al. 2020a
<i>Spray drying</i>	1. Óleo de peixe 2. Óleo de peixe + licopeno	Maltodextrina	Lecitina de soja	NR	EE (%): 1. 84,62 ± 1,79 2. 86,02 ± 1,08; Rendimento: 1. 55,20 ± 2,55	Solomando et al. 2020b

					2. $57,64 \pm 0,51$;	
					Tamanho: NR	
					Morfologia: formato oval com algumas rugas e orifícios e sem poros aparentes.	
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Maltodextrina 2. Maltodextrina + quitosana	Lecitina de soja	NR	NR	Solomando et al. 2020c
NR	Óleo de peixe	Gelatina de porco	NR	NR	NR	Stangierski et al. 2020
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Goma arábica + maltodextrina	NR	1:2	EE (%): $93,71 \pm 0,81$; Rendimento: NR	Trilaksani et al. 2020
					Tamanho: 6,26 μm ; Morfologia: NR	
<i>Spray drying</i>	Óleo de chia	Quitosana	NR	NR	NR	Ullah et al. 2020
Emulsificação	1. Óleo de peixe 2. Óleo de peixe + óleo de hortelã	1. Proteína isolada do soro de leite (WPI) 2. WPI + Carboximetilcelulose (CMC) 3. WPI + pululano	NR	NR	NR	Bakry et al. 2019
Liofilização	Óleo de peixe	Quitosana + amido modificado	Tween 80	1:4	EE (%): $> 85,00$; Rendimento: NR	Hasani et al. 2019

					Tamanho: 2,30 ± 0,20 µm;	
					Morfologia: livre de rachaduras e poros ou óleo livre na superfície.	
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Maltodextrina	NR	1:2	NR	Hastarini et al. 2019
Liofilização	1. Óleo de chia 2. Óleo de abóbora 3. Óleo de baru	Ácido esteárico	NR	1:2,03	EE (%): NR Rendimento: NR Tamanho: NR Morfologia: partículas aglomeradas e com formato irregular.	Rojas et al. 2019
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Quitosana + maltodextrina	Lecitina de soja	1:6.1	NR	Aquilani et al. 2018
Liofilização	Óleo de chia	Proteína isolada de soja	NR	1:2	NR	González et al. 2018
-	Óleo de linhaça	Proteína do soro de leite	NR	-	NR	Gowda et al. 2018
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Quitosana + maltodextrina	Lecitina de soja	1:30	NR	Pérez-Palacios et al. 2018
<i>Spray drying</i>	Óleo de linhaça	1. Proteína do soro de leite 2. Caseinato de sódio	NR	NR	NR	Goyal et al. 2017
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de peixe	Gelatina + goma arábica	NR	NR	EE (%): 76,66 ± 0,16; Rendimento: - Tamanho: -	Habibi et al. 2017

					Morfologia: formato esférico e estrutura multinuclear.	
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de palma	1. Quitosana + goma xantana 2. Quitosana + pectina	NR	1:5	EE (%): 1. 62,41 2. 52,20; Rendimento: 1. 98,90 2. 99,51; Tamanho: -	Rutz et al. 2017
<i>Spray drying</i>	Óleo de camarão	Caseinato de sódio + gelatina de peixe + xarope de glicose	NR	NR	NR	Takeungwongtrakul & Benjakul, 2017
<i>Spray drying</i>	Óleo de semente de <i>Nigella sativa</i>	Amido modificado + maltodextrina	NR	1:3	EE (%): 89,48; Rendimento: - Tamanho: 1–30 µm; Morfologia: formato esférico e com poucas rachaduras ou fissuras aparentes.	Abedi et al. 2016
Liofilização	Óleo de peixe	Caseinato de sódio	NR	1:6	NR	Andajani et al. 2016
<i>Spray drying</i>	Óleo de linhaça	1. Proteína do soro de leite 2. Caseinato de sódio	NR	-	NR	Goyal et al. 2016

<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Gelatina de peixe 2. Maltodextrina	NR	1:2	EE (%) : 1. 46,83 2. 49,34; Rendimento : NR Tamanho : NR Morfologia : formato esférico.	Jeyakumari et al. 2016
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Quitosana + maltodextrina	Lecitina de soja	NR	NR	Jiménez-Martin et al. 2016
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Maltodextrina + goma arábica + caseinato de sódio	NR	1:3	NR	Lorenzo et al. 2016
1. Coacervação complexa + liofilização 2. Gelificação iônica	Óleo de palma refinado	1. Quitosana + carboximetilcelulose 2. Quitosana + tripolifosfato de sódio	NR	1:5	EE (%) : 1. 97,4 2. 95,3; Rendimento : 1. 86,7 2. 54,6; Tamanho : NR Morfologia : formato irregular.	Rutz et al. 2016
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Dellarosa et al. 2015
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Farbod et al. 2015
Liofilização	Óleo de peixe	1. Amido resistente da banana + proteína isolada de soja	NR	2:1:1 (óleo:proteína:amido resistente)	EE (%) : 1. 82,49 ± 0,42 2. 79,04 ± 0,51; Rendimento : NR	Nasrin & Anal, 2015

		2. Hylon VII + proteína isolada de soja			Tamanho: 1. 5,95 ± 0,27µm 2. 4,91 ± 0,20 µm; Morfologia: NR EE (%): NR Rendimento: NR Tamanho: 6,52 µm; Morfologia: formato esférico e superfície lisa e sem fissuras.	
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Goma arábica + maltodextrina	NR	NR		Pramestia et al. 2015
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	1. Caseinato de sódio 2. Maltodextrina 3. Proteína de soja	Lecitina de soja	NR	EE (%): 1. 77,28 ± 0,43 2. 71,61 ± 0,87 3. 73,74 ± 0,49; Rendimento: NR Tamanho: NR Morfologia: NR	Santhanam et al. 2015
<i>Spray drying</i>	Óleo de camarão	Proteína concentrada de soro de leite + caseinato de sódio + xarope de glicose	NR	1:4	NR	Takeungwongtrakul et al. 2015
<i>Spray drying</i>	Óleo de agrião	Proteína de soro do leite concentrada	NR	1:2,5	EE (%): 64,8 ± 1,8; Rendimento: NR Tamanho: NR	Umesha et al. 2015

<i>Spray drying</i>	Óleo de linhaça	Goma arábica	Lecitina de soja	1:4	Morfologia: NR EE (%): 90,5 ± 0,1; Rendimento: - Tamanho: 10–50 µm; Morfologia: enrugada e com superfície côncava.	Gallardo et al. 2013
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	EE (%): NR Rendimento: NR Tamanho: NR Morfologia: superfície lisa e formato irregular.	Bermúdez-Aguirre & Barbosa-Cánovas 2012
<i>Spray drying</i>	Óleo de linhaça	Goma arábica + maltodextrina	NR	NR	EE (%): 90,7 ± 1,19; Rendimento: NR Tamanho: NR Morfologia: superfície lisa e livre de poros.	Rubilar et al. 2012
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Goma arábica + maltodextrina		1:4,7	EE (%): 75,5 ± 2,66; Rendimento: 81,5 ± 0,47; Tamanho: NR Morfologia: NR	Estrada et al. 2011
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Nielsen & Jacobsen, 2011

<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Caseinato de sódio + xarope de glicose + amido de milho	NR	1:3	NR	Shen et al. 2011
Coacervação complexa + liofilização	Óleo de peixe	Gelatina + goma arábica	NR	NR	NR	Tamjidi et al. 2011
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Nielsen & Jacobsen, 2009
NR	Óleo de peixe	Gelatina de peixe + amido de milho + sacarose	NR	NR	NR	Kolanowski & Weißbrodt 2008
NR	Óleo de peixe	-	NR	NR	NR	Martin et al. 2008
Secagem em leito fluidizado	Óleo de peixe	Gelatina de peixe + amido de milho	NR	NR	NR	Kolanowski et al. 2007
NR	Óleo de alga	NR	NR	NR	NR	Serna-Saldivar et al. 2006
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Yep et al. 2002
NR	Óleo de peixe	NR	NR	NR	NR	Wallace et al. 2000
<i>Spray drying</i>	Óleo de peixe	Clara de ovo	NR	1:9	NR	Taguchi et al. 1992

NR: não reportado; EE: eficiência do encapsulamento; OP: óleo de peixe; AO: óleo de alho.

3.1. Técnicas de microencapsulamento de óleos

Dentre os estudos analisados (Tabela 1), a técnica mais utilizada para o microencapsulamento dos óleos comestíveis foi o *spray drying*, ressaltando que parte dos trabalhos utilizou óleos microencapsulados comerciais, não sendo possível avaliar a técnica empregada (Fig. 3).

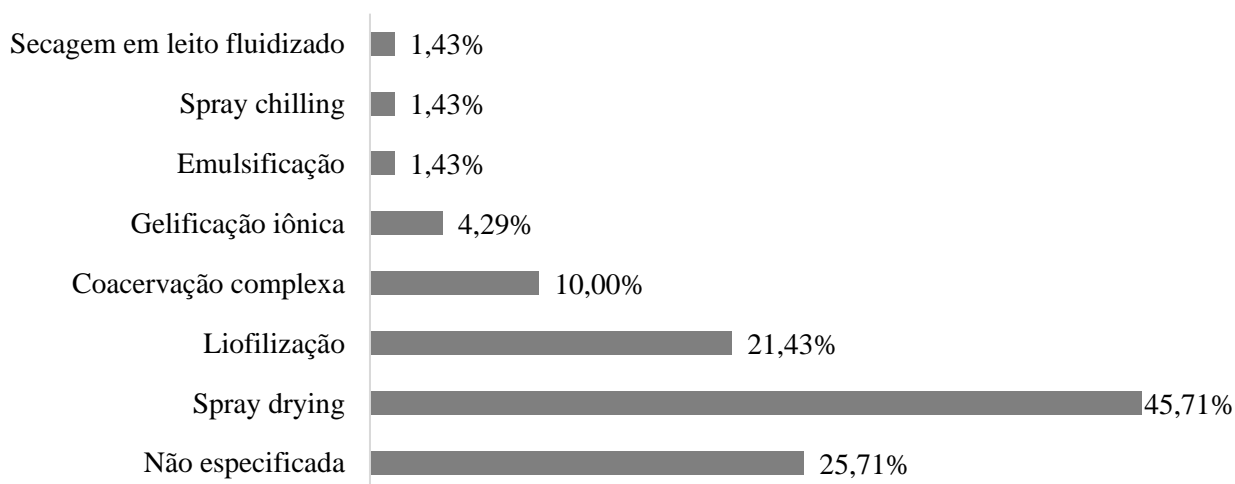


Fig. 3. Técnicas utilizadas para o microencapsulamento de óleos comestíveis.

3.1.1. *Spray drying*

Por ser considerada uma técnica de microencapsulação econômica, é a mais utilizada pela indústria alimentícia para encapsular ingredientes bioativos, resultando em um pó de fácil manipulação e aplicação em alimentos para fins de fortificação (Rahmani-Manglano et al., 2020, Fadini et al., 2021). Outra vantagem é a facilidade de produção em larga escala, requisito que desperta mais ainda o interesse das grandes indústrias (Ullah et al., 2020). Três etapas básicas compreendem o processo de *spray drying* (Fig. 4). O tipo de material de parede, as propriedades do componente a ser encapsulado e as condições operacionais do *spray drying* (temperatura do ar de entrada, taxa de alimentação, pressão do ar, vazão de ar comprimido e temperatura do ar de saída) irão influenciar na eficiência da encapsulação (EE) (Abedi et al., 2016).

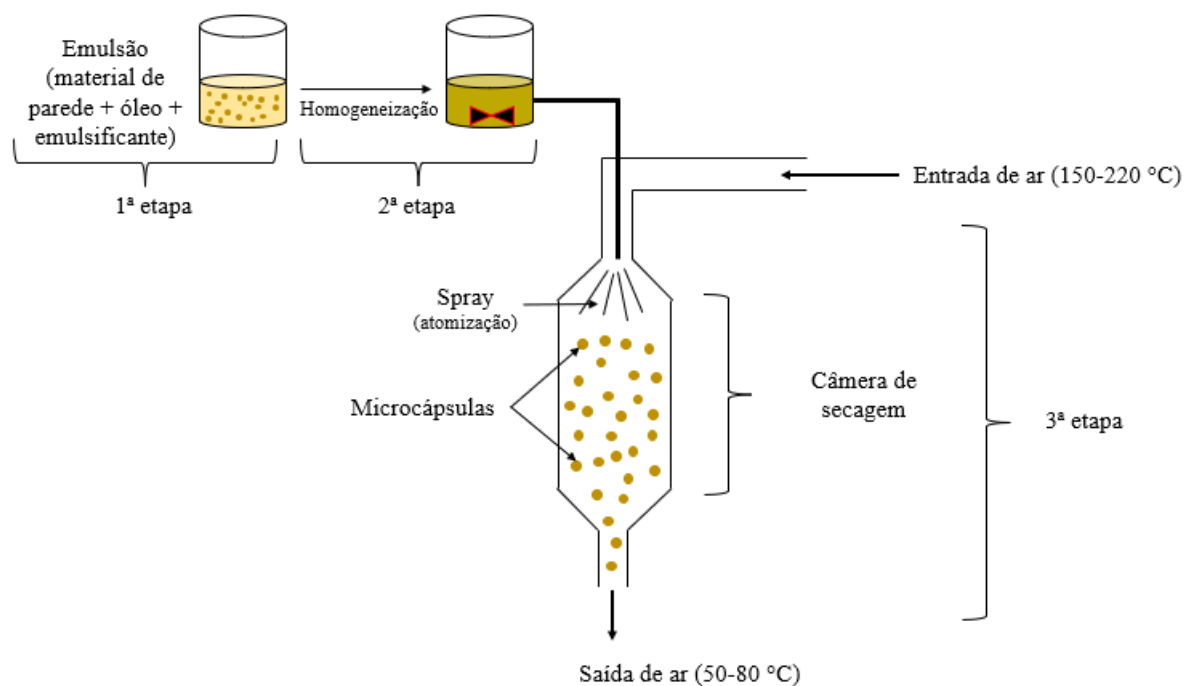


Fig. 4. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por *spray drying*. Adaptado de Bakry et al., 2015.

Rahmani-Manglano et al. (2020) microencapsularam óleo de peixe por *spray drying* e alcançaram $98,07 \pm 0,04\%$ de EE, com microcápsulas apresentando formato esférico e superfícies lisas. Trilaksani et al. (2020) utilizaram a mesma técnica e mesmo óleo e obtiveram $93,71 \pm 0,81\%$ EE, com microcápsulas medindo $6,26 \mu\text{m}$. Esses estudos mostram que é possível alcançar uma boa eficiência de microencapsulação submetendo óleo de peixe à técnica de *spray drying*.

Outros pesquisadores também utilizaram a técnica de *spray drying* no microencapsulamento de óleos comestíveis, como Hastarini et al. (2019), Solomando et al. (2020c), Srivastava & Mishra (2021) e Bueno et al. (2022).

3.1.2. *Spray chilling*

A microencapsulação por *spray chilling* consiste na formação de micropartículas lipídicas sólidas através da atomização de ingredientes ativos que podem ser de origem hidrofílica ou hidrofóbica, dissolvidos ou dispersos em materiais encapsulantes lipídicos fundidos. É possível obter uma solução, emulsão ou dispersão, dependendo da solubilidade dos compostos, que é atomizada em câmara frigorífica, na qual as gotículas solidificam ao entrar

em contato com o ar frio, dando origem a micropartículas lipídicas sólidas com características de um produto em pó (Fig. 5) (Figueiredo et al., 2022). Esse processo assemelha-se ao *spray drying*, com diferenças na temperatura da câmara de resfriamento e o tipo de material de parede utilizado (Feizollahi et al., 2018). O *spray chilling* apresenta vantagens que podem interessar às indústrias, como utilização de baixa temperatura, liberação controlada durante o processamento térmico e atuação como uma boa barreira à umidade. Este método pode ser utilizado para viabilizar um revestimento adicional ao redor das microcápsulas de óleos produzidas por *spray drying* ou coacervação complexa, melhorando a estabilidade oxidativa e propiciando maior tempo de armazenamento (Jamshidi et al., 2020).

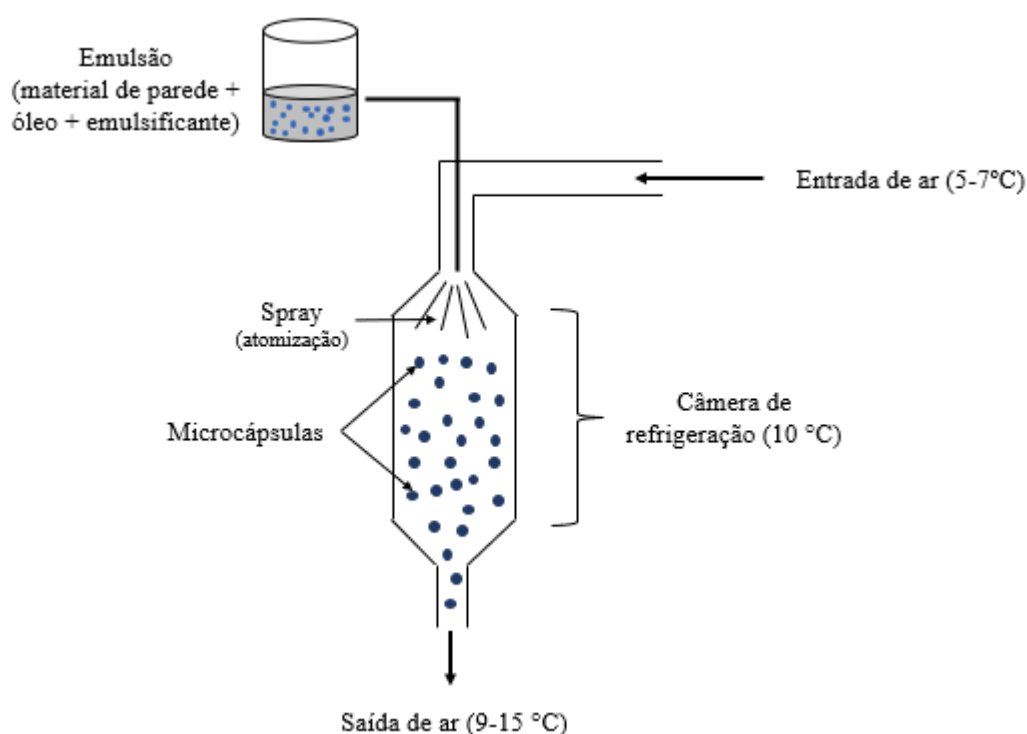


Fig. 5. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por *spray chilling*. Autoria própria (2022).

Fadini et al. (2021) utilizaram a combinação das técnicas de *spray drying* e *spray chilling* para o encapsulamento do óleo de peixe. As microcápsulas de camada dupla foram mais eficazes na proteção dos ácidos graxos eicosapentaenoico (EPA) e docosahexaenoico (DHA) durante o armazenamento a 6 ± 2 °C por 180 dias, representando uma perda inferior a 10% em peso ocorrida durante sua produção, que pode ser atribuído ao aprisionamento mais eficiente do material do núcleo dentro da matriz.

3.1.3. Liofilização

A liofilização é uma técnica de desidratação a baixas temperaturas, e consiste em duas etapas: na primeira, o produto é congelado, e na segunda ocorre o abaixamento da pressão e remoção do gelo por sublimação (Fig. 6). Apesar de sua utilização ser aconselhada para óleos sensíveis a temperaturas elevadas, quando comparada ao *spray drying*, ela é considerada um processo mais caro, mais demorado e as microcápsulas produzidas apresentam menor eficiência de microencapsulação, maior teor de óleo superficial e menor estabilidade contra oxidação devido à estrutura mais porosa das microcápsulas, o que acelera o processo de oxidação e eleva os custos de transporte e armazenamento (Feizollahi et al., 2018). Por demandar maior tempo durante a secagem e também pela dificuldade de extrapolar seu uso para grandes escalas, a liofilização tem aplicação limitada na indústria alimentícia (Jamshidi et al., 2020).

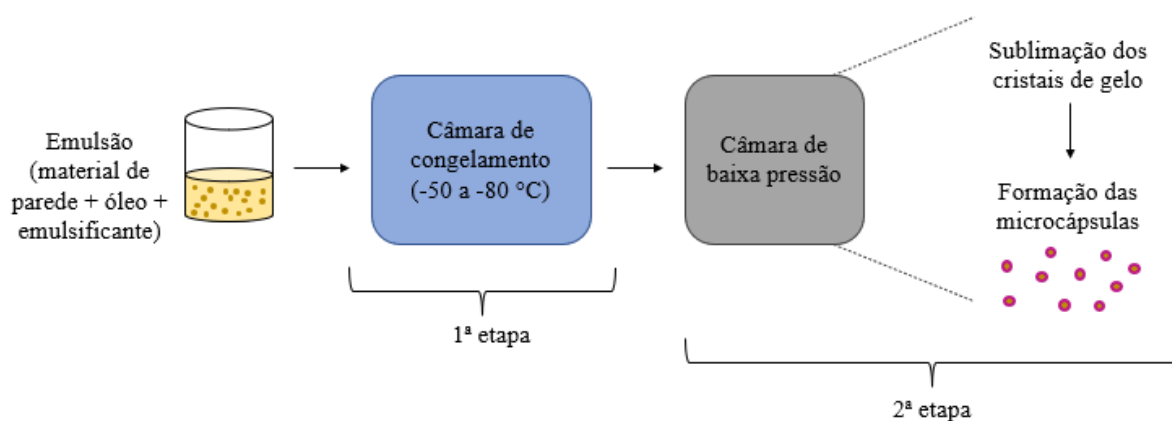


Fig. 6. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por liofilização.
 Autoria própria (2022).

González et al. (2021) aplicaram o método de liofilização para microencapsular o óleo de chia e concluíram que o encapsulamento do óleo apresentou efeito protetor, retardando a sua oxidação e evitando a formação de produtos indesejados, mesmo com uma eficiência de encapsulação equivalente a $55,1 \pm 3,9\%$.

A liofilização também foi empregada por Andajani et al. (2016), Beikzadeh et al. (2020) e González et al. (2018) no microencapsulamento de óleos comestíveis, como óleo de peixe, de linhaça e chia, respectivamente.

3.1.4. Coacervação complexa

A microencapsulação pela técnica de coacervação complexa consiste na separação de fases de pelo menos dois biopolímeros da solução inicial e, a seguir, deposição da fase coacervada recém-formada ao redor do ingrediente ativo que se pretende encapsular (Fig. 7) (Habibi et al., 2017). Uma premissa para que esse fenômeno aconteça é que os biopolímeros misturados tenham cargas opostas, para que assim, a atração eletrostática, além de outras interações mais fracas (ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas) entre essas macromoléculas propicie a formação do complexo (Rutz et al., 2017). Este método é amplamente utilizado para encapsular compostos lipofílicos, como óleos comestíveis. Por utilizar temperaturas mais baixas ($\sim 40^\circ\text{C}$), esta tecnologia apresenta algumas vantagens sobre o método de *spray drying*, podendo garantir maior estabilidade oxidativa aos óleos encapsulados e formação de microcápsulas de tamanho mais uniforme (Rios-Mera et al., 2021).

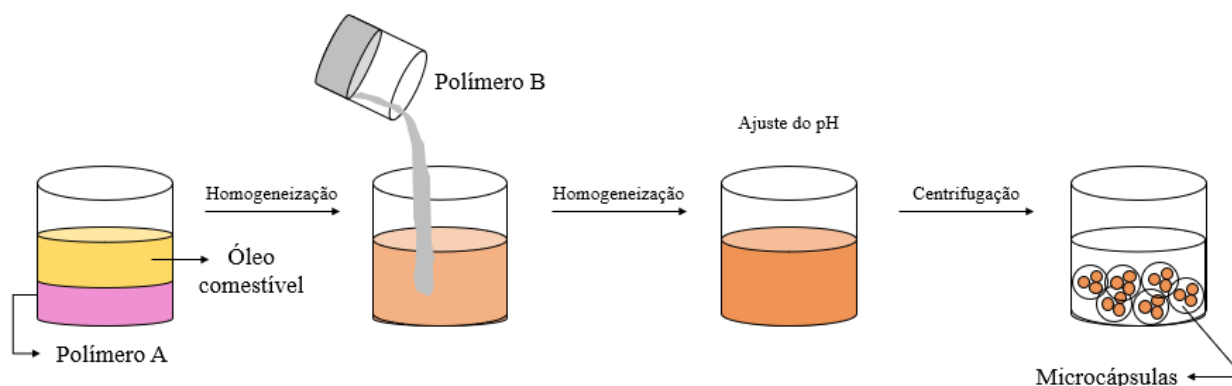


Fig. 7. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por coacervação complexa. Adaptado de Comunian & Favaro-Trindade, 2016.

Rutz et al. (2017) combinaram os métodos de coacervação complexa e liofilização e encapsularam o óleo de palma usando diferentes combinações de material de parede: quitosana + pectina e quitosana + goma xantana. Os pesquisadores alcançaram eficiência de microencapsulação e rendimento de 52,20 e 99,51% e 62,41 e 98,90%, respectivamente, porém, obtiveram formato irregular das microcápsulas e perdas significativas de carotenoides, que variaram de 71,03 a 76,94%.

A combinação de coacervação complexa e liofilização também foi escolhida por outros pesquisadores para o microencapsulamento de óleos comestíveis, como Tamjidi et al. (2011), Akhtar et al. (2022) e Silva et al. (2022).

3.1.5. Emulsificação

A tecnologia de emulsificação é geralmente aplicada no encapsulamento de bioativos em soluções aquosas, que podem ser utilizadas diretamente em seu estado líquido ou podem seguir para processos de secagem (*spray drying* ou liofilização) para formar pós e depois serem aplicados em alimentos. Resumidamente, uma microemulsão constitui-se em pelo menos dois líquidos imiscíveis, geralmente água e óleo, com um dos líquidos sendo disperso como pequenas partículas no outro, sendo preparada com a adição de um emulsificante ao conjunto seguida da utilização de um homogeneizador (Fig. 8). O baixo custo e a simplicidade na execução são suas vantagens, porém, a instabilidade das microcápsulas formadas pode ser considerada sua principal desvantagem (Bakry et al., 2015).

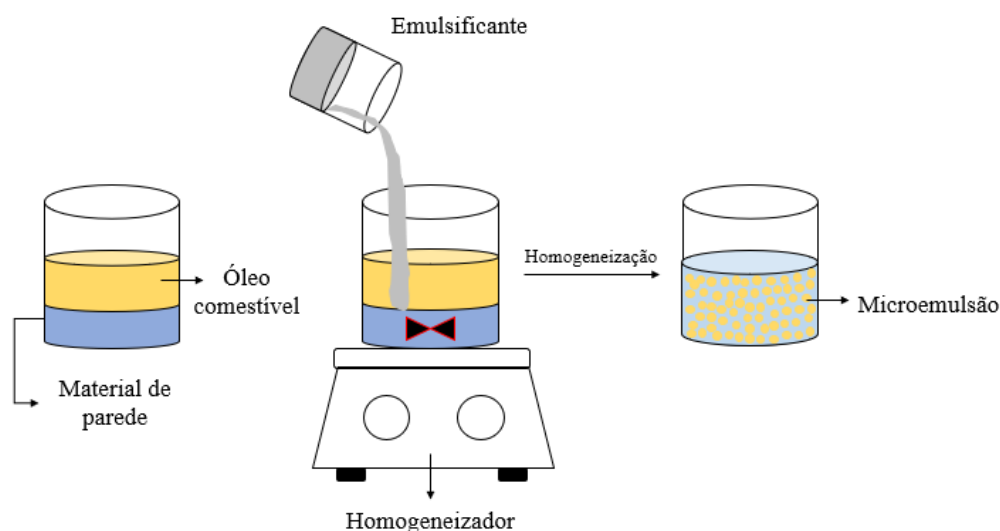


Fig. 8. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por emulsificação. Autoria própria (2022).

Bakry et al. (2019) utilizaram a técnica de emulsificação para microencapsular o óleo de peixe, empregando a carboximetilcelulose como material de revestimento, e concluíram que o processo de emulsificação foi fundamental para manter a estabilidade do óleo e, conseqüentemente, diminuir os valores de peróxidos e teores de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) no produto elaborado.

3.1.6. Gelificação iônica

A gelificação iônica é baseada na reticulação de cadeias de polieletrólitos, geralmente alginato, na presença de cátions mono ou bivalentes como sódio ou cálcio. Os íons de cálcio, por exemplo, formam zonas de junção entre grupos carboxilatos de moléculas de alginato formando um gel de estrutura de rede aberta capaz de aprisionar compostos bioativos (Fig. 9). O procedimento de imobilização em esferas de alginato não é apenas barato, mas também muito fácil de realizar e proporciona condições extremamente suaves, de modo que o potencial de aplicação industrial é considerável. No entanto, algumas desvantagens como baixa resistência mecânica, grande tamanho e baixa capacidade de retenção têm conduzido à modificação do sistema básico alginato-cálcio. As abordagens mais frequentes têm sido focadas no uso de alginato em combinação com outros hidrocolóides, como soro de leite, quitosana, pectina, amido de milho e outras gomas capazes de formar estruturas compostas ou multicamadas que permitem melhorar a capacidade de retenção, rendimento e eficiência de encapsulamento (Vasile et al., 2018).

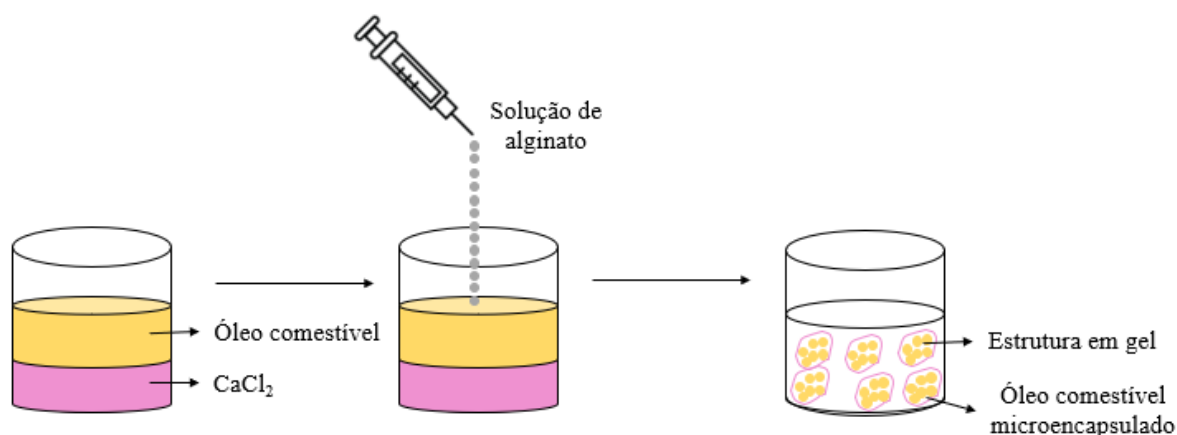


Fig. 9. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por gelificação iônica. Adaptado de Comunian & Favaro-Trindade, 2016.

Aplicando a técnica de gelificação iônica, Morsy & Elsabagh (2021) encapsularam óleo de peixe utilizando como materiais de parede apenas o alginato de sódio e alginato de sódio em combinação com quitosana, e alcançaram eficiência de microencapsulação de 82,55 e 90,78%, respectivamente, evidenciando que a quitosana favoreceu uma melhora na quantidade de óleo de peixe dentro das partículas. As microcápsulas apresentaram formas esféricas, lisas

e sem rachaduras. Elsebaie et al. (2022) também microencapsularam o óleo de peixe pela técnica de gelificação iônica.

Rutz et al. (2016) encapsularam óleo de palma refinado acrescido de β -caroteno em pó. Eles concluíram que usando o método de gelificação, com quitosana e tripolifosfato de sódio como materiais de parede, foi possível obter eficiência de encapsulação de 95,3%, mesmo com microcápsulas de formato irregular.

3.1.7. Revestimento em leito fluidizado

O revestimento em leito fluidizado tem sido cada vez mais utilizado pelas indústrias de alimentos e vem sendo considerado um dos métodos mais eficientes. É realizado a partir da suspensão de partículas sólidas do material do núcleo por uma corrente de ar (sob temperatura e umidade controladas) e, logo após, pulverização do material de revestimento. Com o passar do tempo, o material da parede se formará gradativamente como uma fina camada na superfície das partículas suspensas (Fig. 10) (Bakry et al., 2015). Este método pode ser usado para fornecer revestimento adicional para óleos comestíveis ricos em ômega-3, isto é, quando utilizado em combinação com outra técnica de microencapsulamento, confere melhor proteção e vida útil aos óleos (Feizollahi et al., 2018).

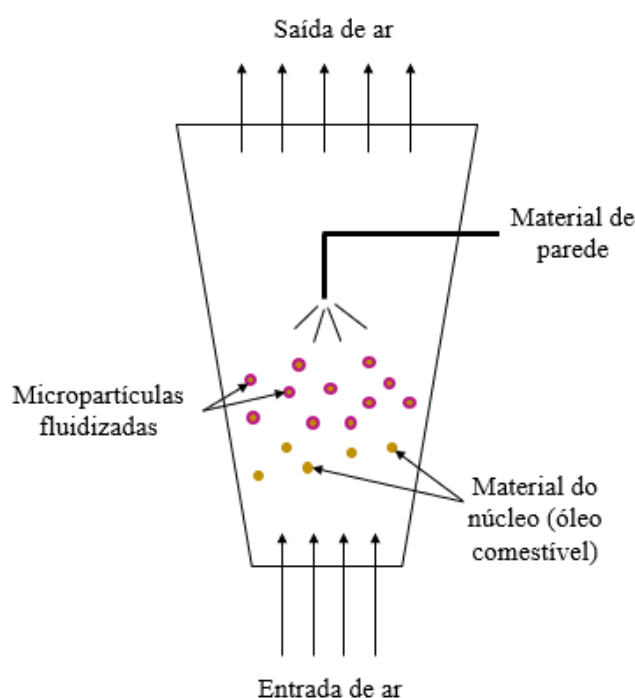


Fig. 10. Representação da técnica de microencapsulamento de óleo comestível por revestimento em leito fluidizado. Adaptado de Bakry et al., 2015.

Kolanowski et al. (2007) empregaram a técnica de revestimento em leito fluidizado para o microencapsulamento de óleo de peixe, utilizando gelatina de peixe e amido de milho como materiais de parede. O objetivo do estudo foi avaliar a influência da fortificação com óleo de peixe microencapsulado na qualidade sensorial de alimentos instantâneos.

3.2. Óleos comestíveis mais usados para microencapsulação

O óleo de peixe foi o óleo comestível mais utilizado nos estudos que envolveram o processo de microencapsulamento com fins de fortificação (Fig. 11). Esse óleo é rico em ômega-3, ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa, mais especificamente EPA e DHA, que ajudam a prevenir o surgimento de uma variedade de doenças crônicas, como doenças cardiovasculares e diabetes, e trombose, por exemplo.

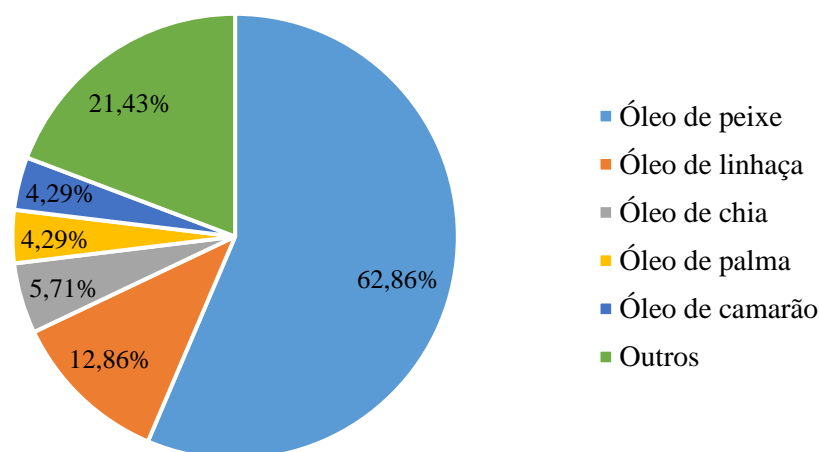


Fig. 11. Óleos comestíveis microencapsulados.

Óleo de linhaça microencapsulado foi o segundo óleo mais aplicado em matrizes alimentícias com o objetivo de enriquecimento. Por ser a fonte vegetal mais rica em ômega-3, o óleo de linhaça está se popularizando devido aos seus vários benefícios à saúde (Goyal, et al., 2016).

O óleo de chia vem sendo microencapsulado e empregado como fonte alternativa de ácidos graxos ômega-3, principalmente para aquelas pessoas que não consomem alimentos de origem animal. Trata-se de um óleo que apresenta em sua composição compostos fenólicos, tocoferóis e alto teor de ácido graxo alfa-linolênico (ALA).

Outro óleo rico em ácidos graxos poli-insaturados, EPA e DHA, que vem sendo encapsulado e utilizado para a fortificação de alimentos é o de algas, servindo também como alternativa ao óleo de peixe. Além de apresentar ácidos graxos ômega-3 em sua composição, o óleo de alga também é constituído por carotenoides (Bakry et al., 2015; Serna-Saldivar et al., 2006).

O óleo de palma refinado também foi utilizado para fins de enriquecimento de alimentos. Este óleo possui alto teor de compostos bioativos, principalmente carotenoides, tocoferóis e tocotrienóis, que contribuem para sua estabilidade e valor nutricional. Os carotenoides, como o β -caroteno, por exemplo, são pigmentos fortemente recomendados devido aos seus efeitos benéficos ao organismo, como sua atividade antioxidante (Ferreira et al., 2016).

Contudo, os ácidos graxos ômega-3 são altamente suscetíveis à oxidação, sendo sensíveis a altas temperaturas, oxigênio e íons metálicos, que podem desencadear em perda nutricional, liberação de produtos oxidados e desenvolvimento de ranço e sabor desagradáveis nos óleos e nos produtos alimentícios em que esses óleos são adicionados, reduzindo o prazo de validade e as características sensoriais dos alimentos (Gowda, et al., 2018; Solomando et al., 2020a). O mesmo acontece com os carotenoides, que são sensíveis ao oxigênio, luz e calor, acarretando perda de cor, propriedade antioxidante e atividade pró-vitamínica (Rutz et al., 2017).

3.3. Materiais de parede

Diversos materiais de parede foram usados para encapsular óleos comestíveis, sendo que a maioria dos estudos empregou carboidratos, de forma isolada ou combinada a outros materiais, como encapsulantes (Fig. 12), e os mais utilizados são discutidos a seguir.

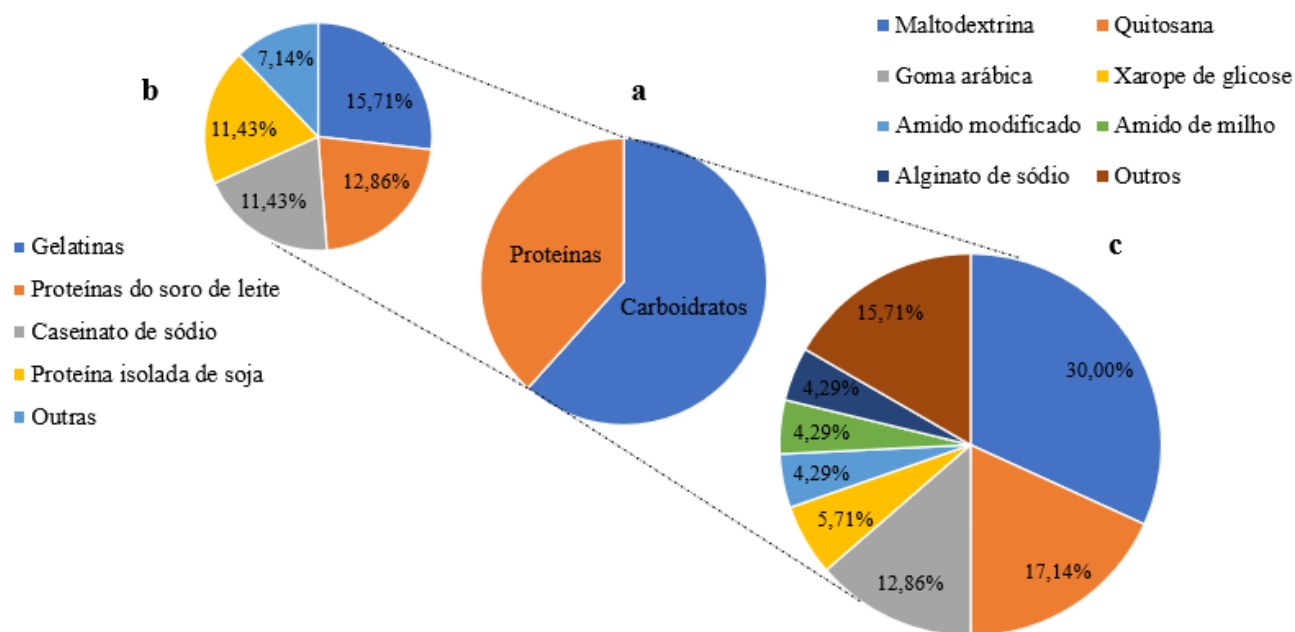


Fig. 12. Representação dos grupos de materiais de parede empregados no microencapsulamento de óleos comestíveis (a), representados pelas proteínas (b) e carboidratos (c) mais utilizados.

Dentre os carboidratos utilizados como materiais de parede nos estudos, a maltodextrina foi o mais utilizado na microencapsulação de óleos comestíveis. Ela é produzida a partir da hidrólise química ou enzimática do amido e possui aroma e sabor neutros, custo relativamente baixo e efetiva proteção contra oxidação (Abedi et al., 2016). Contudo, a maltodextrina apresenta baixa capacidade emulsificante, o que leva a uma menor estabilidade da emulsão e baixa retenção de óleos. Por esse motivo, é frequentemente utilizada em combinação com outros materiais de parede (Nayana et al., 2021).

Damerou et al. (2022) testaram a combinação de maltodextrina com três diferentes materiais de parede (proteína concentrada de soro de leite, proteína de soja e proteína de ervilha) para microencapsular óleo de peixe através da técnica de *spray-drying*. As microcápsulas formadas apresentaram formato esférico e superfície lisa e a maior eficiência de microencapsulamento ($65,70 \pm 0,52$) foi para a combinação maltodextrina e proteína concentrada de soro de leite, sugerindo que esta última exerceu melhor efeito no encapsulamento do óleo quando comparada às proteínas de origem vegetal.

A quitosana foi o segundo material de parede mais usado entre os estudos analisados. Refere-se a um polissacarídeo derivado da quitina, que é um polímero catiônico e

biodegradável, encontrado principalmente na carapaça de crustáceos, e considerado material altamente renovável e economicamente viável (Rutz et al., 2017). Quanto à sua utilização como material encapsulante, em virtude da sua natureza mucoadesiva, a quitosana exibe liberação controlada do material do núcleo no meio gastrointestinal de forma mais facilitada, sendo uma vantagem quando o objetivo da microencapsulação é a liberação do componente ativo de forma moderada. Porém, sua solubilidade apenas em baixos valores de pH pode limitar a sua aplicação (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Pode ser empregada em diversas técnicas de encapsulamento, com destaque para técnicas de coacervação.

Óleo de peixe microencapsulado com quitosana e amido modificado como materiais de parede e Tween 80 como emulsificante apresentou eficiência do microencapsulamento superior a 85,0% e microcápsulas sem rachaduras, poros ou óleo livre na superfície (Hasani et al., 2019).

Já a goma arábica foi selecionada como agente encapsulante em 12,86% dos estudos. Ela é um bom agente encapsulante, pois apresenta propriedade emulsificante, alta solubilidade em água e baixa viscosidade (Abedi et al., 2016, Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

Goma arábica, associada à gelatina, foi empregada no encapsulamento do óleo de peixe através da técnica de coacervação complexa seguida de liofilização, e os pesquisadores alcançaram $76,66 \pm 0,16\%$ de EE e as microcápsulas exibiram formato esférico e estrutura multinuclear, produzindo excelente liberação controlada do óleo (Habibi et al., 2017).

Dentre as proteínas utilizadas como materiais de parede, as gelatinas foram as mais adotadas nos estudos. Segundo Comunian & Favaro-Trindade (2016) a gelatina é um dos biopolímeros mais utilizados como material de parede, e pode ser obtida a partir de pele e ossos de suínos, de couro bovino e de peixes. Além de seu baixo custo, o gel de gelatina funde a temperaturas em torno de 30 e 40 °C, o que auxilia na liberação controlada dos compostos encapsulados.

Para microencapsular o óleo de pequi, através das técnicas de coacervação complexa e liofilização, Silva et al. (2022) utilizaram como uns dos materiais de parede a gelatina e a goma de caju. As microcápsulas formadas apresentaram formato esférico e superfície sem sinais de rachaduras e a eficiência e rendimento do microencapsulamento foram de $83,75 \pm 2,88$ e $53,98 \pm 1,15$, respectivamente.

As proteínas do soro de leite foram o segundo material de parede mais utilizado dentro do grupo das proteínas. Essas proteínas são um tipo de material de parede que exibem boas propriedades de encapsulamento devido ao seu comportamento gelificante e capacidade de aprisionar substâncias centrais voláteis e não voláteis. Além disso, essas proteínas apresentam

características emulsificantes superiores às de outros materiais de parede, aspecto positivo para a estabilização das emulsões produzidas no processo de microencapsulação (Umesha et al., 2015, Nayana et al., 2021).

Nayana et al. (2021) realizaram a mistura de dois óleos comestíveis (oleína de palma e linhaça), e combinaram dois materiais de revestimento (goma arábica e proteína do soro de leite) em três diferentes proporções entre eles (1:1, 1:2 e 2:1) e aplicaram a técnica de *spray drying* para o microencapsulamento. As microcápsulas formadas apresentaram superfície lisa e sem fissuras e a eficiência e o rendimento do encapsulamento foram de $20,0 \pm 0,021$ e $55,0 \pm 0,04$, $40,0 \pm 0,04$ e $62,1 \pm 0,10\%$ e $6,8 \pm 0,50$ e $40,9 \pm 0,12$, respectivamente. Verificou-se que a proporção de materiais de parede exerceu uma influência substancial no rendimento das microcápsulas e na eficiência do encapsulamento, com a proporção de 1:2 (goma arábica:proteína do soro de leite) exibindo o melhor resultado. Essa mesma microcápsula exibiu teor de caroteno equivalente a $84 \pm 0,03$ ppm, correspondendo a uma retenção de 77,8% após o *spray drying* em relação ao teor de caroteno da mistura de óleo antes do encapsulamento.

A caseína apresenta habilidades estabilizadoras devido à sua estrutura desordenada e substancialmente hidrofóbica. Em decorrência do seu alto teor de resíduos de fosfoeril, as caseínas exibem uma capacidade específica de ligação a metais que, por sua vez, inibe a oxidação lipídica. No processo de encapsulamento, a aplicabilidade da caseína depende da forma como ela é utilizada: como sal (caseinato de sódio, por exemplo), como micelas ou como partículas em suspensão. O caseinato de sódio foi empregado como encapsulante em 11,43% dos estudos. O caseinato de sódio é uma proteína que modifica a sua estrutura durante a emulsificação, por meio de desdobramento, formando uma multicamada resistente em torno das gotículas de óleo, o que promove estabilidade à emulsão (Santhanam et al., 2015, Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

Santhanam et al. (2015) aplicaram o método de *spray drying* para a elaboração de microcápsulas de óleo de peixe com três diferentes materiais de parede (caseinato de sódio, maltodextrina e proteína de soja) e lecitina de soja como emulsificante. Concluiu-se que as microcápsulas produzidas com caseinato de sódio apresentaram maior eficiência de microencapsulamento ($77,28 \pm 0,43$) e foram oxidativamente mais estáveis, evidenciado pelos menores índices de valor de peróxido e TBARS ao longo do armazenamento refrigerado por 32 dias.

3.4. Emulsificantes

Dentre os estudos, apenas 24,28% relataram o uso de emulsificante no processo de microencapsulamento e destes, 76,47% utilizaram a lecitina de soja, que é um fosfolípido. Para microencapsular o óleo de peixe, Aquilani et al. (2018) emulsionaram o óleo com a lecitina de soja antes de misturar com os materiais de parede, a fim de estabilizar a emulsão e obter bons resultados no microencapsulamento. As microcápsulas produzidas por spray drying se mostraram eficazes no enriquecimento de alimentos com EPA e DHA.

Tween 80, tensoativo não iônico, foi utilizado como emulsificante nos processos de microencapsulamento dos óleos comestíveis (23,53%). Ele apresenta algumas vantagens, como custo razoável, biodegradabilidade, não toxicidade e ainda é eco-friendly (Boonpratum et al., 2022). Fadini et al. (2021) microencapsularam o óleo de peixe utilizando Tween 80 para potencializar a emulsificação entre o óleo e os materiais de parede. Os pesquisadores alcançaram $94,64 \pm 0,17\%$ de EE, e mostrando que a emulsificação desempenha um papel crítico na otimização da eficiência de encapsulamento de óleos.

3.5. Eficiência do microencapsulamento, morfologia e tamanho das microcápsulas

Estrada et al. (2011) e Trilaksani et al. (2020) aplicaram a técnica de *spray drying* para microencapsular óleo de peixe utilizando como materiais de parede a combinação de goma arábica e maltodextrina, na proporção de óleo:material de parede (O:MP) equivalente a 1:4,7 e 1:2, respectivamente. No primeiro estudo foi obtida uma EE de $75,5 \pm 2,66\%$ enquanto no segundo essa eficiência foi 18,2% a mais, mostrando que uma menor proporção de material de parede em relação ao óleo foi mais eficiente para o processo de microencapsulação do óleo de peixe. Já Jeyakumari et al. (2016) avaliaram o encapsulamento do óleo de peixe com dois tipos de materiais de revestimento, gelatina de peixe e maltodextrina, separadamente e na mesma proporção de O:MP (1:2). Ambas as microcápsulas formadas apresentaram menos de 50,0% de EE. Diante desses resultados pode-se inferir que a combinação de pelo menos dois materiais de parede é mais efetiva no microencapsulamento do óleo de peixe, especialmente porque não existe um material de parede que contemple todas as características ideais para o encapsulamento.

Proteínas foram empregadas como materiais de parede para o microencapsulamento de óleos de agrião (Umesha et al., 2015) e chia (González et al., 2021), adotando proporções de O:MP de 1:2,5 e 1:2, respectivamente. O óleo de agrião microencapsulado com proteína de soro do leite concentrada apresentou EE ($64,8 \pm 1,8\%$) superior à do microencapsulamento do

óleo de chia com proteína isolada de soja ($55,1 \pm 3,9\%$), sugerindo que a proteína oriunda do leite pode ser mais eficaz neste processo.

Goma arábica foi utilizada, na presença de lecitina de soja como emulsificante, para microencapsular óleo de linhaça, sendo usada uma proporção de material de parede em relação ao óleo superior à dos estudos citados anteriormente, alcançando $90,5 \pm 0,1$ de EE e microcápsulas com superfície enrugada (Gallardo et al., 2013). Estes estudos apontam que o microencapsulamento de óleos vegetais utilizando carboidratos como material de parede pode ser mais satisfatório do que os processos que usam proteínas.

Comparando-se a este estudo de Gallardo et al. (2013), Rubilar et al. (2012) igualmente utilizaram a técnica de *spray drying* para microencapsular o óleo de linhaça e, além da goma arábica como agente encapsulante, também usaram a maltodextrina, obtendo resultado semelhante de eficiência de encapsulamento ($90,7 \pm 1,19$), porém, com microcápsulas de superfície lisa e livre de poros, que pode ser em decorrência da utilização de uma menor temperatura do ar de entrada no *spray-drier* ($140\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Rutz et al. (2016) e Rutz et al. (2017) avaliaram o microencapsulamento de óleo de palma refinado com quitosana combinada a dois materiais de parede, cada um, na proporção de 1:5 para O:MP, sendo eles carboximetilcelulose, tripolifosfato de sódio, goma xantana e pectina. Todas as microcápsulas formadas apresentaram formato irregular, e aquelas elaboradas com quitosana e CMC apresentaram o maior valor de EE, seguida da combinação de quitosana com tripolifosfato de sódio, ambas acima de 95,0%. As demais combinações exibiram eficiência de microencapsulamento inferior a 65,0%. Nesse contexto específico, tanto os materiais de parede utilizados quanto a técnica de microencapsulamento aplicada podem ter exercido influência na eficiência do microencapsulamento, sugerindo que a quitosana, combinada a CMC ou tripolifosfato de sódio, podem ser encapsulantes eficientes na microencapsulação do óleo de palma refinado.

Alginato de sódio foi utilizado em combinação com proteína isolada de feijão mungo (Gulzar et al., 2022) e proteína isolada de tremço (Elsebaie et al., 2022) para o microencapsulamento de óleo de camarão + óleo de semente de *Camellia oleifera* por *spray drying* e óleo de peixe por gelificação iônica, respectivamente. No primeiro estudo, os pesquisadores obtiveram uma eficiência de microencapsulamento de $72,09 \pm 2,97$, com microcápsulas esféricas, com superfície irregular e medindo $1,796 \pm 0,043\text{ }\mu\text{m}$. Já Elsebaie et al. (2022) também produziram microcápsulas de formato esférico, mas alcançaram uma maior EE ($95,62 \pm 1,13$) e um menor tamanho de partícula ($0,82 \pm 0,06\text{ }\mu\text{m}$). Sendo assim, propõem-

se que a técnica de gelificação iônica possa fornecer microcápsulas ideais para a aplicação em alimentos em decorrência do tamanho das microcápsulas formadas.

Pramestia et al. (2015) e Rahmani-Manglano et al. (2020) microencapsularam óleo de peixe através da técnica de *spray drying* e obtiveram microcápsulas de formato esférico e superfície lisa. Porém, os primeiros pesquisadores atingiram um tamanho médio de partícula de 6,52 μm , sendo menor do que o obtido no estudo mais recente ($12,5 \pm 5,5 \mu\text{m}$). Desse modo, sugere-se que a menor temperatura de entrada de ar no *spray-drier* (140 °C) utilizada por Pramestia et al. (2015) tenha favorecido a formação de microcápsulas de menor tamanho. Nesse ínterim, Hasani et al. (2019) optaram por microencapsular o óleo de peixe por liofilização e produziram microcápsulas de tamanho ainda menor ($2,30 \pm 0,20 \mu\text{m}$).

É importante ressaltar que para a incorporação das microcápsulas em alimentos é interessante que estas apresentem tamanho de partícula inferior a 100 μm , uma vez que partículas maiores podem causar sabor indesejável (Feizollahi et al., 2018). Dentre os estudos avaliados e que investigaram o tamanho das microcápsulas de óleos (18,57%), apenas no estudo de Sridhar et al. (2021) os tamanhos das microcápsulas produzidas foram superiores a 100 μm . Neste estudo os pesquisadores avaliaram a fortificação de pães com microcápsulas de óleo de peixe, de óleo de alho e óleo de peixe + óleo de alho. Na análise sensorial, os pães fortificados com óleo de peixe receberam notas menores nos atributos aroma, sabor e aceitabilidade geral quando comparado ao controle (sem óleo), enquanto não houve diferença significativa relatada no perfil sensorial dos demais pães enriquecidos com as outras microcápsulas em relação ao controle. Esse resultado pode estar relacionado ao tamanho das microcápsulas, principalmente as de óleo de peixe (tamanho médio de $809 \pm 113 \mu\text{m}$) que, por apresentar odor e sabor característicos, podem ter influenciado na aceitabilidade do pão. Já as microcápsulas de óleo de peixe + óleo de alho, apesar de apresentarem o maior tamanho médio ($1.031 \pm 114 \mu\text{m}$), não exerceram efeito significativo no sabor dos pães, sugerindo que o óleo de alho tenha ajudado a mascarar o odor de peixe.

À vista dos resultados demonstrados acima, percebe-se que as condições do processo de microencapsulamento, dentre elas o óleo comestível utilizado, material de parede escolhido, proporção de óleo:material de parede e técnica empregada, influenciam diretamente nas características das microcápsulas formadas.

4. Conclusões

Devido às suas propriedades, como fonte de vitaminas lipossolúveis e outros compostos bioativos, os óleos comestíveis estão ganhando destaque na fortificação de alimentos. Para isso, pesquisadores e a indústria alimentícia estão investindo na tecnologia da microencapsulação para transformar os óleos em microcápsulas revestidas por material de parede que conferem proteção e maior facilidade no manuseio e aplicação desses óleos nos alimentos. O *spray drying* é uma técnica de microencapsulamento de baixo custo e de operação relativamente simples e tem sido a mais utilizada para microencapsular os óleos comestíveis, que, dentre eles, o óleo de peixe vem sendo o mais microencapsulado para fins de enriquecimento de alimentos.

Dentre os materiais de parede, os carboidratos foram os mais empregados no processo, com destaque para maltodextrina, quitosana e goma arábica. No grupo das proteínas, os encapsulantes mais utilizados foram as gelatinas, as proteínas do soro de leite, o caseinato de sódio e a proteína isolada de soja. A lecitina de soja foi o emulsificante mais usado.

Em relação à caracterização do microencapsulamento e das microcápsulas, os estudos que empregaram as técnicas de *spray drying*, gelificação iônica ou coacervação complexa alcançaram eficiência de microencapsulamento superior a 90,0%, indicando que o microencapsulamento protegeu os óleos comestíveis encapsulados, proporcionando melhor retenção de seus compostos bioativos; aqueles que utilizaram o *spray drying* obtiveram microcápsulas com formato esférico; e os que adotaram o *spray drying*, gelificação iônica ou liofilização como técnicas de microencapsulamento de óleos produziram as microcápsulas de menores tamanhos ($< 10 \mu\text{m}$).

Diante dos resultados extraídos dos estudos, foi possível constatar que o processo de microencapsulação foi efetivo no recobrimento e proteção dos óleos comestíveis. Os alimentos mais utilizados como matriz para aplicação dos óleos microencapsulados para fins de fortificação, o efeito destas microcápsulas nos alimentos e a estabilidade oxidativa destes serão apresentados e discutidos na parte II referente a esse tema.

Declaração de conflito de interesse:

Os autores confirmam não ter conflitos de interesse associados a qualquer aspecto deste estudo.

Financiamento:

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo n° 409924/2021-0).

Agradecimentos:

Os autores expressam seu especial agradecimento aos membros da Coordenação de Aperfeiçoamento e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil). Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil - Processo n. 409924/2021-0). C. D. Ferreira Ribeiro agradece ao CNPq/Brasil pela bolsa de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora (Processo n. 303587/2021-0).

Referências

- Abedi, A.-S., Rismanchi, M., Shahdoostkhany, M., Mohammadi, A., & Hosseini, H. (2016). Microencapsulation of *Nigella sativa* seeds oil containing thymoquinone by spray-drying for functional yogurt production. *International Journal of Food Science and Technology*, *51*, 2280–2289. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13208>.
- Adhami, K., Asadollahzadeh, H., & Ghazizadeh, M. (2019). A novel process for simultaneous degumming and deacidification of soybean, canola and sunflower oils by tetrabutylphosphonium phosphate ionic liquid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *76*, 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.048>.
- Akhtar, G., Masoodi, F. A., Rather, Z. U. K. & Wani, T. A. (2022). Exploiting encapsulated Himalayan walnut oil as a vivid source of essential fatty acids for the development of novel functional bread. *International Journal of Food Science and Technology*, *57*, 4129–4137. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15729>.
- Andajani, P. T. (2016). Microencapsulated mixture of fish oil and fortified in ice cream. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, *11*.
- Aquilani, C., Pérez-Palacios, T., Sirtori, F., Jiménez-Martín, E., Antequera, T., Franci, O., et al. (2018). Enrichment of Cinta Senese burgers with omega-3 fatty acids. Effect of type of addition and storage conditions on quality characteristics. *Grasas Y Aceites*, *69*, Article e235. <https://doi.org/10.3989/gya.0671171>.
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa. M. Y., Mousa, A., et al. (2015). Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*, 143–182. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>.
- Bakry, A. M., Chen, Y. Q., Liang, L. (2019). Developing a mint yogurt enriched with omega-3 oil: Physiochemical, microbiological, rheological, and sensorial characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*, Article e14287. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14287>.
- Beikzadeh, S., Shojaee-Aliabadi, S., Dadkhodazade, E., Sheidaei, Z., Abedi, A.-S., Mirmoghtadaie, L., et al. (2020). Comparison of properties of breads enriched with omega-3 oil encapsulated in β -glucan and *saccharomyces cerevisiae* yeast cells. *Applied Food Biotechnology*, *7*, 11–20. <http://dx.doi.org/10.22037/afb.v7i1.25969>.

- Bermúdez-Aguirre, D. & Barbosa-Cánovas, G. V. (2012). Fortification of queso fresco, cheddar and mozzarella cheese using selected sources of omega-3 and some nonthermal approaches. *Food Chemistry*, 133, 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.093>.
- Boonpratum, C., Naemchanthara, P., Limsuwan, P., & Naemchanthara, K. (2022). Effects of chitosan and Tween 80 addition on the properties of nanofiber mat through the electrospinning. *e-Polymers*, 22, 234–248. <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0029>.
- Bueno, F., Chouljenko, A., Reyes, V. & Sathivel, S. (2022). Spray-dried almond milk powder containing microencapsulated flaxseed oil. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2061507>.
- Comunian, T. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2016). Microencapsulation using biopolymers as an alternative to produce food enhanced with phytosterols and omega-3 fatty acids: A review. *Food Hydrocolloids*, 61, 442–457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.003>.
- Damerau, A., Mustonen, S. A., Ogrodowska, D., Varjotie, L., Brandt, W. & Laaksonen, O. et al. (2022). Food fortification using spray-dried emulsions of fish oil produced with maltodextrin, plant and whey proteins - Effect on sensory perception, volatiles and storage stability. *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27113553>.
- Dellarosa, N., Laghi, L., Martinsdóttir, E., Jónsdóttir, R., & Sveinsdóttir, K. (2015). Enrichment of convenience seafood with omega-3 and seaweed extracts: Effect on lipid oxidation. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 746–752. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.032>.
- Elsebaie, E. M., Kassem, M. M., Mousa, M. M., Basuony, M. A. M., Zeima, N. M. & Essa, R. Y. (2022). Cod liver oil's encapsulation into sodium alginate/lupin protein beads and its application in functional meatballs' preparation. *Foods*, 11. <https://doi.org/10.3390/foods11091328>.
- Estrada, J. D., Boeneke, C., Bechtel, P., & Sathivel, S. (2011). Developing a strawberry yogurt fortified with marine fish oil. *Journal of Dairy Science*, 94, 5760–5769. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4226>.
- Fadini, A. L., Alvim, I. D., Carazzato, C. A., Paganotti, K. B. de F., Miguel, A. M. R. de O., & Rodrigues, R. A. F. (2021). Microparticles loaded with fish oil: stability studies, food application and sensory evaluation. *Journal of Microencapsulation*, 38, 365–380. <https://doi.org/10.1080/02652048.2021.1948622>.
- Farbod, F., Kalbasi, A., Moini, S., Emam-Djomeh, Z., Razavi, H., & Mortazavi, A. (2015). Effects of storage time on compositional, micro-structural, rheological and sensory properties of low fat Iranian UF-Feta cheese fortified with fish oil or fish oil powder. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 1372–1382. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1163-z>.
- Fard, S. G., Loh, S. P., Turchini, G. M., Wang, B., Elliott, G., & Sinclair, A. J. (2020). Microencapsulated tuna oil results in higher absorption of DHA in toddlers. *Nutrients*, 12. <https://doi.org/10.3390/nu12010248>.
- Feizollahi, E., Hadian, Z., & Honarvar, Z. (2018). Food fortification with omega-3 fatty acids; Microencapsulation as an addition method. *Current Nutrition & Food Science*, 14, 90–103. <https://doi.org/10.2174/1573401313666170728151350>.

- Ferreira, C. D., Conceição, E. J. L., Machado, B. A. S., Hermes, V. S., Rios, A. de O. & Druzian, J. I., et al. (2016). Physicochemical characterization and oxidative stability of microencapsulated crude palm oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, *9*, 124–136. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1603-z>.
- Figueiredo, J. A., Silva, C. R. P., Oliveira, M. F. S., Norcino, L. B., Campelo, P. H., & Botrel, D. A., et al. (2022). Microencapsulation by spray chilling in the food industry: Opportunities, challenges, and innovations. *Trends in Food Science & Technology*, *120*, 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.026>.
- Gallardo, G., Guida, L., Martinez, V., López, M. C., Bernhardt, D., Blasco, R., et al. (2013). Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application. *Food Research International*, *52*, 473–482. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.020>.
- González, A., Bordon, M. G., Bustos, M. C., Salazar, K. L. C., Ribotta, P. D., & Martinez, M. L. (2021). Study of the incorporation of native and microencapsulated chia seed oil on pasta properties. *International Journal of Food Science and Technology*, *56*, 233–241. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14623>.
- González, A., Martínez, M. L., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2018). Effects on bread and oil quality after functionalization with microencapsulated chia oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*, 4903–4910. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9022>.
- Gowda, A., Sharma, V., Goyal, A., Singh, A. K., & Arora, S. (2018). Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, *55*, 1705–1715. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3083-4>.
- Goyal, A., Sharma, V., Sihag, M. K., Singh, A. K., Arora, S., & Sabikhi, L. (2016). Fortification of dahi (Indian yoghurt) with omega-3 fatty acids using microencapsulated flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, *53*, 2422–2433. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2220-1>.
- Goyal, A., Sharma, V., Sihag, M. K., Singh, A. K., Arora, S., & Sabikhi, L. (2017). Oxidative stability of alpha-linolenic acid (ω -3) in flaxseed oil microcapsules fortified market milk. *International Journal of Dairy Technology*, *70*, 188–196. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12326>.
- Gulzar, S., Nilsuwan, K., Raju, N. & Benjakul, S. (2022). Whole wheat crackers fortified with mixed shrimp oil and tea seed oil microcapsules prepared from mung bean protein isolate and sodium alginate. *Foods*, *11*. <https://doi.org/10.3390/foods11020202>.
- Gumus, C. E., & Gharibzahedi, S. M. T. (2021). Yogurts supplemented with lipid emulsions rich in omega-3 fatty acids: New insights into the fortification, microencapsulation, quality properties, and health-promoting effects. *Trends in Food Science & Technology*, *110*, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.016>.
- Habibi, A., Keramat, J., Hojjatoleslami, M., & Tamjidi, F. (2017). Preparation of fish oil microcapsules by complex coacervation of gelatin–gum arabic and their utilization for fortification of pomegranate juice. *Journal of Food Process Engineering*, *40*, Article e12385. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12385>.

- Hasani, S., Ojagh, S. M., Hasani, M., & Ghorbani, M. (2019). Sensory and technological properties of developed functional bread enriched by microencapsulated fish oil. *Progress in Nutrition, 21*, 406–415. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i1-S.6202>.
- Hastarini, E., Nabila, Napitupulu, R. J., & Poernomo, S. H. (2019). Characteristics of instant mushroom cream soup enriched with catfish oil microcapsules. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 292*, Article 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/292/1/012005>.
- Jamshidi, A., Cao, H., Xiao, J., & Simal-Gandaraf, J. (2020). Advantages of techniques to fortify food products with the benefits of fish oil. *Food Research International, 137*, Article 109353. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109353>.
- Jeyakumari, A., Janarthanan, G., Chouksey, M. K., & Venkateshwarlu, G. (2016). Effect of fish oil encapsulates incorporation on the physico-chemical and sensory properties of cookies. *Journal of Food Science and Technology, 53*, 856–863. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1981-2>.
- Jiménez-Martín, E., Pérez-Palacios, T., Carrascal, J. R., & Rojas, T. A. (2016). Enrichment of chicken nuggets with microencapsulated omega-3 fish oil: effect of frozen storage time on oxidative stability and sensory quality. *Food and Bioprocess Technology, 9*, 285–297. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1621-x>.
- Kairam, N., Kandi, S., & Sharma, M. (2021). Development of functional bread with flaxseed oil and garlic oil hybrid microcapsules. *LWT - Food Science and Technology, 136*, Article 110300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110300>.
- Kawecki, K., Rezler, R., Baranowska, H. M., & Stangierskia, J. (2021a). Influence of fish oil and microencapsulated fish oil additives on water binding and the rheological properties of poultry sausage batters. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 101*, 1127–1133. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10723>.
- Kawecki, K., Stangierski, J., & Konieczny, P. (2021b). An Analysis of Oxidative Changes and the Fatty Acid Profile in Stored Poultry Sausages with Liquid and Microencapsulated Fish Oil Additives. *Molecules, 26*, Article 4293. <https://doi.org/10.3390/molecules26144293>.
- Kawecki, K., Stangierski, J. & Cegielska-Radziejewska, R. (2021c). The influence of packing methods and storage time of poultry sausages with liquid and microencapsulated fish oil additives on their physicochemical, microbial and sensory properties. *Sensors, 21*. <https://doi.org/10.3390/s21082653>.
- Kolanowski, W., & Weißbrodt, J. (2008). Possibilities of fisherman's friend type lozenges fortification with omega-3 lc pufa by addition of microencapsulated fish oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 85*, 339–345. <https://doi-org.libproxy.viko.lt/10.1007/s11746-008-1203-4>.
- Kolanowski, W., Jaworska, D., Laufenberg, G., & Weißbrodt, J. (2007). Evaluation of sensory quality of instant foods fortified with omega-3 PUFA by addition of fish oil powder. *European Food Research and Technology, 225*, 715–721. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0474-y>.

Kouamé, K. J. E.-P., Bora, A. F. M., Li, X., Sun, Y. & Liu, L. (2021). Novel trends and opportunities for microencapsulation of flaxseed oil in foods: A review. *Journal of Functional Foods*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104812>.

Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Campagnol, P. C. B., & Domínguez, R. (2016). Healthy Spanish salchichón enriched with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. *Food Research International*, 89, 289–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.012>.

Martin, L., Zarn, D., Hansen, A. M., Wismer, W., & Mazurak, V. (2008). Food products as vehicles for n-3 fatty acid supplementation. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*, 69. <https://doi.org/10.3148/69.4.2008.203>.

Mehta, N., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malay, O. P., et al. (2022). Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 12, Article 1424. <https://doi.org/10.3390/app12031424>.

Morsy Dr., M. K., & Elsabagh Dr., R. (2021). Quality parameters and oxidative stability of functional beef burgers fortified with microencapsulated cod liver oil. *LWT - Food Science and Technology*, 142, Article 110959. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110959>.

Nasrin, T. A. A., & Anal, A. K. (2015). Enhanced oxidative stability of fish oil by encapsulating in culled banana resistant starch-soy protein isolate based microcapsules in functional bakery products. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 5120–5128. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1606-1>.

Nayana, N., Abraham, L. M., Ishwarya, S. P., & Nisha, P. (2021) Spray-dried microcapsules of red palm olein-flaxseed oil blend: Development, physicochemical characterization, and evaluation of its potential applications as a fat replacer and β -carotene fortificant in cupcakes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e15663. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15663>.

Nielsen, N. S., & Jacobsen, C. (2009). Methods for reducing lipid oxidation in fish-oil-enriched energy bars. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 1536–1546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01786.x>.

Nielsen, N. S., & Jacobsen, C. (2011). Retardation of lipid oxidation in fish oil-enriched fish pâté – combination effects. *Journal of Food Biochemistry*, 37, 88–97. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2011.00605.x>.

Pérez-Palacios, T., Ruiz-Carrascal, J., Jiménez-Martín, E., Solomando, J. C., & Antequera, T. (2018). Improving the lipid profile of ready-to-cook meat products by addition of omega-3 microcapsules: effect on oxidation and sensory analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 5302–5312. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9069>.

Pramestia, S. P., Riyanto, B., & Trilaksani, W. (2015). Mikroenkapsulasi minyak ikan kaya asam lemak omega-3 sebagai bahan fortifikasi pada sup krim kepiting instan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 18. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v18i2.10611>.

Rahmani-Manglano, N. E., González-Sánchez, I., García-Moreno, P. J., Espejo-Carpio, F. J., Jacobsen, C., & Guadix, E. M. (2020). Development of fish oil-loaded microcapsule

containing whey protein hydrolysate as film-forming material for fortification of low-fat mayonnaise. *Foods*, 9. <https://doi.org/10.3390/foods9050545>.

Rios-Mera, J. D., Saldaña, E., Patinho, I., Selani, M. M., & Contreras-Castillo, C. J. (2021). Enrichment of NaCl-reduced burger with long-chain polyunsaturated fatty acids: Effects on physicochemical, technological, nutritional, and sensory characteristics. *Meat Science*, 177, Article 108497. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108497>.

Rojas, V. M., Marconi, L. F. da C. B., Guimarães-Inácio, A., Leimann, F. V., Tanamati, A., Gozzo, Â. M., et al. (2019). Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils. *Food Chemistry*, 274, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.015>.

Rojas, V. M., Inácio, A. G., Fernandes, I. P. M., Leimann, F. V., Gozzo, A. M., & Fuchs, R. H. B. (2020). Whey protein supplement as a source of microencapsulated PUFA-rich vegetable oils. *Food Bioscience*, 37, Article 100690. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100690>.

Rousta, L. K., Bodbodak, S., Nejatian, M., Yazdi, A. P. G., Rafiee, Z., Xiao, J., et al. (2021). Use of encapsulation technology to enrich and fortify bakery, pasta, and cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 688–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.029>.

Rubilar, M., Morales, E., Contreras, K., Ceballos, C., Acevedo, F., Villarroel, M., et al. (2012). Development of a soup powder enriched with microencapsulated linseed oil as a source of omega-3 fatty acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114, 423–433. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100378>.

Rutz, J. K., Borges, C. D., Zambiazzi, R. C., Rosa, C. G., & Silva, M. M. (2016). Elaboration of microparticles of carotenoids from natural and synthetic sources for applications in food. *Food Chemistry*, 202, 324–333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.140>.

Rutz, J. K., Borges, C. D., Zambiazzi, R. C., Crizel-Cardozo, M. M., Kuck, L. S., & Noreña, C. P. Z. (2017). Microencapsulation of palm oil by complex coacervation for application in food systems. *Food Chemistry*, 220, 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.194>.

Santhanam, A. K., Lekshmi, M., Chouksey, M. K., Tripathi, G., & Gudipati, V. (2015). Delivery of omega-3 fatty acids into cake through emulsification of fish oil-in-milk and encapsulation by spray drying with added polymers. *Drying Technology*, 33, 83–91. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.934832>.

Serna-Saldivar, S. O., Zorrilla, R., De La Parra, C., Stagnitti, G., & Abril, R. (2006). Effect of dha containing oils and powders on baking performance and quality of white pan bread. *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, 121–129. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0009-5>.

Shen, Z., Apriani, C., Weerakkody, R., Sanguansri, L., & Augustin, M. A. (2011). Food matrix effects on in vitro digestion of microencapsulated tuna oil powder. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 8442–8449. <https://doi.org/10.1021/jf201494b>.

Silva, L. C., Castelo, R. M., Magalhães, H. C. R., Furtado, R. F., Cheng, H. N. & Biswas, A. et al. (2022). Characterization and controlled release of pequi oil microcapsules for yogurt application. *LWT - Food Science and Technology*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113105>.

- Silva, V. L., Leite, B. S.; Jesus, F. E. S., Martins, L. D., Assunção, L. S., Leal, I. L., et al. (2022). Tomato as a natural source of dyes in the food industry: A patent data analysis. *Recent Patents on Nanotechnology*. 10.2174/1872210516666220523114141.
- Singh, H., Kumar, Y. & Meghwal, M. (2022). Encapsulated oil powder: Processing, properties, and applications. *Journal of Food Process Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14047>.
- Solomando, J. C., Antequera, T., & Perez-Palacios, T. (2020a). Lipid digestion and oxidative stability in ω -3-enriched meat model systems: Effect of fish oil microcapsules and processing or culinary cooking. *Food Chemistry*, 328, Article 127125. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127125>.
- Solomando, J. C., Antequera, T., González-Mohíno, A., & Perez-Palacios, T. (2020b). Fish oil/lycopene microcapsules as a source of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids: a case study on spreads. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 1875–1886. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10188>.
- Solomando, J. C., Antequera, T., & Pérez-Palacios, T. (2020c). Study on fish oil microcapsules as neat and added to meat model systems: Enrichment and bioaccessibility of EPA and DHA. *LWT - Food Science and Technology*, 120, Article 108946. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108946>
- Solomando, J. C., Antequera, T., Ventanas, S., & Perez-Palacios, T. (2021). Sensory profile and consumer perception of meat products enriched with EPA and DHA using fish oil microcapsules. *International Journal of Food Science and Technology*, 56, 2926–2937. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14932>.
- Sridhar, K., Sharma, M., Choudhary, A., Dikkala, P. K., & Narsaiah, K. (2021). Fish and garlic oils hybridized microcapsules: Fortification in functional bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e15346. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15346>.
- Srivastava, S., & Mishra, H. N. (2021). Development of microencapsulated vegetable oil powder based cookies and study of its physicochemical properties and storage stability. *LWT - Food Science and Technology*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112364>.
- Stangierski, J., Rezler, R., Kawecki, K., & Peplińska, B. (2020). Effect of microencapsulated fish oil powder on selected quality characteristics of chicken sausages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 2043–2051. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10226>.
- Suwannasang, S., Zhong, Q., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Uttapap, D. & Puttanlek, C. et al. (2022). *LWT - Food Science and Technology*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113375>.
- Taguchi, K., Iwami, K., Ibuki, F., & Kawabata, M. (1992). Oxidative stability of sardine oil embedded in spray-dried egg white powder and its use for n-3 unsaturated fatty acid fortification of cookies. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 56, 560–563. <http://dx.doi.org/10.1271/bbb.56.560>.
- Takeungwongtrakul, S., Benjakul, S., & H-kittikun, A. (2015). Characteristics and oxidative stability of bread fortified with encapsulated shrimp oil. *Italian Journal of Food Science*, 27, 476–486. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v380>.

- Takeungwongtrakul, S., & Benjakul, S. (2017). Biscuits fortified with micro-encapsulated shrimp oil: characteristics and storage stability. *Journal of Food Science and Technology*, *54*, 1126–1136. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2545-4>.
- Tamjidi, F., Nasirpour, A., & Shahedi, M. (2011). Physicochemical and sensory properties of yogurt enriched with microencapsulated fish oil. *Food Science and Technology International*, *18*, 381–390. <https://doi.org/10.1177/1082013211428212>.
- Trilaksani, W., Riyanto, B., & Syifa, A. L. (2020). Extraction and microencapsulation of tuna virgin fish oil with mangrove fruit extract fortified into extrusion cereals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *420*, Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/420/1/012032>.
- Ullah, R., Nadeem, M., Imran, M., Khan, M. K., Mushtaq, Z., Asif, M., et al. (2020). Effect of microcapsules of chia oil on Ω -3 fatty acids, antioxidant characteristics and oxidative stability of butter. *Lipids in Health and Disease*, *19*. <https://doi.org/10.1186/s12944-020-1190-5>.
- Umesha, S. S., Manohar, R. S., Indiramma, A. R., Akshitha, S., & Naidu, K. A. (2015). Enrichment of biscuits with microencapsulated omega-3 fatty acid (Alpha-linolenic acid) rich Garden cress (*Lepidium sativum*) seed oil: Physical, sensory and storage quality characteristics of biscuits. *LWT - Food Science and Technology*, *62*, Article 654e661. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.018>.
- Vasile, F. E., Judis, M. A., & Mazzobre, M. F. (2018). Impact of *Prosopis alba* exudate gum on sorption properties and physical stability of fish oil alginate beads prepared by ionic gelation. *Food Chemistry*, *250*, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.018>.
- Venugopalan, V. K., Gopakumar, L. R., Kumaran, A. K., Chatterjee, N. S., Soman, V., Peeralil, S., et al. (2021). Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. *Foods*, *10*, Article 1566. <https://doi.org/10.3390/foods10071566>.
- Wallace, J. M. W., McCabe, A. J., Robson, P. J., Keogh, M. K., Murray, C. A., Kelly, P. M., et al. (2000). Bioavailability of n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) in foods enriched with microencapsulated fish oil. *Annals of Nutrition and Metabolism*, *44*, 157–162. <https://doi.org/10.1159/000012839>.
- Yep, Y. L., Li, D., Mann, N. J., Bode, O., & Sinclair, A. J. (2002). Bread enriched with microencapsulated tuna oil increases plasma docosahexaenoic acid and total omega-3 fatty acids in humans. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, *11*, 285–291. <https://doi.org/10.1046/j.1440-6047.2002.00309.x>.
- Yue, A., Marsh, L., Zhou, H., Medina, A., Luo, R., Shi, Y., et al. (2016). Nutritional deficiencies, the absence of information and caregiver shortcomings: A qualitative analysis of infant feeding practices in rural China. *PLOS ONE*, *11*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153385>.

Capítulo IV

Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte II: alimentos utilizados, efeitos na composição nutricional, estudos de estabilidade, de metabólicos e de citotoxicidade

Microencapsulamento de óleos como oportunidade para produção de alimentos fortificados. Parte II: alimentos utilizados, efeitos na composição nutricional, estudos de estabilidade, de metabólicos e de citotoxicidade

Tayane de Jesus Freitas¹, Itaciara Larroza Nunes², Ronald Bruce Pegg³, Deborah Murowaniecki Otero^{1,4}, Camila Duarte Ferreira Ribeiro^{1,4}

¹Faculdade de Farmácia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

²Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

³Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Ciências Agrícolas e Ambientais, Universidade da Geórgia, Estados Unidos

⁴Escola de Nutrição, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

<p><i>Periódico a ser submetido (1ª Trends in Food Science and Technology (ISSN: submissão): 0924-2244)</i></p>

<p><i>Maior percentil (Scopus): 99% (Qualis CAPES: A1)</i></p>
--

***Autor correspondente:** Camila Duarte Ferreira Ribeiro (Av. Araújo Pinho - nº 32 – Canela, Cep: 40.110-150 - Salvador - BA – Brasil. Tel/Fax: ++55-71-99132-0655. E-mail: camiladuarte@ufba.br).

Resumo

Fundamentação: A carência de nutrientes atinge bilhões de pessoas pelo mundo e a fortificação de alimentos vem se tornando uma alternativa para melhorar a composição nutricional destes e minimizar os índices de deficiência. Igualmente, a população tem buscado alimentos nutricionalmente melhores para compor os seus cardápios. Os óleos comestíveis, por serem ricos em compostos bioativos, têm sido utilizados para o enriquecimento dos alimentos. Mas, devido à sua sensibilidade à oxidação e instabilidade dos seus componentes, a técnica de microencapsulamento está sendo aplicada para promover proteção a esses óleos e facilitar a sua incorporação nas matrizes alimentícias.

Escopo e abordagem: Esta revisão, conduzida a partir da busca de estudos realizada em dez bases científicas, descreve os principais alimentos fortificados ou enriquecidos, os efeitos dos óleos microencapsulados na composição nutricional das matrizes alimentícias, a estabilidade físico-química, microbiológica e sensorial destes alimentos fortificados e a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes óleos.

Principais resultados e conclusão: Produtos de panificação e confeitaria (ex.: pães), produtos cárneos (ex.: salsichas) e laticínios (ex.: iogurtes) foram os grupos alimentícios usados com maior frequência, 42,86, 25,71 e 24,28% dos estudos, respectivamente, para enriquecimento com os óleos microencapsulados, mas outros produtos (24,28%), como os alimentos instantâneos, também foram utilizados. Os estudos de estabilidade mostraram que a microencapsulação protege e preserva os óleos e seus compostos bioativos, mantendo a qualidade e características dos alimentos. Dentre os poucos estudos que avaliaram a bioacessibilidade e biodisponibilidade dos óleos, ressaltou-se também a relevância do microencapsulamento na proteção dos componentes dos óleos e, conseqüentemente, promoção de efeitos benéficos à saúde. A partir da análise de co-ocorrência de palavras-chave, identificou-se a necessidade de estudos futuros que avaliem a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes óleos microencapsulados adicionados aos alimentos.

Palavras-chave: enriquecimento, microencapsulação proteção dos óleos, produtos de panificação, biodisponibilidade, análise de co-ocorrência.

1. Introdução

A deficiência de nutrientes é um desafio global importante e calcula-se que 2 bilhões de pessoas sejam deficientes em pelo menos um dos micronutrientes essenciais necessários para o crescimento, desenvolvimento e manutenção da saúde (Ebata et al., 2021). No geral, estima-se que essas deficiências sejam responsáveis por cerca de 7,3% da carga global de doenças, e estas são devidas principalmente à ingestão inadequada de alimentos densos em nutrientes e às perdas de nutrientes devido a dietas inadequadas (Olson et al., 2021).

No combate à carência de nutrientes, a fortificação ou enriquecimento de alimentos, definida como a prática de adicionar vitaminas, minerais e/ou outros componentes aos alimentos comumente consumidos durante o processamento para aumentar seu valor nutricional, é vista como uma estratégia econômica e eficaz para combater deficiências nutricionais e vem sendo aplicada há muito tempo, especialmente em países industrializados (Patel et al., 2022).

Óleos comestíveis, por serem ricos em vitaminas lipossolúveis, ácidos graxos poli-insaturados ômega-3 e outros compostos bioativos, vem sendo utilizados no enriquecimento de diferentes matrizes alimentícias com o propósito de potencializar o valor nutricional dos alimentos e oferecer opções mais saudáveis no mercado (Dellarosa, et al., 2015; Aquilani et al., 2018; Bakry et al., 2019; Kawecki et al., 2021b; Rios-Mera et al., 2021).

Contudo, a adição de óleos nos alimentos apresenta limitações, como sua alta susceptibilidade e seus constituintes à oxidação e o odor e sabor marcantes, que, consequentemente, reduzem a vida de prateleira desses alimentos fortificados e também influenciam nos atributos sensoriais (Jamshidi et al., 2020). Diante disso, a microencapsulação dos óleos comestíveis, com formação de microcápsulas que variam de 1 – 1000 μm , é uma alternativa que tem sido usada para revestir ou aprisionar componentes sensíveis como material central dentro de outro que consiste em uma parede protetora, que protege os materiais do núcleo dos efeitos adversos das condições ambientais (luz, umidade e oxigênio), controla a liberação de ingredientes em um determinado momento e local, mascara sabores ou odores desagradáveis e melhorar a estabilidade oxidativa (Comunian et al., 2016).

Estudos recentes vêm mostrando como o microencapsulamento é eficaz na proteção dos óleos comestíveis e no mascaramento de sabores e odores indesejáveis. Akhtar et al. (2022) compararam pães enriquecidos com óleo de noz livre e microencapsulado e observaram uma variação significativa na estabilidade oxidativa dos óleos durante o período de oito dias de

armazenamento, com o pão fortificado com o óleo livre apresentando um aumento no índice de peróxido de 55,76% em relação aos pães acrescidos das microcápsulas, que apresentaram um aumento de 24,03 a 43,55%. Almôndegas de carne fortificadas com óleo de peixe na forma livre e microencapsulada foram avaliadas sensorialmente ao longo de 16 dias de armazenamento refrigerado e os resultados indicaram que as amostras com adição direta do óleo produziram um odor de peixe significativo e tiveram pontuações mais baixas em todos os atributos sensoriais (cor, odor, sabor, mastigabilidade e aceitabilidade) quando comparada às almôndegas com as microcápsulas (Elsebaie et al., 2022).

Singh et al. (2022), em seu estudo de revisão, trouxe exemplos de óleos comestíveis que são microencapsulados e aplicados em alimentos. Outras revisões foram propostas para avaliar as estratégias de enriquecimento de produtos cárneos (Pérez-Palacios et al., 2019) e de queijo (Villamil et al., 2020) com óleos ricos em ácidos graxos ômega-3, como também para analisar as características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais de iogurtes enriquecidos com microemulsões de óleos ricos em ômega-3. Entretanto, mais estudos são necessários para investigar a estabilidade das matrizes alimentícias fortificadas e o efeito das microcápsulas de óleos adicionadas na composição nutricional dos alimentos, e o presente estudo se propõe a elucidar essas questões e também considerar os aspectos relacionados à absorção, metabolização e toxicidade desses óleos e de seus compostos bioativos.

Por conseguinte, esta revisão tem como objetivo avaliar os alimentos utilizados na fortificação com óleos comestíveis microencapsulados, os efeitos das microcápsulas na composição nutricional destes alimentos enriquecidos, a estabilidade dessas matrizes alimentícias sob as condições de armazenamento e a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes óleos e de seus constituintes.

2. Metodologia

Os artigos sobre o uso de óleos microencapsulados aplicados em alimentos para fins de fortificação/enriquecimento foram pesquisados nas seguintes bases científicas: ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Web of Science, Wiley Online Library, IOPscience, Directory of Open Access Journals, ACS Journals Search, SciELO e Taylor & Francis. Uma busca avançada foi realizada usando as seguintes combinações de descritores: oil* AND microencap* AND food* AND fortifi* OR enrich* OR enhanc*, oil* AND microencap* AND food* AND *toxici*, oil* AND microencap* AND food* AND bioacce*, oil* AND microencap* AND food* AND bioava*. O levantamento de estudos foi conduzido entre os meses de julho e agosto de 2022.

O quantitativo total de artigos encontrados em todas as bases científicas foi equivalente a 14.105, com o maior percentual de estudos (39,91%) na base Wiley Online Library. O software gerenciador de referências EndNote Web foi utilizado para a exclusão de 6.850 artigos em duplicata e, em seguida, a partir da leitura dos títulos dos artigos, foram excluídos mais 7.134 que não estavam em concordância com a temática em estudo. Seguidamente, foram lidos os resumos de 121 artigos, sendo excluídos os estudos que não realizaram a aplicação em alimentos e aqueles que aplicaram as microcápsulas de óleos com outros fins que não a fortificação.

Foram selecionados 83 estudos elegíveis, consistindo em 70 estudos originais e 13 de revisão, e estes foram analisados por meio da análise bibliométrica por meio do software VOSviewer (versão 1.6.18).

Os trabalhos incluídos foram lidos e analisados quanto aos alimentos fortificados, o efeito dos óleos microencapsulados nestes alimentos, a estabilidade físico-química, microbiológica e sensorial desses alimentos enriquecidos, a bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade dos óleos microencapsulados e seus compostos bioativos.

3. Fortificação de alimentos com óleos microencapsulados

3.1. Alimentos fortificados

Os alimentos mais utilizados como matriz alimentícia para a adição das microcápsulas de óleos foram produtos de panificação e confeitaria, produtos cárneos e laticínios (Fig. 1).

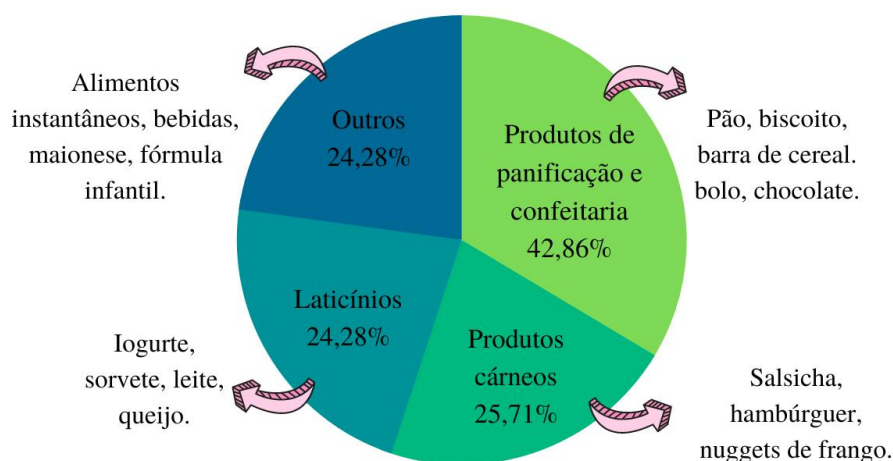


Fig. 1. Alimentos fortificados com óleos comestíveis microencapsulados.

3.1.1. Produtos de panificação e confeitaria

Dentre os produtos de panificação e confeitaria, o pão (43,33%) foi o mais utilizado para aplicação dos óleos microencapsulados. Os pães, biscoitos e bolos apresentam a vantagem de serem alimentos que apresentam um grande alcance populacional, sendo aceitos e consumidos por pessoas de todas as idades, além de possuírem atividade de água relativamente baixa, o que os tornam opções apropriadas para o enriquecimento com óleos comestíveis, principalmente aqueles fonte de ácidos graxos ômega-3. Porém, esses produtos apresentam a desvantagem da exposição a altas temperaturas durante o processamento, o que pode ocasionar em perdas de compostos bioativos (Feizollahi et al., 2018). Além do mais, durante a elaboração das massas de biscoito, a amassadura pode levar ao rompimento das microcápsulas e consequente liberação dos óleos, expondo-os às condições ambientais e, dessa maneira, favorecendo às reações de oxidação (Takeungwongtrakul & Benjakul, 2017).

Em estudo de Beikzadeh et al. (2020), pães foram fortificados com óleo de linhaça livre *versus* óleo de linhaça microencapsulado. As amostras contendo 3,65g de óleo encapsulado em leveduras, para cada 100g de farinha de trigo, demonstraram um maior efeito protetor contra a oxidação do óleo durante e após o processo de cozimento. Isso pode ser comprovado a partir dos índices de peróxido, que, após 7 dias do cozimento, aumentou em 50% no pão enriquecido com as microcápsulas e em 232,14% no pão adicionado de óleo livre. O conteúdo de ácido graxo alfa-linolênico (ALA) após o cozimento também assegura o efeito protetor do microencapsulamento, uma vez que no pão acrescido do óleo de linhaça microencapsulado a perda foi de 38,08% e no pão com óleo livre foi de 294,21%.

Takeungwongtrakul & Benjakul (2017), produziram biscoitos fortificados com microcápsulas de óleo de camarão elaboradas com caseinato de sódio, gelatina de peixe e xarope de glicose como encapsulantes, sendo a fortificação realizada em diferentes níveis (0, 3, 6, 9 e 12 g/100g. O óleo de camarão microencapsulado pode ser incorporado ao biscoito no nível de até 6 g/100g para melhorar o valor nutritivo sem acarretar impacto negativo nas propriedades sensoriais. Além disso, também estudaram o efeito da iluminação (600 lx/cm²) na qualidade do biscoito durante o armazenamento à temperatura ambiente por 12 dias, concluindo que os biscoitos devem ser armazenados no escuro para retardar a oxidação lipídica, já que maior aumento no índice de peróxido foi observado quando os biscoitos foram armazenados sob a luz.

Para o enriquecimento de bolos com óleo de peixe, Santhanam et al. (2015) encapsularam o óleo com diferentes materiais de parede (caseinato de sódio, maltodextrina e

proteína de soja), e constataram que os bolos fortificados com as microcápsulas revestidas por caseinato de sódio apresentaram melhor estabilidade oxidativa, medida através do índice de peróxido e das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), associada à desejáveis características de cor e textura. Esse mesmo bolo exibiu maiores teores de ácidos graxos eicosapentaenoico (EPA) (1,53%) e docosahexaenoico (DHA) (2,32%) e maior aceitabilidade sensorial, quando comparado aos demais.

Sendo assim, a respeito da inclusão de óleos microencapsulados em produtos de panificação e confeitaria, observa-se que é uma prática com bons resultados, visto que foi possível proporcionar melhor proteção aos ácidos graxos poli-insaturados e alcançar boa aceitação sensorial.

3.1.2. *Produtos cárneos*

Salsichas, hambúrgueres e nuggets de frango foram os produtos mais empregados como matriz alimentícia para a fortificação com microcápsulas de óleos comestíveis, representando 38,89, 16,67 e 11,11%, respectivamente, dos estudos que utilizaram produtos cárneos.

Lorenzo et al. (2016) propuseram em seu estudo a reformulação de salsichas a partir da combinação de duas estratégias: substituição parcial (25, 50 ou 75%) da gordura de porco pelas microcápsulas de óleo de peixe e melhoria da composição de ácidos graxos. Foi alcançado 30% de redução no teor de gordura quando 75% da gordura de porco foi substituída. Apesar do aumento da dureza e da mastigabilidade das salsichas, a incorporação de óleo de peixe microencapsulado aumentou o teor de EPA e DHA de 6,7 para 28,1 mg/100g e 15,7 para 85,9 mg/100g, respectivamente, quando são comparadas as salsichas controle (sem óleo) e a com 75% de substituição. Contudo, esse aumento no conteúdo de ácidos graxos insaturados também favoreceu o aumento da oxidação lipídica, medida através dos valores de TBARS, evidenciando a necessidade de uma maior proteção desse óleo de peixe encapsulado.

Em seu estudo, Morsy & Elsabagh (2021) avaliaram a fortificação de hambúrgueres de carne bovina com óleo de peixe na sua forma livre e na forma microencapsulada. Após 15 dias de armazenamento a 4 °C, observou-se que o aumento no valor de TBARS foi maior no hambúrguer acrescido de óleo livre (de 0,10 para 1,26 mg MDA kg⁻¹) quando comparado ao aumento no hambúrguer enriquecido com as microcápsulas (de 0,09 para 0,68 mg MDA kg⁻¹). Quanto às características sensoriais, o hambúrguer com adição direta do óleo foi rejeitado em todos os atributos avaliados (cor, sabor, odor e mastigação) ao final do período de armazenamento, devido odor, sabor e aceitação desagradáveis, enquanto o hambúrguer com o

óleo microencapsulado foi aceito após os 15 dias e obteve pontuações médias que variaram de $5,5 \pm 0,32$ a $5,9 \pm 0,33$. Esses achados mostram que o microencapsulamento é viável para a proteção do óleo de peixe contra a oxidação.

Quanto ao enriquecimento de produtos cárneos com microcápsulas de óleos comestíveis, também pode ser considerada como uma opção adequada para o fornecimento de ácidos graxos ômega-3, pois favoreceu a proteção. No entanto, alguns parâmetros devem ser avaliados cuidadosamente, como o aumento da dureza em salsichas (Stangierski et al., 2020) e hambúrgueres (Rios-Mera et al., 2021), que podem estar relacionados aos materiais de parede empregados no processo de microencapsulamento.

3.1.3. *Laticínios*

Dentre os derivados lácteos, os produtos mais empregados como matriz alimentícia para a fortificação com microcápsulas de óleos comestíveis foram iogurte (52,94%), leite, queijo e sorvete, representando 11,76% dos estudos cada um. Com o objetivo de avaliar o efeito do enriquecimento com óleo de linhaça microencapsulado nas características físico-químicas e sensoriais do iogurte indiano, Goyal et al. (2016) elaboraram iogurtes fortificados com 1, 2 e 3% de microcápsulas. Os resultados mostraram que após o armazenamento por duas semanas, a firmeza do iogurte foi maior na amostra controle do que nas amostras fortificadas, indicando que as microcápsulas podem ter influenciado na textura dos iogurtes. Em relação à estabilidade oxidativa, todas as amostras fortificadas apresentaram índice de peróxido significativamente maior em relação ao controle até o final do armazenamento. O iogurte enriquecido com 2% de microcápsulas apresentou conteúdo de ácido alfa-linolênico cinco vezes maior do que o iogurte controle, indicando boa estabilidade oxidativa do óleo de linhaça.

Gowda et al. (2018), produziram sorvetes fortificados de dois sabores diferentes a partir da substituição parcial da gordura do leite por microcápsulas de óleo de linhaça, nas proporções de 3 e 4%, que foram adicionadas antes ou após a homogeneização. O óleo permaneceu estável à oxidação durante o período de armazenamento de 120 dias sobre a temperatura de -18°C , com o conteúdo de ALA sofrendo uma redução que variou de 30,04 a 33,51% e de 23,06 a 27,21% ao longo do período para o enriquecimento com 3 e 4% de óleo de linhaça microencapsulado, respectivamente. Além disso, a homogeneização influenciou a sensação na boca e o sabor dos sorvetes fortificados, sendo que este efeito foi mais pronunciado nas amostras em que as microcápsulas de óleo de linhaça foram aplicadas antes da

homogeneização, sugerindo que esta etapa promove rompimento das microcápsulas e consequente liberação do óleo.

Leite de búfala fresco foi enriquecido com microcápsulas de óleo de linhaça elaboradas de três diferentes formas: i) com proteína do soro de leite como encapsulante; ii) com proteína do soro de leite como encapsulante + antioxidante; iii) com caseinato de sódio como encapsulante (Goyal et al., 2017). O enriquecimento foi feito em três níveis: 1, 2 e 3 g/100mL. No geral, as pontuações sensoriais mostraram que as amostras de leite fortificado com 1 e 2 g/100 mL de óleo de linhaça microencapsulado foram comparáveis ao controle, sendo, portanto, selecionado o nível de 2 g/100 mL para a fortificação de ALA no leite. Após a avaliação do efeito do armazenamento (6 dias) no teor de ALA, verificou-se redução do teor desse ácido graxo ($p > 0,05$). Ao final do armazenamento, o teor de ALA no leite fortificado ($10,35 \pm 0,20$) foi seis vezes maior do que no leite controle ($1,68 \pm 0,11$), o que indicou que o óleo de linhaça microencapsulado se mostrou estável à pasteurização e armazenamento em um meio aquoso.

Um outro estudo comparou a incorporação de óleo de peixe microencapsulado, na proporção de 1 g/100g de acordo com o rendimento do queijo (10%), em três variedades de queijo (tipo frescal, cheddar e mussarela) (Bermúdez-Aguirre & Barbosa-Cánovas, 2012). A retenção de ômega-3 foi maior nos queijos tipo frescal e cheddar, com valores máximos variando de 8,49 a 8,69 mg/g. Em contrapartida, o queijo mussarela apresentou baixa retenção (2,69 mg/g), que pode ser justificado por apresentar um processamento mais longo e pelas altas temperaturas utilizadas na etapa de estiramento.

Diante do exposto, nos laticínios, a adição de óleos microencapsulados com o objetivo de enriquecimento também pode ser considerada uma alternativa viável para melhorar o valor nutricional, uma vez que preserva e aumenta o fornecimento de ácidos graxos poli-insaturados. Contudo, precauções devem ser tomadas, pois modificações nas características dos produtos podem ocorrer, como redução da firmeza de iogurtes e alteração do sabor de sorvetes em decorrência do rompimento das microcápsulas durante os estágios de processamento. Dessa forma, é importante se estudar a melhor etapa para acrescentar as microcápsulas a fim de minimizar os prejuízos nos atributos sensoriais.

3.1.4. Outros

Outros gêneros alimentícios também enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis foram os alimentos instantâneos (29,41%), bebidas (17,65%), maionese (11,76%),

fórmula infantil, massa seca, molho de tomate, farinha de aveia, pastilha de menta, suplemento proteico e *smoothie* de frutas, representando, cada um destes, 5,88% dos estudos.

Sucos foram utilizados como matriz para a adição de óleo microencapsulado. Suco de romã foi enriquecido com microcápsulas de óleo de peixe nas proporções de 0,04, 0,07 e 0,1% (Habibi et al., 2017). A fortificação aumentou a turbidez dos sucos e, após 42 dias de armazenamento, foi observada sedimentação na amostra com incorporação de 0,1% de microcápsulas. Comparada ao controle, a aceitabilidade sensorial dos sucos fortificados diminuiu, com as amostras enriquecidas com 0,04 e 0,07% sendo ligeiramente apreciadas.

Outro produto alimentício que também vem sendo fortificado é a maionese. Rojas et al. (2019) produziram microcápsulas de óleo de chia, óleo de semente de baru e de semente de abóbora e adicionou cada uma delas em diferentes amostras de maionese, nos níveis de 2,5, 5,0 e 7,5%. A viscosidade das maioneses aumentou devido à presença das microcápsulas, mas a textura não sofreu alteração. A cor foi afetada apenas nas amostras adicionadas de microcápsulas carregadas de óleo de semente de abóbora, provavelmente pelo fato deste óleo apresentar coloração mais escura. Para as maioneses que foram incorporadas com 2,5 e 5,0% de óleos microencapsulados, os testes sensoriais demonstraram que os consumidores não conseguiram diferenciá-las da amostra controle ($p > 0,05$).

3.2. Efeito dos óleos microencapsulados na composição nutricional dos alimentos fortificados

O acréscimo de óleos microencapsulados aos alimentos pode implicar em alterações que podem estar relacionadas ao efeito do óleo ou dos materiais de parede utilizados no microencapsulamento. A textura, cor e sabor são exemplos de aspectos que podem sofrer modificações com a fortificação dos alimentos, sendo que, a depender da matriz alimentícia e do nível de enriquecimento, essas mudanças podem favorecer ou não os atributos sensoriais (Jamshidi et al., 2020). Na Tabela 1 estão apresentadas as quantidades de óleo e de material de parede utilizadas no microencapsulamento, o teor do composto bioativo nas microcápsulas, o alimento fortificado, a quantidade de microcápsulas inseridas no alimento e a composição nutricional do alimento não fortificado e do fortificado.

Tabela 1

Quantidades de óleo e de material de parede utilizadas no microencapsulamento, teor do composto bioativo nas microcápsulas, alimento fortificado, quantidade de microcápsulas inseridas no alimento e composição nutricional do alimento não fortificado e fortificado.

Teor de óleo utilizado na microcápsula	Quantidade de material de parede empregado	Teor do composto bioativo na microcápsula	Alimento fortificado	Quantidade de microcápsula inserida no alimento	Composição nutricional do alimento não fortificado	Composição nutricional do alimento fortificado	Referência
<i>Alimentos sólidos</i>							
10 %	20 % total	1. 37,36 ± 0,50 2. 49,38 ± 0,50	Pão	5 g/100 g de farinha de trigo	NR	1. Umidade: 34,42 ± 0,55 g/100g; Lipídio: 6,65 ± 0,85 g/100g; Proteína: 9,09 ± 0,53 g/100g; Cinzas: 2,18 ± 0,03 g/100g; Carboidrato: 42,80 ± 0,41 g/100g;	Akhtar et al. 2022
	1. 2 % SPI + 18 % MD;	3. 50,11 ± 0,60 4. 48,71 ± 0,35 5. 49,23 ± 0,46					
	2. 2 % SPI + 17,9 % MD + 0,1 % P;					2. Umidade: 35,96 ± 0,51 g/100g;	
	3. 4 % SPI + 15,8 MD + 0,2 % P;					Lipídio: 7,21 ± 0,81 g/100g;	
	4. 6 % SPI + 13,7 % MD + 0,3 % P;						

5. 8 % SPI +
11,6 % MD +
0,4 % P.

Proteína: 13,25 ±
0,91 g/100g;

Cinzas: 2,99 ± 0,12
g/100g;

Carboidrato: 37,81 ±
1,55 g/100g;

3. Umidade: 35,09 ±
0,88 g/100g;

Lipídio: 8,15 ± 0,41
g/100g;

Proteína: 15,21 ±
0,56 g/100g;

Cinzas: 2,40 ± 0,24
g/100g;

Carboidrato: 36,77 ±
0,59 g/100g;

4. Umidade: 35,45 ±
0,05 g/100g;

Lipídio: 6,94 ± 0,23
g/100g;

Proteína: 15,65 ±
1,00 g/100g;

									<p>Cinzas: $1,80 \pm 0,63$ g/100g;</p> <p>Carboidrato: $36,16 \pm 1,08$ g/100g;</p> <p>5. Umidade: $36,01 \pm 0,04$ g/100g;</p> <p>Lipídio: $8,15 \pm 0,39$ g/100g;</p> <p>Proteína: $19,70 \pm 0,65$ g/100g;</p> <p>Cinzas: $3,05 \pm 0,18$ g/100g;</p> <p>Carboidrato: $35,98 \pm 0,22$ g/100g.</p>
NR	NR	NR	Pão	5 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR		Kairam et al. 2021	
-	NR	NR	Pão	5 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR		Sridhar et al. 2021	
10 g	NR	ALA	Pão	<p>1. $3,65$ g/100 g de farinha de trigo;</p> <p>2. $3,83$ g/100 g de farinha de trigo.</p>	NR	NR		Beikzadeh et al. 2020	
		<p>1. $30,46 \pm 1,46$;</p> <p>2. $31,25 \pm 1,89$</p>							

100 g	NR	NR	Pão	1, 2,5 e 5g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	Hasani et al. 2019
NR	NR	NR	Pão	5,2 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	González et al. 2018
NR	NR	NR	Pão	1, 3 e 5 g/100g	NR	NR	Takeungwongtrakul et al. 2015
28 g	112 g	ALA 48,5 ± 0,1%	Pão	6,6 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	Gallardo et al. 2013
NR	NR	NR	Pão	Baixo enriquecimento = 1,63 g/100 g de farinha de trigo;	NR	NR	Serna-Saldivar et al. 2006
NR	NR	NR	Pão	Alto enriquecimento = 3,26 g/100 g de farinha de trigo.	NR	NR	Yep et al. 2002
10 %	10 %	1. 27,44 ± 0,33 %; 2. 26,85 ± 0,26 %; 3. 26,94 ± 0,37 %; 4. 27,14 ± 0,14 %; 5. 27,31 ± 0,21 %	Biscoito e chocolate	1,5 e 3,0 %	NR	NR	Damerou et al. 2022

0,5 g	3,3 g	EPA: $1,63 \pm 0,17$ % DHA: $4,59 \pm 0,19$ %	Biscoito	0, 2,5, 5, 7,5 e 10 g/100g	Umidade: $3,05 \pm 0,02$ g/100g; Lipídio: $2,90 \pm 0,10$ g/100g; Proteína: $12,84 \pm 0,11$ g/100g; Cinzas: $3,23 \pm 0,14$ g/100g; Carboidrato: $77,97 \pm 0,17$ g/100g.	1. 7,5 % p/p Umidade: $2,06 \pm 0,07$ g/100g; Lipídio: $3,51 \pm 0,11$ g/100g; Proteína: $16,39 \pm 0,14$ g/100g; Cinzas: $4,28 \pm 0,06$ g/100g; Carboidrato: $73,77 \pm 0,16$ g/100g.	Gulzar et al. 2022
NR	NR	NR	Biscoito	20, 30, 40, 50 e 60%	NR	NR	Srivastava & Mishra, 2021
NR	NR	NR	Biscoito	3, 6, 9 e 12 g/100g	NR	NR	Takeungwongtrakul & Benjakul, 2017
10 g	1. 20 g 2. 20 g	NR	Biscoito	42,9 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	Jeyakumari et al. 2016
40 g	100 g	NR	Biscoito	20 g/100 g de farinha de trigo	Umidade: $3,3 \pm 0,23$ g/100g; Lipídio: $13,3 \pm 0,40$ g/100g; Proteína: $8,0 \pm 0,17$ g/100g; Cinzas: $1,3 \pm 0,05$ g/100g;	1. Biscoito com óleo de agrião livre Umidade: $2,1 \pm 0,2$ g/100g; Lipídio: $13,3 \pm 0,11$ g/100g; Proteína: $8,2 \pm 0,21$ g/100g;	Umesha et al. 2015

					Carboidrato: 77,1 ± 1,4 g/100g.	Cinzas: 1,4 ± 0,08 g/100g;	
						Carboidrato: 76,9 ± 1,7 g/100g.	
						2. Biscoito com óleo de agrião microencapsulado	
						Umidade: 2,7 ± 0,24 g/100g;	
						Lipídio: 13,4 ± 0,12 g/100g;	
						Proteína: 12,4 ± 0,18 g/100g;	
						Cinzas: 1,7 ± 0,06 g/100g;	
						Carboidrato: 72,3 ± 1,6 g/100g	
NR	NR	NR	Biscoito	20% em relação a farinha de trigo	NR	NR	Taguchi et al. 1992
NR	NR	β-caroteno: 84 ± 0,03 ppm	Cupcake	25,6 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	Nayana et al. 2021
NR	NR	NR	Muffin	95,3 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	Nasrin & Anal, 2015

NR	NR	NR	Bolo	-	NR	NR	Santhanam et al. 2015
NR	NR	NR	Salsicha	11,9 g/kg de massa	Umidade: $67,2 \pm 0,6\%$; Lipídio: $11,5 \pm 0,3\%$; Proteína: $18,8 \pm 0,4\%$; Cinzas: $2,4 \pm 0,0\%$.	Umidade: $66,6 \pm 0,6\%$; Lipídio: $11,7 \pm 0,3\%$; Proteína: $19,1 \pm 0,4\%$; Cinzas: $2,4 \pm 0,0\%$.	Kawecki et al. 2021a
NR	NR	NR	Salsicha	11,9 g/kg de massa	Umidade: $67,1 \pm 0,5\%$; Lipídio: $11,8 \pm 0,3\%$; Proteína: $18,5 \pm 0,3\%$; Cinzas: $2,5 \pm 0,1\%$.	Umidade: $65,4 \pm 0,6\%$; Lipídio: $12,0 \pm 0,2\%$; Proteína: $19,8 \pm 0,4\%$; Cinzas: $2,7 \pm 0,2\%$.	Kawecki et al. 2021b
NR	NR	NR	Salsicha	11,9 g/kg de massa	Umidade: $67,4 \pm 0,7\%$; Lipídio: $10,2 \pm 0,5\%$; Proteína: $17,8 \pm 0,3\%$; Cinzas: $1,9 \pm 0,1\%$.	Umidade: $66,2 \pm 0,6\%$; Lipídio: $11,0 \pm 0,6\%$; Proteína: $18,3 \pm 0,4\%$; Cinzas: $1,9 \pm 0,1\%$.	Kawecki et al. 2021c
10 kg	30 kg	NR	Salsicha	M25: 50 g/kg de massa;	Umidade: 40,76%; Lipídio: 22,48%;	M25: Umidade: 33,95%;	Lorenzo et al. 2016

M50: 100 g/kg de massa;	Proteína: 24,66%;	Lipídio: 20,10%;
	Cinzas: 3,62%;	Proteína: 25,19%;
M75: 150 g/kg de massa.	Carboidrato: 8,48%.	Cinzas: 4,61%;
		Carboidrato: 12,15%;
		M50:
		Umidade: 30,26%;
		Lipídio: 19,50%;
		Proteína: 27,40%;
		Cinzas: 5,46%;
		Carboidrato: 15,38%;
		M75:
		Umidade: 28,02%;
		Lipídio: 15,62%;
		Proteína: 28,74%;
		Cinzas: 6,17%;
		Carboidrato: 21,45%.

NR	NR	NR	Salsicha cozida e salsicha curada	1. 27,5 g/kg de massa; 2. 52,6 g/kg de massa.	NR	NR	Solomando et al. 2021
NR	NR	NR	Salsicha	11,9 g/kg de massa	Umidade: 676 ± 5 g/kg; Lipídio: 116 ± 3 g/kg; Proteína: 179 ± 3 g/kg; Cinzas: 26 ± 1 g/kg.	1. Óleo livre: Umidade: 674 ± 6 g/kg; Lipídio: 118 ± 4 g/kg; Proteína: 182 ± 5 g/kg; Cinzas: 25 ± 2 g/kg; 2. Óleo microencapsulado: Umidade: 668 ± 6 g/kg; Lipídio: 111 ± 4 g/kg; Proteína: 189 ± 4 g/kg; Cinzas: 26 ± 1 g/kg.	Stangierski et al. 2020
NR	NR	NR	Hambúrguer bovino	NR	NR	NR	Morsy & Elsabagh 2021

10%	NR	NR	Hambúrguer	2,5%	NR	NR	Rios-Mera et al. 2021
20 g	122 g	NR	Hambúrguer suíno	46,8 g/kg de massa	Hambúrguer fresco: Umidade: 58,44%; Lipídio: 14,11%; Proteína: 22,09%;	Hambúrguer fresco: Umidade: 57,33%; Lipídio: 13,05%; Proteína: 20,74%;	Aquilani et al. 2018
					Hambúrguer cozido: Umidade: 56,59%; Lipídio: 13,65%; Proteína: 22,00%.	Hambúrguer cozido: Umidade: 54,47%; Lipídio: 12,44%; Proteína: 20,25%.	
NR	5,15 g	NR	Almôndegas de carne	NR	NR	NR	Elsebaie et al. 2022
20 g	600 g	NR	Nuggets de frango	5 g/100g	NR	NR	Pérez-Palacios et al. 2018
10 %	NR	NR	Nuggets de frango	5 % p/p	NR	NR	Jiménez-Martin et al. 2016
NR	NR	NR	Sistema modelo de carne	1. 30 g/kg de massa; 2. 50 g/kg de massa.	NR	NR	Solomando et al. 2020a
20 g	NR	NR	Presunto curado e creme de queijo	1. 20 g/kg de massa; 2. 25 g/kg de massa.	NR	NR	Solomando et al. 2020b

NR	NR	NR	Sistema modelo de carne	1. 30 g/kg de massa; 2. 50 g/kg de massa.	NR	NR	Solomando et al. 2020c
NR	NR	EPA/DHA 9,2 g/100 g de microcápsulas	Bolinho de peixe	NR	NR	NR	Dellarosa et al. 2015
		EPA/DHA 180 mg/1 g de microcápsulas.	Patê de peixe	NR	NR	NR	Nielsen & Jacobsen, 2011
NR	NR	NR	Sorvete	3, 4 e 5%	NR	NR	Gowda et al. 2018
NR	NR	NR	Sorvete	15 g/kg de sorvete	NR	NR	Andajani et al. 2016
NR	NR	NR	Queijo	1,5 g/100g	NR	NR	Farbod et al. 2015
NR	NR	NR	Queijo fresco, cheddar e mussarela	1% g/100g	NR	NR	Bermúdez-Aguirre & Barbosa-Cánovas, 2012
NR	NR	ALA 66,72 ± 0,81	Manteiga	2, 4, 6 e 8%	NR	NR	Ullah et al. 2020
5% p/p	NR	NR	Maionese	58,5 g	NR	NR	Rahmani-Manglano et al. 2020
8,5 g	16,75 g	ALA 1. 0,29 g/g de microcápsula; 2. 0,18 g/g de microcápsula;	Maionese	2,5, 5,0 e 7,5 g/100g	NR	NR	Rojas et al. 2019

		3. 0,12 g/g de microcápsula.					
NR	NR	NR	Sopa de creme de cogumelos instantânea	1. 3,00%; 2. 3,30%; 3. 3,60%.	Umidade: $4,69 \pm 0,31\%$; Lipídio: $1,60 \pm 0,17\%$; Proteína: $1,04 \pm 0,04\%$; Cinzas: $5,72 \pm 0,50\%$; Carboidrato: $85,72 \pm 0,39\%$.	1. Umidade: $3,16 \pm 0,15\%$; Lipídio: $3,18 \pm 0,05\%$; Proteína: $1,35 \pm 0,22\%$; Cinzas: $5,89 \pm 0,07\%$; Carboidrato: $86,60 \pm 0,31\%$;	Hastarini et al. 2019
						2. Umidade: $3,18 \pm 0,05\%$; Lipídio: $3,22 \pm 0,20\%$; Proteína: $1,21 \pm 0,01\%$; Cinzas: $5,79 \pm 0,19\%$; Carboidrato: $86,84 \pm 0,08\%$;	

						3.	
						Umidade: 3,69 ± 0,67%;	
						Lipídio: 3,34 ± 0,11%;	
						Proteína: 1,10 ± 0,01%;	
						Cinzas: 5,80 ± 0,57%;	
						Carboidrato: 86,87 ± 0,32%.	
NR	NR	NR	Sopa instantânea	1. 3,00%	Umidade: 4,52 ± 0,03%;	1.	Pramestia et al. 2015
				2. 3,30%	Lipídio: 19,71 ± 0,01%;	Umidade: 3,71 ± 0,01%;	
				3. 3,60%	Proteína: 13,92 ± 0,02%;	Lipídio: 19,90 ± 0,03%;	
					Cinzas: 3,61 ± 0,01%;	Proteína: 14,04 ± 0,00%;	
					Carboidrato: 62,90 ± 0,20%.	Cinzas: 4,67 ± 0,01%;	
						Carboidrato: 61,51 ± 0,20%;	
						2.	

						Umidade: 3,75 ± 0,00%;	
						Lipídio: 19,96 ± 0,01%;	
						Proteína: 14,02 ± 0,00%;	
						Cinzas: 4,89 ± 0,02%;	
						Carboidrato: 61,12 ± 0,04%;	
						3.	
						Umidade: 3,79 ± 0,01%;	
						Lipídio: 20,40 ± 0,03%;	
						Proteína: 14,00 ± 0,00%;	
						Cinzas: 5,46 ± 0,04%;	
						Carboidrato: 60,00 ± 0,10%.	
14%	30%	ALA 34,97%	Sopa de milho em pó	14%	NR	NR	Rubilar et al. 2012

20%	NR	NR	Drágea de chocolate e barra de cereal	-	NR	NR	Fadini et al. 2021
NR	NR	NR	Barras energéticas	8%	NR	NR	Nielsen & Jacobsen, 2009
NR	NR	ALA 0,20g/1 g de microcápsula	Massa seca	5,85 g/100 g de farinha de trigo	NR	NR	González et al. 2021
1. 10 g 2. 20 g	40 g		Extrato de amêndoa em pó	1. 2 g/100 g 2. 4 g/100 g	Umidade: 7,35 ± 0,09 g/100g; Lipídio: 2,27 ± 0,15 g/100g; Proteína: 4,43 ± 0,15 g/100g; Cinzas: 6,84 ± 0,63 g/100g; Carboidrato: 86,47 ± 0,22 g/100g.	1. Umidade: 7,12 ± 0,08 g/100g; Lipídio: 16,21 ± 1,44 g/100g; Proteína: 3,72 ± 0,08 g/100g; Cinzas: 5,46 ± 0,65 g/100g; Carboidrato: 74,61 ± 2,01 g/100g. 2. Umidade: 6,56 ± 0,07 g/100g; Lipídio: 27,08 ± 3,03 g/100g; Proteína: 3,26 ± 0,08 g/100g;	Bueno et al. 2022

						Cinzas: 4,49 ± 0,64 g/100g;		
						Carboidrato: 65,17 ± 3,73 g/100g		
NR	NR	DHA 1. 116 mg/1 g de microcápsula 2. 70 mg/1 g de microcápsula	Fórmula infantil	1. 2,2 g/32,8 g da fórmula infantil; 2. 3,3 g/31,7 g da fórmula infantil. Peso total do sachê: 35 g	NR	NR	Fard et al. 2020	
8,5 g	16,75 g	NR	Suplemento de proteína de soro de leite	2,5, 5,0 e 7,5 g/100g	NR	NR	Rojas et al. 2020	
10%	20%	EPA/DHA 29,88%	Cereal matinal	6%	NR	NR	Trilaksani et al. 2020	
NR	NR	EPA/DHA 100 g/kg de microcápsulas	Pastilha de menta	5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 g/kg de mistura	NR	NR	Kolanowski & Weißbrodt 2008	
<i>Alimentos líquidos</i>								
6%	NR	NR	Leite para produção de iogurte	11 mL de emulsão/100 mL de leite	NR	NR	Bakry et al. 2019	
NR	NR	NR	Leite	2 g/100 mL	NR	NR	Goyal et al. 2017	

2 g	NR	NR	Iogurte	1% (p/v)	NR	NR	Silva et al. 2022
2 g	NR	NR	Iogurte	1 g/100 g	NR	NR	Suwannasang et al. 2022
6,25 g	18,75 g	Timoquinona 7,8 mg/2 g de microcápsulas	Iogurte	2%	NR	NR	Abedi et al. 2016
NR	NR	NR	Iogurte	2%	NR	NR	Goyal et al. 2016
7%	33%	NR	Iogurte	2 g/100 mL de leite	NR	NR	Estrada et al. 2011
18,7 g	NR	NR	Iogurte	0,8 g	NR	NR	Tamjidi et al. 2011
NR	200 g	NR	Suco de romã	0,04, 0,07 e 0,1%	NR	NR	Habibi et al. 2017
<i>Alimentos sólidos + líquidos</i>							
100 mg	500 mg	NR	Iogurte e pão	1 g/100 mL de leite;	NR	NR	Rutz et al. 2017
				0,71 g/100 g de farinha de trigo.			
100 mg	500 mg	NR	Iogurte e pão	1. 1 g/100 mL de leite;	NR	NR	Rutz et al. 2016
				2. 0,5 g/100 mL de leite.			
				1. 0,71 g/100 g de farinha de trigo;			

				2. 0,36 g/100 g de farinha de trigo.			
25%	75%	NR	Barra de cereal Iogurte Suco de laranja	0,8 g	NR	NR	Shen et al. 2011
NR	NR	NR	Smoothie de frutas vermelhas Molho de tomate Farinha de aveia	25g 5g 5g	NR	NR	Martin et al. 2008
NR	NR	EPA/DHA 9 g/100 g de microcápsulas	Alimentos instantâneos	NR	NR	NR	Kolanowski et al. 2007
NR	NR	-	Pão, biscoito e sopa	NR	NR	NR	Wallace et al. 2000

SPI: proteína isolada de soja; MD: maltodextrina; P: pectina; NR: Não reportado.

A porcentagem de adição ou concentração das microcápsulas adicionada ao alimento para fins de fortificação depende do tipo de matriz alimentícia. De acordo com a Portaria SVS/MS nº 31, de 13 de janeiro de 1998 (Brasil, 1998), alimentos enriquecidos ou fortificados são aqueles que, em 100 ml ou 100 g de produto pronto para o consumo, forneçam no mínimo 15% da ingestão diária recomendada (IDR), no caso de líquidos, e 30% da IDR, no caso de sólidos. A *Food and Drug Administration* (FDA) (2013) recomenda que para um alimento apresentar a alegação de “fortificado”, “enriquecido” ou “adicionado” na rotulagem, este deve conter 10% ou mais da IDR.

A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (2010) e a *European Food Safety Authority* (EFSA) (2017), estabeleceram recomendação dietética para a ingestão diária de ácidos graxos ômega-3, que é de 0,25 g de EPA + DHA por pessoa/dia. Também sugerem uma ingestão diária de ALA de aproximadamente 0,5% da energia diária total, que, considerando uma dieta de 2.000 kcal/dia, a recomendação seria de aproximadamente 1 g de ALA por pessoa/dia.

González et al. (2021) elaboraram uma massa seca com a adição de 5,85 g de microcápsulas de óleo de chia, para cada 100 g de farinha de trigo, em que cada 1 g dessas microcápsulas continha 0,20 g de ALA. Pastilhas de menta também foram elaboradas com a adição de microcápsulas de óleo de peixe nas seguintes quantidades: 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 g para cada kg de mistura. Em ambos os estudos os alimentos formulados podem ser considerados fortificados em ácidos graxos ômega-3, uma vez que atendeu ao fornecimento mínimo de 30% da ingestão diária recomendada. No caso da pastilha, no nível mais baixo de fortificação, a porção mínima de pastilhas a ser consumida no dia para alcançar a IDR é de 150 g.

A EFSA (2017) também recomenda que bebês e crianças pequenas (<24 meses) consumam 100 mg de DHA por dia. Baseado nisso, Fard et al (2020) produziram fórmulas infantis (sachê de 35 g) acrescidas de 2,2 e 3,3 g de microcápsulas de óleo de peixe contendo 255,2 e 231 mg de DHA, respectivamente. De acordo com a IDR para crianças de até 24 meses, a porção de 35 g das fórmulas infantis elaboradas no estudo podem ser classificadas como fortificadas em DHA, visto que atende aos requisitos de fornecimento mínimo de 30% da recomendação de ingestão diária.

Nos estudos de Kolanowski et al. 2007, Nielsen & Jacobsen, (2011) e Dellarosa et al. (2015) e os pesquisadores não especificaram a quantidade de óleo microencapsulado acrescido nos alimentos produzidos, mas, de acordo com o teor de EPA e DHA, foi possível estimar a

porção necessária de microcápsulas para alcançar o fornecimento mínimo de 30% da ingestão diária recomendada desses ácidos graxos ômega-3 e poderem ser denominados de enriquecidos. No primeiro estudo, seria necessária a adição de no mínimo 0,42 e 0,83 g de microcápsulas de óleo de peixe para cada 100 g ou 100 ml de alimentos, respectivamente. Já no segundo estudo, necessitaria do acréscimo de 0,42 g de microcápsulas de óleo de peixe para cada 100 g de patê, enquanto no estudo mais recente, a quantidade necessária seria de 0,81 g de óleo de peixe microencapsulado para cada 100 g de bolinho de peixe.

Outro aspecto que pode passar por modificações após a fortificação é a composição nutricional dos alimentos, principalmente em termos dos teores de macronutrientes (Jamshidi et al., 2020).

Umesha et al. (2015) elaboraram biscoitos enriquecidos com microcápsulas de óleo de agrião, que foram produzidas utilizando proteína do soro de leite concentrada como material encapsulante. O teor de proteína dos biscoitos acrescidos com o óleo microencapsulado foi 12,4g/100g, representando um aumento de 55% em relação ao biscoito controle (sem óleo), demonstrando que o material de parede utilizado contribuiu para o aumento do perfil proteico dos biscoitos, além de melhorar o fornecimento de aminoácidos essenciais. O teor de cinzas nos biscoitos enriquecidos com as microcápsulas de óleo de agrião foi 30,77% ($p < 0,05$) maior quando comparado ao biscoito controle, uma vez que, por conter alto teor de cálcio e fósforo, a proteína do soro de leite concentrada pode ter provocado este aumento. Já o teor de carboidrato sofreu redução de 6,64% nos biscoitos fortificados, que pode ser em decorrência da substituição de 20g/100g de farinha de trigo pelas microcápsulas. Dessa forma, os biscoitos elaborados a partir da adição do óleo de agrião encapsulado foram nutricionalmente superiores em termos de proteína.

Biscoitos foram fortificados com 7,5 g/100g de microcápsulas de óleo de camarão + óleo de semente de *Camellia oleifera* elaboradas com alginato de sódio e proteína isolada de feijão mungo como materiais de parede (Gulzar et al., 2022). Em relação ao biscoito controle (sem óleo) os teores de lipídio, proteína e cinzas dos biscoitos enriquecidos aumentaram em 21,03, 27,65 e 32,51%, sugerindo que esses incrementos estejam relacionados aos encapsulantes e óleos utilizados. Já o teor de carboidrato reduziu de $77,97 \pm 0,17$ para $73,77 \pm 0,16$ g/100g.

Bueno et al. (2022) produziram extrato de amêndoa em pó enriquecido com óleo de linhaça microencapsulado em maltodextrina, sendo acrescentadas diferentes quantidades: 2 g/100g de microcápsulas contendo 10 g de óleo e 4 g/100g de microcápsulas contendo 20 g de

óleo. Como esperado, o teor de lipídio foi 7 e 12 vezes maior, em relação ao controle (sem óleo), no primeiro e no segundo nível de fortificação, respectivamente. Em relação ao carboidrato, mesmo com a adição das microcápsulas elaboradas com maltodextrina, o teor diminuiu em 15,90 e 32,68% de acordo com o aumento do óleo microencapsulado adicionado.

Outro estudo que avaliou o efeito das microcápsulas adicionadas em sopa cremosa instantânea foi o de Hastarini et al. (2019), em que produziram óleo de peixe microencapsulado com maltodextrina, pela técnica de *spray drying*, para o enriquecimento da sopa nos níveis de 3,00, 3,30 e 3,60%. O teor de proteína das sopas fortificadas sofreu um aumento que variou de 5,77 a 29,81% em relação à sopa controle (sem óleo), sendo que o maior incremento foi na sopa com adição de 3,00% de microcápsulas de óleo de peixe e o menor na sopa com acréscimo de 3,60%. O teor de proteína é influenciado pela relação entre os componentes químicos, como o aumento dos teores de cinzas, devido à contribuição do teor de cinzas da maltodextrina usada como material de revestimento, de água e de lipídio, em decorrência do óleo encapsulado adicionado.

Stangierski et al. (2020) fortificaram salsichas com microcápsulas de óleo de peixe que foram produzidas com gelatina de porco como agente encapsulante. Um maior teor de proteínas foi encontrado nas amostras incorporadas com o óleo microencapsulado, que pode ter sido influenciada pelo fato de o óleo de peixe ter sido microencapsulado em gelatina suína.

Os nutrientes que não foram destacados nos trabalhos anteriores não sofreram modificação significativa após a adição dos óleos microencapsulados.

Em alguns estudos os pesquisadores vêm optando por substituir o óleo ou gordura utilizada na formulação original do alimento pelas microcápsulas de óleos comestíveis com o objetivo de interferir minimamente na composição do alimento, como Nayana et al. (2021) que elaboraram *cupcakes* acrescidos de microcápsulas de oleína de palma combinada com óleo de linhaça em substituição à manteiga, e Lorenzo et al. (2016) que propuseram a substituição parcial da gordura de porco das salsichas pelas microcápsulas de óleo de peixe.

No geral, comparando-se as matrizes alimentícias não fortificadas e as enriquecidas com os óleos microencapsulados houve um aumento no percentual de cinzas, especialmente em decorrência dos minerais presentes nos materiais de parede das microcápsulas; no teor de lipídios, por conta dos óleos adicionados; e no teor de proteínas, sobretudo naqueles casos em que o óleo comestível foi microencapsulado utilizando um agente encapsulante proteico. Quanto ao teor de umidade, todos os estudos que avaliaram, verificaram uma redução. Em relação ao teor de carboidratos, os estudos demonstraram uma redução, que variou de 2,26 a

32,68%, ou nenhum efeito significativo, mesmo quando o material de parede utilizado no microencapsulamento foi um carboidrato.

Diante desses resultados apontados pode-se inferir que os constituintes das microcápsulas aplicadas nas matrizes alimentícias poderão influenciar na composição nutricional dos alimentos, servindo também como uma estratégia para as indústrias alimentícias melhorarem a composição desses alimentos fortificados, como o teor de proteínas, por exemplo.

3.3. Estabilidade dos alimentos fortificados

Entre os estudos analisados, 57,14% avaliaram a estabilidade dos alimentos fortificados, sendo utilizados testes em relação ao período e a temperatura de armazenamento, tipo de embalagem ou armazenamento (permeável ao ar, à vácuo, atmosfera modificada ou não), condições de iluminação do ambiente (luz ou escuro), cozimento (fresco ou cozido) e umidade relativa. Nesses testes foram incluídas análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais que foram aplicadas às matrizes alimentícias armazenadas sob condições específicas. Para avaliar as características dos alimentos produzidos, 50,0% dos estudos adotaram análises físico-químicas e sensoriais de forma combinada.

Na Tabela 2 a seguir estão apresentadas as principais características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais dos alimentos fortificados com óleos microencapsulados e submetidos à avaliação de sua estabilidade ao longo do período e condições de armazenamento.

Tabela 2

Condições de armazenamento e principais características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais dos alimentos fortificados com óleos microencapsulados.

Alimento fortificado	Óleo microencapsulado adicionado	Condições de armazenamento	Principais características			Referência
			Físico-químicas	Microbiológicas	Sensoriais	
Pão	Óleo de noz	25 °C por 8 dias	Índice de peróxido (IP), valor de p-anisidina (p-AnV) e índice de acidez (IA) de pães incorporados com óleo de noz microencapsulado foram menores ($p < 0,05$) durante o período de armazenamento em comparação com o controle (óleo livre).	NA	NA	Akhtar et al. 2022
Pão	Óleo de linhaça + óleo de alho	Temperatura ambiente por 7 dias	Valores de TBARS aumentaram e foram diferentes ($p < 0,05$) para todas as amostras, sendo que esse aumento foi maior no pão fortificado, quando comparado ao controle (sem óleo). As tendências de mudanças nos atributos texturais do pão fortificado com as microcápsulas foram semelhantes às do pão controle.	NA	Após os 7 dias, o pão enriquecido obteve pontuação menor ($p < 0,001$) de sabor e aceitabilidade geral ($6,65 \pm 0,96$ e $6,47 \pm 1,04$) quando comparado ao controle ($7,10 \pm 1,37$ e $7,65 \pm 0,85$). Com relação à intenção de compra, o pão fortificado obteve boa pontuação ($> 4,0$).	Kairam et al. 2021
Pão	1. Óleo de peixe (OP) 2. Óleo de alho (OA) 3. Óleo de peixe + óleo de alho	4 ± 1 °C por até 8 dias	Ao final do período de armazenamento, os valores de TBARS foram maiores ($p < 0,05$) nos pães fortificados com 1. óleo de peixe e 3. óleo de peixe + óleo de alho, enquanto não foi observada diferença ($p > 0,05$) entre os pães acrescidos de 2. óleo de alho e	NA	O pão fortificado com 1. óleo de peixe apresentou pontuações sensoriais semelhantes ($p > 0,05$) para aparência, cor e textura em comparação ao pão controle, enquanto pontuaram mais baixo ($p < 0,05$) para aroma,	Sridhar et al. 2021

			controle (sem óleo). Os pães fortificados apresentaram alta similaridade com o pão controle no perfil de textura avaliado.		sabor e aceitabilidade geral. Não houve diferença ($p > 0,05$) relatada no perfil sensorial do pão controle <i>versus</i> pães fortificados com 2. óleo de alho e 3. óleo de peixe + óleo de alho.	
Pão	Óleo de linhaça	7 dias	Após o período de armazenamento, o IP aumentou em 50,0 e 76,92% nos pães enriquecidos com as diferentes microcápsulas, enquanto o aumento no pão acrescido de óleo livre foi de 232,14%. A maior firmeza foi encontrada nos pães adicionados de óleo de linhaça microencapsulado.	NA	Pães enriquecidos com as microcápsulas com beta-glucano e leveduras apresentaram pontuação para maciez ($3 \pm 0,59$ e $3,5 \pm 0,61$, respectivamente) mais baixa ($p < 0,05$) quando comparados ao pão acrescido de óleo livre ($4,1 \pm 0,72$) e ao pão controle ($4,5 \pm 0,86$). Quanto ao sabor, as notas para os pães controle, com beta-glucano e leveduras foram $4,25 \pm 0,81$, $4,1 \pm 0,64$ e $4,15 \pm 0,54$, respectivamente ($p > 0,05$).	Beikzadeh et al. 2020
Pão	Óleo de chia	14 dias	O IP nas amostras de pão controle (sem óleo) reduziu após o período de armazenamento, em relação ao controle, enquanto o IP do pão com as microcápsulas aumentou 6,17 vezes e o do pão adicionado de óleo livre aumentou 21,0 vezes. A adição de óleo microencapsulado não modificou o perfil de textura dos pães em comparação com o pão controle.	NA	NA	González et al. 2018

Pão	Óleo de palma refinado	Temperatura ambiente, no escuro, por 9 dias	Os pães contendo as microcápsulas quitosana/tripolifosfato de sódio liberaram mais carotenoides (60%) após o período de armazenamento do que os pães com microcápsulas quitosana/carboximetilcelulose (30%).	NA	NA	Rutz et al. 2016
Pão	Óleo de camarão	Temperatura ambiente por 3 dias	A incorporação de óleo de camarão microencapsulado resultou no aumento do volume do pão ($p < 0,05$) e provocou impacto direto no perfil de textura, dependendo da quantidade de microcápsulas incorporadas.	NA	Após o período de armazenamento, não foram observadas diferenças em todos os atributos entre todas as amostras de pão ($p > 0,05$). No entanto, a cor do miolo ($5,43 \pm 1,07$), o odor ($5,16 \pm 0,94$) e semelhança geral ($5,36 \pm 0,99$) do pão adicionado com 5% de microcápsulas foram menores do que outros ($p < 0,05$).	Takeungwongtrakul et al. 2015
Pão	Óleo de alga	Temperatura ambiente por 14 dias	O pão apresentou valores de firmeza pelo menos três vezes maiores que a média após um dia de armazenamento.	NA	O pão acrescido das microcápsulas teve textura semelhante ($p > 0,05$) ao longo do armazenamento quando comparado com o pão controle (sem óleo), com 2,08 e 1,44 como notas no 14º dia. Em relação à aceitabilidade geral, ao final do período de armazenamento os pães acrescidos das microcápsulas apresentaram maior nota (2,00) em comparação ao controle (1,28) ($p < 0,05$).	Serna-Saldivar et al. 2006

Biscoito	Óleo de peixe	Temperatura ambiente por 6 meses	O biscoito controle foi o menos oxidado. As amostras contendo as microcápsulas com proteína concentrada de soro do leite foram mais estáveis à oxidação do que as amostras contendo microcápsulas com maltodextrina.	NA	NA	Damerau et al. 2022
Biscoito	Óleo de girassol + óleo de gergelim	Temperatura ambiente por 245 dias	O IP aumentou com o aumento dos dias de armazenamento, e foi maior no biscoito acrescido de 60% de microcápsulas (25,16 meq kg ⁻¹ de óleo aos 245 dias de armazenamento).	NA	NA	Srivastava & Mishra, 2021
Biscoito	Óleo de camarão	Temperatura ambiente, diferentes condições de iluminação (claro e escuro, 600 lx/cm ²) por 12 dias	Os biscoitos fortificados armazenados sob a luz apresentaram maiores valores de índice de peróxido ($p < 0,05$) quando comparado aos biscoitos armazenados no escuro. No entanto, não houve perda ou alteração nos conteúdos de EPA e DHA após o armazenamento em ambas as condições de iluminação.	NA	NA	Takeungwongtrakul & Benjakul, 2017
Biscoito	Óleo de peixe	Temperatura ambiente por 6 meses	Os valores de TBARS para os biscoitos enriquecidos com as microcápsulas contendo gelatina de peixe ou maltodextrina (0,57 - 0,82 mg MDA kg ⁻¹ óleo) foram menores do que o TBARS para os biscoitos acrescidos de óleo livre e emulsionado (0,89 e 1,15 mg MDA kg ⁻¹ óleo, respectivamente).	NA	NA	Jeyakumari et al. 2016
Biscoito	Óleo de agrião	(I) 90% umidade relativa (UR) / 38° C por 3 meses (II) 65% UR / 27° C por 5 meses	Em 90% de UR o IP dos biscoitos fortificados com as microcápsulas aumentou em 16,3 vezes; em 65% de UR esse aumento foi de 9,25 vezes; e em 30 – 40% de UR o	NA	NA	Umesha et al. 2015

		(III) 30 - 40% UR / 38° - 40° C por 4 meses	aumento foi de 14,8 vezes. O conteúdo de ALA apresentou redução semelhante entre as diferentes condições de UR, variando de 5,15 a 6,25%.			
Barras energéticas	Óleo de peixe	20 °C, no escuro por 11 semanas	O IP para as barras energéticas enriquecidas com óleo de peixe microencapsulado foi praticamente estável ao do período de armazenamento, ao contrário das barras com adição de óleo livre, que apresentou um aumento logo nas primeiras semanas e que perdurou até o fim das 11 semanas. O mesmo comportamento se repetiu para os valores de compostos voláteis.	NA	NA	Nielsen & Jacobsen, 2009
Chocolate	Óleo de peixe	Temperatura ambiente por 6 meses	As amostras contendo as microcápsulas com proteína concentrada de soro do leite foram mais estáveis à oxidação, medida a partir dos compostos voláteis, do que as amostras contendo microcápsulas com maltodextrina.	NA	NA	Damerou et al. 2022
Salsicha	Óleo de peixe	4 ± 2 °C, embaladas à vácuo (VP) e embaladas em atmosfera modificada (MAP), por 21 dias	O armazenamento das salsichas por 21 dias aumentou ligeiramente a oxidação lipídica em todas as amostras, mas os valores de TBARS nas amostras VP foram ligeiramente menores do que nas amostras MAP (p > 0,05).	NA	Não foram encontradas diferenças na avaliação sensorial entre as diferentes amostras de salsichas (p > 0,05).	Kawecki et al. 2021b
Salsicha	Óleo de peixe	4 ± 2 °C, embaladas à vácuo (VP) e embaladas em atmosfera modificada (MAP), por 21 dias	O uso de óleo de peixe microencapsulado na formulação de salsichas causou pequenas alterações no perfil de textura, como aumento da dureza (independente do método de embalagem), gomosidade e mastigabilidade, em	Após os 21 dias de armazenamento, as bactérias lácticas (LAB) foram o tipo dominante de	As salsichas VP e MAP com o aditivo de óleo de peixe microencapsulado receberam pontuações ligeiramente mais altas (84,5% em média) do que a amostra controle (sem óleo)	Kawecki et al. 2021c

			comparação ao controle (sem óleo), sendo que as amostras MAP foram caracterizadas por gomosidade e mastigabilidade mais uniformes do que as amostras VP.	bactéria nas salsichas VP e MAP. Nas salsichas fortificadas com óleo de peixe microencapsulado e embaladas à vácuo o aumento de LAB foi de 3,45 vezes e para as embaladas em MAP o aumento foi de 4,08 ao final do período.	(83,4% em média) e as amostras com óleo de peixe livre (82,6% em média).	
Salsicha	Óleo de peixe	4 ± 2 °C por 21 dias	Ao final do armazenamento, as salsichas contendo óleo de peixe microencapsulado caracterizaram-se por apresentar maior dureza que as demais amostras controle (sem óleo) e com adição de óleo livre.	NA	A avaliação mostrou que a adição de microcápsulas não afetou negativamente a qualidade sensorial das salsichas.	Stangierski et al. 2020
Salsicha cozida e salsicha curada	Óleo de peixe	0–5 °C (salsicha cozida) e a 18–20 °C (salsicha curada) por 4 meses	NA	NA	Sem informação nutricional prévia: As amostras cozidas controle (sem óleo) apresentaram escores hedônicos mais altos (4,40) do que os lotes enriquecidos com microcápsulas (3,22 - 2,69). Nas amostras curadas não foram observadas diferenças significativas. Com informação nutricional prévia de 'fonte de ácidos graxos ômega-3': levaram a um aumento (p < 0,05) nos escores hedônicos de	Solomando et al. 2021

Hambúrguer bovino	Óleo de peixe	4 ± 1 °C por 15 dias e depois foram cozidas	O valor de TBARS nas amostras enriquecidas com óleo de peixe microencapsulado aumentou em 7,5 vezes ao final do armazenamento, enquanto nas amostras com adição de óleo livre esse aumento foi de 12,6 vezes.	NA	amostras com microcápsulas (3,85 – 4,45). A cor, o odor e a aceitabilidade das amostras de hambúrguer diminuíram para todos os tratamentos após os 15 dias. Em relação à aceitabilidade geral, as amostras adicionadas de microcápsulas de monocamada e bicamada foram aceitas sensorialmente até o 12º (4,2 ± 0,67) e 15º (5,1 ± 0,32) dia, respectivamente, enquanto que as amostras controle (sem óleo) e as com adição de óleo livre foram rejeitadas no 12º dia.	Morsy & Elsabagh 2021
Hambúrguer bovino	Óleo de peixe	4 °C por 5 dias e a -20 °C por 30 dias	As amostras com as microcápsulas foram as menos oxidadas, com valores de TBARS semelhantes (p > 0,05) às amostras controle (sem óleo) e divergentes (p < 0,05) das amostras acrescidas de óleo livre, após armazenamento refrigerado e congelado.	NA	Após os 5 dias de armazenamento refrigerado, as amostras enriquecidas com as microcápsulas apresentaram a melhor pontuação para os atributos de aparência oleosa e intensidade do odor, quando comparada às amostras controle e com adição de óleo livre. Após os 30 dias de congelamento, o hambúrguer acrescido das microcápsulas apresentou as pontuações mais baixas nesses mesmos atributos.	Aquilani et al. 2018

Almôndegas de carne	Óleo de peixe	4 ± 1 °C por 16 dias	O valor de TBARS, ao final do armazenamento, para as almôndegas controle, adicionadas de óleo livre e de microcápsulas foi 1,04, 1,19 e 0,72 mg MDA kg ⁻¹ , respectivamente e o IP foi de 0,72, 0,87 e 0,62 meq kg ⁻¹ , respectivamente.	NA	As almôndegas adicionadas de óleo livre e o controle foram rejeitados em todos os atributos no 8° e 12° dia de armazenamento. As amostras enriquecidas com as microcápsulas foram aceitas até o 16° dia de armazenamento, com notas 5,80 ± 0,21, 6,00 ± 0,24, 5,82 ± 0,34, 5,42 ± 0,29 e 5,76 ± 0,38 para odor, cor, sabor, mastigabilidade e aceitabilidade geral, respectivamente.	Elsebaie et al. 2022
Nuggets de frango	Óleo de peixe	-18 °C por 3 meses	Após os 3 meses de armazenamento congelado, os maiores valores de TBARS foram encontrados em nuggets acrescidos de óleo livre, em comparação com os lotes controle (sem óleo) e com adição das microcápsulas (p < 0,05). O armazenamento sob congelamento aumentou a quantidade total da maioria dos compostos voláteis selecionados para ambas as amostras enriquecidas (p < 0,05).	NA	Não houve diferenças (p > 0,05) para nenhum atributo sensorial, após o período de armazenamento congelado, em qualquer uma das três formulações de nuggets.	Jiménez-Martin et al. 2016
Bolinho de peixe	Óleo de peixe	0 a 4° C por 28 dias	A adição de óleo de peixe microencapsulado à amostra, levou aos menores valores de IP para cada um dos tempos de armazenamento considerados, com um valor médio de 1,10 meq kg ⁻¹ de óleo. Ao final dos 28 dias, as amostras fortificadas com as microcápsulas e com óleo livre apresentaram valores de TBARS entre 26,12 e 26,63 mmol	NA	Não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos controle, óleo livre adicionado e microcápsulas adicionadas.	Dellarosa et al. 2015

Patê de peixe	Óleo de peixe	4,1 °C ± 0,4, no escuro, por 12 semanas	MDA kg ⁻¹ de produto, respectivamente. Após as 12 semanas de armazenamento, o IP foi mais alto (p < 0,05) em patê adicionado de óleo pré-emulsificado e mais baixo em amostras controle e enriquecidas com as microcápsulas.	NA	NA	Nielsen & Jacobsen, 2011
Presunto curado e creme de queijo	1. Óleo de peixe 2. Óleo de peixe + licopeno	Temperatura ambiente por 4 meses	Após os 4 meses de armazenamento, o valor de TBARS para ambas as amostras aumentou, sendo que o menor aumento foi nos lotes enriquecidos com microcápsulas de óleo de peixe + licopeno. Porém, a composição de EPA e DHA foi maior nos lotes acrescidos de apenas óleo de peixe microencapsulado.	NA	Para as amostras de presunto curado, não foram encontradas diferenças (p > 0,05) em relação à aceitabilidade, comparando-se os tipos de microcápsulas adicionadas. Para as amostras de creme de queijo, os resultados de aceitabilidade mostraram pontuações mais baixas para os lotes enriquecidos do que para o controle.	Solomando et al. 2020b
Iogurte	Óleo de Sacha inchi	4 °C por 30 dias	O iogurte adicionado de microcápsulas produzidas por <i>spray drying</i> teve a melhor qualidade em termos de menor grau de sinérese, quando comparado ao iogurte enriquecido com microcápsulas produzidas por liofilização (p < 0,05).	NA	NA	Suwannasang et al. 2022
Iogurte	Óleo de semente de <i>Nigella sativa</i>	4 °C por 4 semanas	Após as 4 semanas de armazenamento, não houve diferença (p > 0,05) entre os valores de pH das amostras de iogurte fortificado (4,01 ± 0,00) e controle (3,91 ± 0,00) e os valores de acidez de ambas as amostras não mudaram	NA	NA	Abedi et al. 2016

Iogurte	Óleo de linhaça	4-7 °C por 15 dias	(p > 0,05) durante o tempo de armazenamento. Após os 15 dias de armazenamento, todas as amostras fortificadas apresentaram IP maior (p<0,05) em relação ao controle. Observou-se que a sinérese aumentou (p <0,05) em todas as amostras ao longo do período de armazenamento, mas não foi observada diferença (p > 0,05) entre a sinérese da amostra controle (10,0 ml/100g) e do iogurte fortificado com microcápsulas com caseinato de sódio (10,2 ml/100g).	NA	As amostras de iogurte fortificadas no nível de 3% mostraram pontuações de sabor mais baixas (p < 0,05) em comparação com o controle. Nenhuma diferença (p > 0,05) foi observada entre as pontuações para cor e aparência das amostras controle e fortificadas durante o período de armazenamento.	Goyal et al. 2016
Iogurte	Óleo de palma refinado	4 °C por 15 dias	O iogurte contendo as microcápsulas quitosana/tripolifosfato de sódio liberou mais carotenoides (70%) após o período de armazenamento do que o iogurte com microcápsulas quitosana/carboximetilcelulose (20%).	NA	NA	Rutz et al. 2016
Iogurte	Óleo de peixe	4 °C por 1 mês	A redução percentual do conteúdo total de ômega-3 após 1 mês de armazenamento refrigerado foi de 16,5 e 22,4% para iogurte controle (sem óleo) e fortificado, respectivamente. Nenhuma diferença (p > 0,05) foi encontrada na sinérese entre as amostras. O valor de TBARS no controle sofreu um aumento de 2,0 vezes, enquanto no iogurte com adição das microcápsulas esse aumento foi de 2,2 vezes.	As contagens iniciais de LAB foram $8,69 \pm 0,01$ e $8,77 \pm 0,02$ UFC/g; na semana 4, as contagens diminuíram para $6,29 \pm 0,04$ e $6,31 \pm 0,04$ log UFC/g em iogurte controle e fortificado, respectivamente	NA	Estrada et al. 2011

Iogurte	Óleo de peixe	4 °C por 21 dias	Após os 21 dias de armazenamento, o valor de pH reduziu em 11,32% nas amostras controle e fortificada. O IP do iogurte adicionado de óleo de peixe livre foi maior ($p < 0,05$) do que o iogurte adicionado de óleo de peixe microencapsulado, e essa característica para ambos os iogurtes aumentou ($p < 0,05$) em 260 e 72%, respectivamente, ao longo do tempo.	NA	Após 14 dias de armazenamento, não houve diferença ($p > 0,05$) na textura dos iogurtes controle ($6,67 \pm 0,88$) e fortificado ($6,70 \pm 1,06$), mas houve diferença ($p < 0,05$) nos atributos de aroma ($7,40 \pm 0,62$ e $4,17 \pm 1,49$) e sabor ($7,37 \pm 0,76$ e $3,70 \pm 1,62$) e na aceitabilidade geral ($6,63 \pm 0,76$ e $4,00 \pm 1,34$), respectivamente.	Tamjidi et al. 2011
Leite para produção de iogurte	1. Óleo de peixe 2. Óleo de peixe + óleo de hortelã	4 °C por 21 dias	O IP de todas as amostras apresentou um aumento que variou de 97,06 a 130,43% ao fim do período de armazenamento, havendo diferença ($p < 0,05$) entre o IP da amostra controle (óleo livre) e o restante das amostras. Observou-se que houve um aumento regular dos valores de TBARS, que variou de 92,92 a 116,42%, durante o armazenamento, com as amostras adicionadas de óleo livre apresentando valores maiores ($p < 0,05$) do que outras amostras.	Todas as contagens viáveis de <i>Streptococcus thermophilus</i> e <i>Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus</i> diminuíram ($p < 0,05$) durante o armazenamento refrigerado.	Após 21 dias, um sabor ligeiramente estranho ($1,38 \pm 0,25$) foi detectado na amostra acrescida apenas de óleo de peixe livre, o que não foi detectado nas outras amostras. O sabor de peixe nas amostras de iogurte contendo microcápsulas de óleo de peixe + óleo de hortelã foi muito menor.	Bakry et al. 2019
Leite	Óleo de linhaça	5 ± 2 °C por 6 dias	O IP em amostras de leite controle e fortificado após 6 dias de armazenamento estava na faixa de 0,018–0,028 e 0,019–0,035 meq kg^{-1} de óleo, respectivamente, com esse valor sendo maior ($p < 0,05$) no 6º dia no leite fortificado com microcápsulas com caseinato de sódio.	NA	Não houve diferença ($p > 0,05$) nas pontuações de cor, aparência, sensação na boca e odor entre as amostras fortificadas e o controle durante o período de armazenamento. No entanto, as pontuações para sabor diminuíram ($p < 0,05$) do	Goyal et al. 2017

Queijo	Óleo de peixe	5 °C por 60 dias	A taxa de aumento do IP após os 60 dias foi menor para as amostras de queijo fortificadas com óleo microencapsulado, quando comparada às amostras com óleo livre. No entanto, os valores de TBARS das amostras de queijo fortificadas com microcápsulas tiveram uma taxa de aumento mais alta do que as amostras com óleo livre.	NA	dia 0 ao 5º dia para as amostras de controle. As pontuações para aceitabilidade geral da amostra enriquecida com óleo livre foram maiores ($p < 0,05$) do que a amostra adicionada das microcápsulas, ao final do armazenamento. Nenhum sabor estranho de peixe, sabores oxidados e rançosos foram detectados em ambas as amostras.	Farbod et al. 2015
Manteiga	Óleo de chia	-10 °C por 90 dias	Após os 90 dias, o IP das amostras fortificadas aumentou em 16,95 a 93,22% em relação ao controle (sem óleo), com esse aumento estando relacionando ao aumento no nível de enriquecimento. A redução no conteúdo de ALA variou de 0,17 a 3,37%.	NA	Não foram encontradas diferenças significativas entre as amostras para os atributos de cor, sabor e textura.	Ullah et al. 2020
Sorvete	Óleo de linhaça	- 18 ± 2 °C por 120 dias	Ao final do armazenamento, o sorvete fortificado com 4% de microcápsulas apresentou IP mais alto do que a amostra fortificada com 3% e a amostra controle, independente do sabor.	NA	NA	Gowda et al. 2018
Massa seca	Óleo de chia	25 ± 1 °C, armazenadas sob ar e sob atmosfera modificada (N ₂), por 150 dias	Após 150 dias, o IP foi menor para as amostras enriquecidas com óleo microencapsulado em comparação às amostras com óleo livre. A atmosfera modificada promoveu maior estabilidade oxidativa.	NA	NA	González et al. 2021
Maionese	Óleo de peixe	25 °C por 28 dias	Ao final do armazenamento, a maionese fortificada com óleo livre apresentou maior valor de IP (15,22	NA	NA	Rahmani-Manglano et al. 2020

Suco de romã	Óleo de peixe	4 °C por 42 dias	± 1,45 meq kg ⁻¹ de óleo) em comparação com a amostra acrescida das microcápsulas (p < 0,05). No geral, não foram observadas diferenças significativas entre as propriedades reológicas das amostras de suco controle e fortificado e 16,43% de EPA e 11,37% de DHA foram liberados das microcápsulas adicionadas ao suco após o período de armazenamento.	NA	NA	Habibi et al. 2017
Pastilha de menta	Óleo de peixe	Temperatura ambiente, no escuro, armazenadas à vácuo ou permeáveis ao ar, por 4 meses	Aumento permanente do IP foi encontrado em amostras armazenadas em condições permeáveis ao ar (1,5 a 18,6 meq kg ⁻¹ de óleo). Nas amostras armazenadas à vácuo o aumento foi muito menor (1,4 a 4,4 meq kg ⁻¹ de óleo).	NA	Diminuição gradual da qualidade sensorial e um aumento (p < 0,05) da intensidade do sabor estranho de peixe foram detectados para pastilhas enriquecidas e armazenadas ao ar em comparação com o controle (sem óleo). A qualidade sensorial das amostras armazenadas sob vácuo permaneceu estável durante todo o armazenamento.	Kolanowski & Weißbrodt 2008
Alimentos instantâneos	Óleo de peixe	Temperatura ambiente, armazenadas à vácuo ou permeáveis ao ar, por 7 semanas	NA	NA	Mudanças significativas foram observadas na qualidade sensorial das amostras fortificadas e armazenadas em condições permeáveis ao ar quando comparadas às amostras controle. Já as amostras embaladas à vácuo foram sensorialmente estáveis	Kolanowski et al. 2007

durante todo o período de
armazenamento.

NA: não avaliado; IP: índice de peróxidos; p-AnV: valor de p-anisidina; IA: índice de acidez; TBARS: substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico; OP: óleo de peixe; OA: óleo de alho; EPA: ácido graxo eicosapentaenoico; DHA: ácido graxo docosahexaenoico; ALA: ácido graxo alfa-linolênico; MDA: malonaldeído; UR: umidade relativa; VP: embalagem à vácuo; MAP: embalagem em atmosfera modificada; LAB: bactérias lácticas; UFC: unidades formadoras de colônia.

3.3.1. Características físico-químicas

As análises físico-químicas mais empregadas na avaliação da estabilidade dos alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis estão representadas na Fig. 2. Por se tratarem, na sua grande maioria, de óleos comestíveis ricos em ácidos graxos poli-insaturados, os métodos de avaliação do seu perfil e conteúdo e da oxidação lipídica foram os mais empregados.

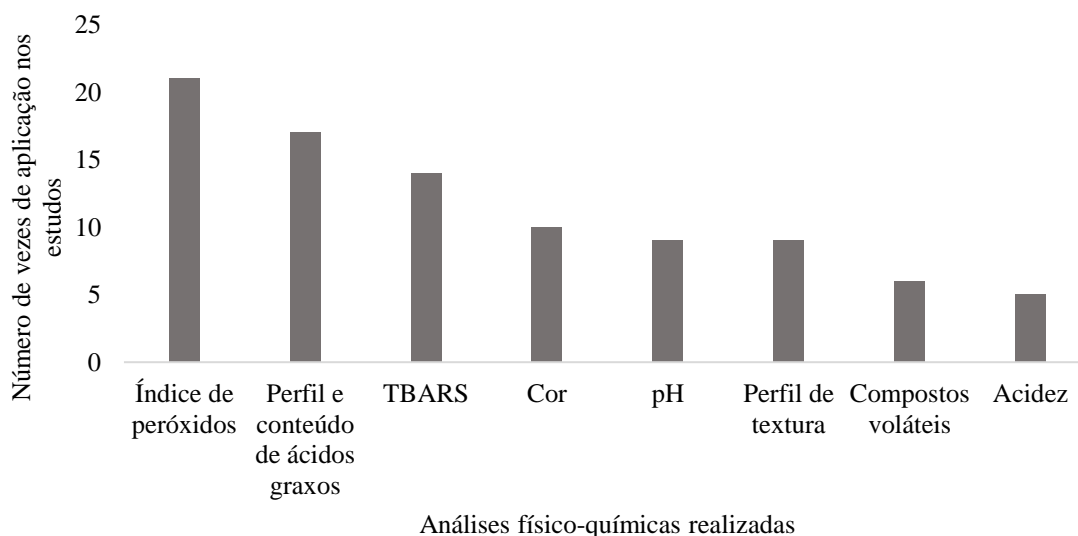


Fig. 2. Análises físico-químicas mais recorrentes na avaliação da estabilidade dos alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis.

Em seu estudo de enriquecimento de almôndegas de carne com óleo de peixe livre e microencapsulado, Elsebaie et al (2022) observaram que o armazenamento das amostras de almôndegas por 16 dias resultou em um aumento nas leituras de TBARS, com o maior aumento (3,8 vezes) para as amostras adicionadas de óleo na forma livre e o menor (2,4 vezes) para as amostras com óleo de peixe microencapsulado. Esse mesmo comportamento se repetiu para os valores de índice de peróxido, com aumentos de 97,73, 63,64 e 40,91% para as almôndegas com óleo livre, controle e enriquecidas com as microcápsulas, respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos às paredes das microcápsulas, que funcionam como uma barreira, protegendo e minimizando as interações do óleo de peixe e dos ácidos ômega-3 com agentes oxidantes em produtos cárneos.

Gowda et al (2018) avaliaram a fortificação de sorvetes de diferentes sabores com óleo de linhaça microencapsulado, em níveis de 3 e 4%, e notaram que o índice de peróxido foi

maior ($p < 0,05$) na amostra de sorvete fortificada com 4% de microcápsulas, que pode ser justificado justamente pela maior quantidade de óleo no produto susceptível à oxidação.

Biscoitos foram enriquecidos com óleo de peixe na sua forma livre, na forma de emulsão óleo em água e na forma de microcápsulas produzidas com gelatina de peixe ou maltodextrina como encapsulante e os pesquisadores avaliaram a sua estabilidade oxidativa (Jeyakumari et al., 2016). O valor de TBARS foi maior ($p < 0,05$) nas amostras acrescidas de óleo emulsionado (1,15 mg MDA kg^{-1}) e livre (0,89 mg MDA kg^{-1}) do que nas amostras fortificadas com os óleos encapsulados (0,57 – 0,82 mg MDA kg^{-1}). Os resultados indicaram que os biscoitos fortificados com as microcápsulas de óleo de peixe apresentaram diminuição significativa na oxidação lipídica, demonstrando claramente que os encapsulantes utilizados promoveram proteção contra a oxidação do óleo de peixe.

3.3.2. Características microbiológicas

Poucos foram os estudos que avaliaram microbiologicamente os produtos elaborados e fortificados com microcápsulas de óleos comestíveis.

Bakry et al (2019) relataram redução no número de células viáveis de *Lactobacillus bulgaricus* (que variou entre 53,31 a 64,81%) *Streptococcus thermophilus* (que variou entre 62,62 a 67,80%) durante o armazenamento refrigerado de iogurtes elaborados a partir de leite enriquecido com microemulsões de óleo de peixe, microemulsões de óleo de peixe + óleo essencial de menta e controle (óleo livre), mas os valores se mantiveram dentro das especificações do *Codex Alimentarius* (2011), que estabelece o mínimo de contagens viáveis de 10^7 UFC/ml. A contagem de leveduras e bolores aumentou ($p < 0,05$) nas amostras de iogurte durante o armazenamento refrigerado, sendo que o iogurte acrescido das microemulsões de óleo de peixe com óleo de menta exibiu menor aumento na contagem. Por apresentar atividade antimicrobiana, o óleo de menta pode ter exercido um efeito inibitório sobre os bolores e leveduras.

Outros pesquisadores (Estrada et al., 2011) também fortificaram iogurtes, sabor morango, e não observaram diferenças significativas nas contagens de bactérias lácticas entre as amostras controle e fortificada, apresentando uma redução de 38,15 e 38,98%, respectivamente, ao final do período de armazenamento, e permanecendo dentro das especificações do *Codex Alimentarius* (2011). Sugere-se, assim, que as microcápsulas aplicadas não influenciaram na contagem das bactérias lácticas, responsáveis pelas características peculiares do iogurte.

3.3.3. Características sensoriais

Dentre os 24 estudos que realizaram análises sensoriais dos seus produtos enriquecidos ao longo do período de armazenamento, 41,67% aplicaram teste afetivo utilizando a escala hedônica estruturada de 9 pontos como instrumento de avaliação (Fig. 3).

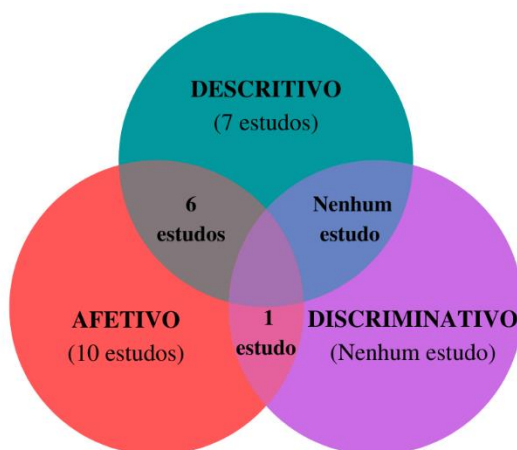


Fig. 3. Testes sensoriais aplicados na avaliação da estabilidade dos alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleos comestíveis.

Em relação a equipe de avaliadores, 62,5% dos estudos optaram por julgadores treinados para avaliar sensorialmente seus produtos, uma vez que o treinamento os torna capazes de perceber e descrever características específicas dos alimentos, minimizando a subjetividade.

Uma equipe de dez julgadores treinados avaliou salsichas enriquecidas com microcápsulas de óleo de peixe e constatou uma maior consistência, principalmente quando aquecidas, quando comparadas às amostras controle e adicionadas de óleo livre (Stangierski et al., 2020). Imediatamente após a produção e ao longo do período de armazenamento, as salsichas fortificadas com óleo microencapsulado caracterizaram-se por uma dureza ligeiramente superior à das outras amostras, que foi associada ao impacto das microcápsulas na estrutura do enchimento, que afeta a forma como a água e a gordura se ligam. Por fim, os julgadores concluíram que a adição das microcápsulas não afetou negativamente a qualidade sensorial das salsichas.

Os pães elaborados por Kairam et al (2021) e fortificados com microcápsulas de óleo de linhaça + óleo de alho permaneceram aceitáveis sensorialmente até 7 dias de armazenamento e foram pontuados como provavelmente compraria (4,0) para a intenção de compra, sugerindo

que os pães fortificados podem competir com o pão tradicional no mercado consumidor devido aos benefícios para a saúde juntamente com a qualidade dos atributos sensoriais.

Kolanowski et al (2007) produziram alimentos instantâneos, com e sem aromatizante, fortificados com microcápsulas de óleo de peixe, sendo uma parte embalada à vácuo e outra parte em condições permeáveis ao ar, e concluíram que a presença de oxigênio diminui a qualidade sensorial de alimentos instantâneos fortificados com óleo de peixe durante o armazenamento e que a presença de um aromatizante permite o mascaramento do sabor indesejável do óleo e posterga a percepção de diferenças entre as amostras estudadas.

Diante dos dados apresentados na Tabela 2 constata-se que o microencapsulamento de óleos comestíveis para posterior aplicação em alimentos para fins de fortificação é uma estratégia viável, uma vez que promove proteção contra oxidação lipídica dos óleos, e dos ácidos graxos poli-insaturados que os compõem, e mascara o sabor e odor característicos desses óleos, como do óleo de peixe, por exemplo, bem como os aromas e sabores indesejáveis, que podem ser gerados por reações de oxidação.

Ao mesmo tempo, poucas foram as alterações sofridas nos atributos sensoriais destes alimentos fortificados, favorecendo a uma boa aceitação por parte dos consumidores. Contudo, ressalta-se a necessidade de novos estudos que, além das características físico-químicas e sensoriais, também avaliem as microbiológicas, que servem para verificar se há microrganismos presentes nos alimentos, com o intuito de presumir as condições higiênico-sanitárias em que esses alimentos foram desenvolvidos, os riscos que podem oferecer à saúde do consumidor e se eles terão ou não a vida útil pretendida.

Em relação à avaliação da oxidação lipídica nos alimentos enriquecidos, percebeu-se que os estudos empregaram, principalmente, as medições de índice de peróxido e das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, que refletem tanto os produtos primários quanto os secundários da oxidação de lipídios, respectivamente.

No que diz respeito aos testes sensoriais selecionados pelos pesquisadores, pode-se considerar que foram feitas boas escolhas, pois foi possível avaliar a aceitação por escala hedônica, perfil de sabor, odor e textura e ainda estabelecer a intenção de compra dos alimentos adicionados de microcápsulas de óleos comestíveis.

Sendo assim, a fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados se trata de uma estratégia viável do ponto de vista tecnológico, a considerar os resultados apresentados nos diferentes parâmetros avaliados nos testes de estabilidade, bem como do ponto de nutricional, visto que é possível aumentar o valor nutricional destes alimentos.

3.4. Bioacessibilidade e biodisponibilidade de óleos microencapsulados e seus compostos bioativos

A bioacessibilidade pode ser definida como a fração do óleo ou de um composto bioativo que é liberada, a partir de uma matriz alimentícia, no lúmen gastrointestinal e que se torna potencialmente disponível para absorção. Sendo assim, a bioacessibilidade depende de alguns parâmetros, incluindo a concentração inicial da substância no alimento, a composição deste alimento, além das características físico-químicas dos fluidos gastrointestinais e a presença de enzimas digestivas (Carbonell-Capella et al., 2014).

Existem diversos trabalhos que exploraram a liberação ou bioacessibilidade de óleos e compostos bioativos nanoencapsulados, enquanto poucos estudos realizaram esses ensaios em microcápsulas empregadas na fortificação de alimentos. Apesar da relevância dessas questões, a realização de estudos de liberação e bioacessibilidade são necessários para avaliação da funcionalidade dos alimentos enriquecidos com óleos encapsulados para alcançar os benefícios à saúde. Embora esses tipos de resultados que relacionam os ensaios *in vitro* e *in vivo* sejam extremamente importantes para validar a aplicabilidade das microcápsulas de óleos acrescidas aos alimentos, alguns fatores podem limitar seu desempenho, como custos, tempo e estrutura laboratorial (Santos et al., 2021).

Existem características específicas que afetam a liberação dos óleos das microcápsulas em condições gastrointestinais. Diferentes morfologias de microcápsulas, que dependem principalmente das técnicas de microencapsulação, influenciam diretamente o mecanismo de liberação dos óleos aprisionados. O tipo do material encapsulante (carboidrato, proteína ou lipídio), assim como o emulsificante aplicado, também controlam e influenciam o processo de liberação dos óleos (Santos et al., 2021; Zhao e Tang, 2016).

Solomando et al. (2020a) enriqueceram sistemas modelo de carne com microcápsulas de óleo de peixe produzidas por *spray drying* e realizaram a digestão *in vitro* para avaliar a bioacessibilidade de EPA e DHA. Foram elaboradas microcápsulas apenas com maltodextrina (MM) como agente encapsulante e outras com a combinação de maltodextrina e quitosana (MMQ) como revestimento. A liberação de EPA e DHA na fase intestinal foi significativa nos sistemas modelo enriquecidos com MM em comparação com aqueles enriquecidos com MMQ na maioria dos lotes analisados. Conseqüentemente, a porcentagem de EPA e DHA bioacessíveis foi maior para o tipo MM, o que pode ser explicado pelas diferenças na estrutura da parede das microcápsulas de óleo de peixe. A estrutura da parede das microcápsulas elaboradas com maltodextrina e quitosana deve ser mais resistente à digestão do que a camada

de maltodextrina da microcápsula MM. A maior bioacessibilidade de EPA e DHA ocorreu em amostras enriquecidas com microcápsulas revestidas apenas com maltodextrina, sugerindo que estas microcápsulas seriam o melhor veículo para ômega-3.

Já a biodisponibilidade compreende a fração do composto bioativo que é absorvido pelo trato gastrointestinal, atinge a circulação sistêmica e exerce o seu efeito depois de metabolizado e distribuído pelos órgãos e tecidos-alvo, dependendo, assim, da sua liberação da matriz alimentícia durante a digestão, a absorção, o metabolismo e ainda o transporte pelo sistema circulatório (Carbonell-Capella et al., 2014).

Os componentes de um alimento e sua microestrutura afetam a biodisponibilidade de nutrientes. Alimentos contendo gordura podem ser desenvolvidos para manipular a biodisponibilidade lipídica, por exemplo. A taxa e a extensão da digestão lipídica na presença de uma matriz alimentar são afetadas pela dimensão da área de superfície exposta da matriz e pelo tipo e concentração dos componentes alimentares. Além disso, também é afetada pela permeabilidade da matriz alimentar às moléculas biológicas de baixo peso molecular, como enzimas e ácidos. Já a inclusão de algumas fibras mostrou o efeito inverso, inibindo a lipólise de triacilgliceróis. Outros componentes, como cátions multivalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}), também podem alterar a digestão lipídica, pois formam complexos insolúveis com ácidos graxos livres ou sais biliares no intestino delgado (Shen et al., 2011; Hinriksdottir et al., 2015).

Em relação à biodisponibilidade de ácidos graxos ômega-3, esta pode variar significativamente de acordo com a estrutura do alimento em que o óleo fonte de ômega-3 foi adicionado, a estrutura lipídica do ácido graxo e as concentrações de óleo e microcápsulas utilizadas (Gumus e Gharibzahedi, 2021). Os encapsulantes também exibem potencial para alterar o local da liberação do óleo após a digestão e, conseqüentemente, influenciar na biodisponibilidade dos compostos bioativos presentes nos óleos (Shen et al., 2011).

Um estudo de intervenção em jovens estudantes do gênero feminino comparou a biodisponibilidade do óleo de peixe microencapsulado e incorporado a diferentes produtos alimentares (pão, biscoito e sopa) com uma quantidade igual do mesmo óleo administrado na forma de uma cápsula oral durante quatro semanas (Wallace et al., 2000). Não houve diferença significativa entre o efeito da cápsula oral ou da intervenção alimentar na composição de ácidos graxos plaquetários, demonstrando, assim, que os alimentos enriquecidos com microcápsulas de óleo de peixe são tão eficazes quanto as cápsulas de óleo de peixe no aumento do teor de ácidos graxos ômega-3 no sangue dos indivíduos. Dessa forma, esses alimentos enriquecidos seriam uma alternativa eficaz de aumentar a ingestão de ômega-3 nessa população.

Outro estudo de intervenção conduzido durante três semanas comparou indivíduos que mantiveram a sua dieta habitual com indivíduos que consumiram pão fortificado com óleo de peixe microencapsulado e que excluíram alimentos ricos em ácidos graxos ômega-3 (Yep et al., 2002). O objetivo do estudo foi avaliar se o consumo do pão enriquecido melhoraria o teor de ácidos graxos ômega-3 em indivíduos saudáveis, medido pelos níveis plasmáticos. Os pesquisadores mostraram que uma dose baixa de ácidos graxos ômega-3 (60 mg/dia), consumida como pão enriquecido, era biodisponível, pois proporcionou um aumento nos níveis plasmáticos destes ácidos graxos após o período de intervenção.

Fard et al (2020) investigaram a biodisponibilidade de DHA em crianças saudáveis que foram divididas em quatro grupos: grupo 1 fez uso de fórmula infantil não fortificada; grupo 2 fez uso de fórmula infantil não fortificada + óleo de peixe com alto teor de DHA; grupo 3 fez uso de fórmula infantil à base de laticínios enriquecida com óleo de peixe microencapsulado com alto teor de DHA; e grupo 4 fez uso de fórmula infantil hipoalergênica enriquecida com óleo de peixe microencapsulado com alto teor de DHA, sendo que a ingestão de DHA por dia nos grupos 2, 3 e 4 foi de 250mg. Após um mês, os resultados mostraram uma biodisponibilidade aprimorada com concentrações significativamente maiores de níveis de DHA no sangue de crianças que receberam as fórmulas infantis enriquecidas com as microcápsulas de óleo de peixe, propondo que o óleo de peixe na forma encapsulada melhorou a liberação controlada e a biodisponibilidade de ácidos graxos ômega-3.

Sendo assim, fica evidente o potencial da microencapsulação em aumentar a bioacessibilidade e biodisponibilidade dos óleos e seus compostos bioativos.

3.5. Citotoxicidade de óleos microencapsulados

A citotoxicidade corresponde aos efeitos adversos resultantes da interferência nos processos essenciais para a sobrevivência, proliferação e função celular. Estes efeitos podem envolver a integridade da membrana e do citoesqueleto, alterações no metabolismo, na síntese e na degradação ou mesmo na liberação de constituintes celulares ou produtos, na regulação de íons e na divisão celular. Para a avaliação da citotoxicidade, são utilizadas células de tecido, saudáveis ou cancerígenas, para observar o crescimento celular, a reprodução e os efeitos morfológicos (OECD/GD 129, 2010).

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar a citotoxicidade de óleos livres e microencapsulados. Vishnu et al (2018) avaliaram a citotoxicidade *in vitro* de microcápsulas de óleo de peixe e concluíram que, na concentração de 1 mg de óleo de peixe microencapsulado

em 1 mL de DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) o estresse oxidativo miocárdico e a apoptose em linhagens celulares de cardiomioblastos (H9c2) foi atenuada, e que 12,5 µg/mL de DMEM de microcápsulas exibiu efeito cardioprotetor, que, atualmente, é bem desejado diante do aumento da incidência de doenças cardiovasculares.

Em outro estudo, Amani et al (2022) avaliaram e compararam a citotoxicidade *in vitro* de 100 µL de diferentes concentrações de óleo de alecrim livre e na forma microencapsulada contra a linhagem de células 4 T1 (câncer de mama de camundongo). O óleo de alecrim na forma livre exibiu um efeito de citotoxicidade maior do que na forma microencapsulada, apresentando um IC50 (concentração inibitória mínima para inibir 50% da quantidade inicial) de 599 ± 38 µg/mL e 4394 ± 147 µg/mL, respectivamente. A baixa citotoxicidade do óleo de alecrim microencapsulado em comparação com a sua forma livre pode estar relacionada ao efeito protetor dos materiais de parede que causaram a baixa liberação do óleo. A alta viabilidade celular prova que as microcápsulas de óleo de alecrim podem ser uma escolha segura para uso em uma ampla gama de aplicações, especialmente na indústria alimentícia.

Estudo semelhante foi desenvolvido por Makimori et al (2020), em que a citotoxicidade *in vitro* do óleo essencial de canela livre e microencapsulado foi testada e comparada em células renais de macaco, nas concentrações de 1000, 100 e 10 e 10000, 1000, 100 e 10 µg/mL, respectivamente. A CC50 (concentração citotóxica) foi $201,45 \pm 31,45$ e $4921,33 \pm 117,48$ µg/mL para o óleo de canela na forma livre e microencapsulada, respectivamente, ou seja, as microcápsulas foram menos citotóxicas para as células estudadas. Como destacado no estudo anterior, a microencapsulação de óleos é uma abordagem viável e eficiente para modular a liberação de compostos bioativos e pode reduzir a toxicidade.

Dentre os estudos que desenvolveram o enriquecimento de matrizes alimentícias com óleos microencapsulados, não houve a realização de ensaios de citotoxicidade, demonstrando a necessidade de pesquisas nesse âmbito para avaliar o efeito citotóxico que as microcápsulas de óleo, uma vez inseridas em alimentos, podem produzir nos consumidores destes alimentos.

4. Panorama atual da fortificação de alimentos com óleos microencapsulados e tendências de pesquisas futuras

Uma análise de co-ocorrência de palavras-chave foi realizada com os artigos experimentais, que começaram a ser publicados desde 1992, e com os estudos de revisão que vêm sendo publicados, e que trazem a abordagem do enriquecimento de alimentos com óleos

microencapsulados (Fig. 4). Essa análise possibilita um mapeamento dos pontos que foram e estão sendo estudados pelos pesquisadores e a relação que se mantém entre eles.

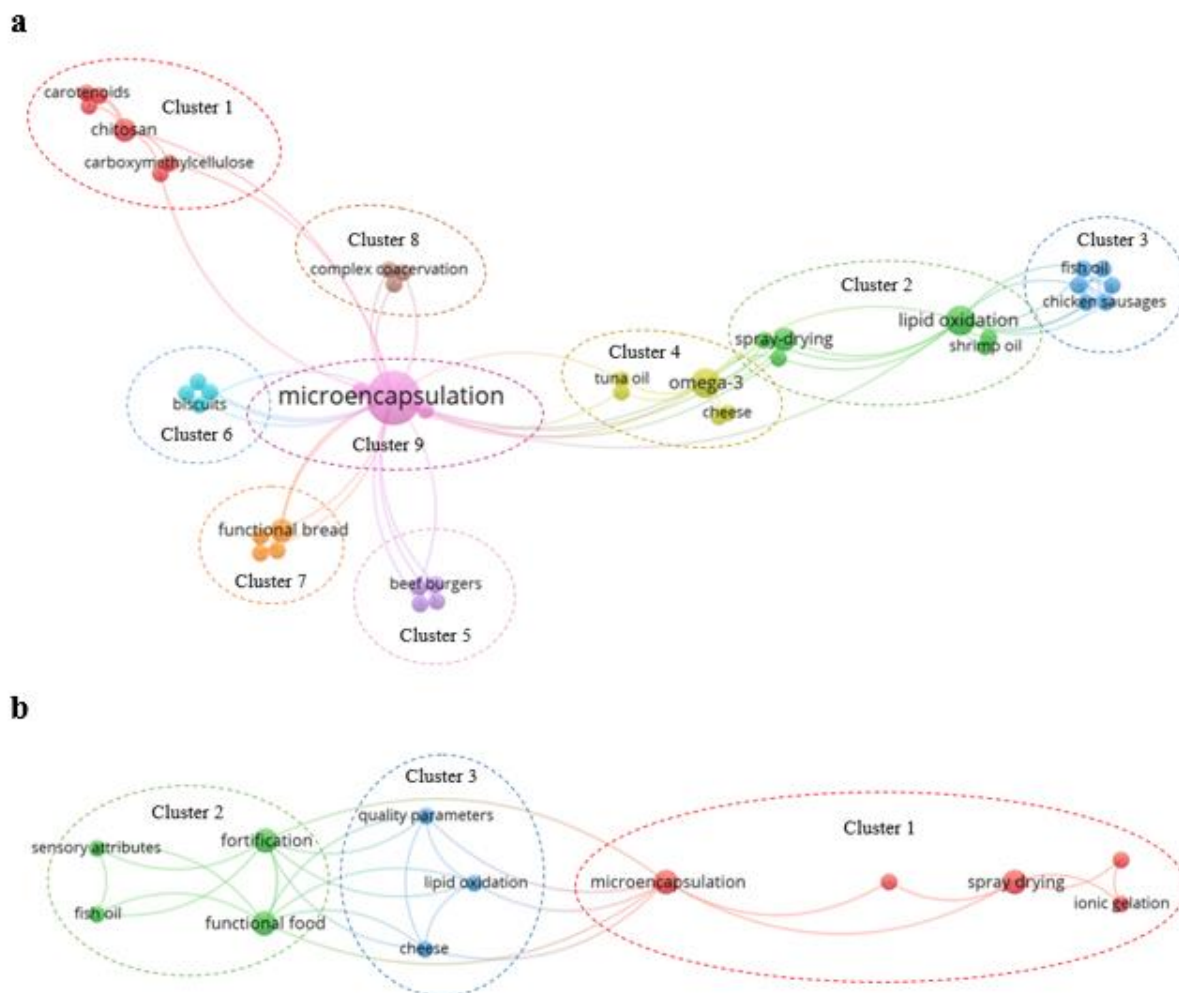


Fig. 4. Análise de co-ocorrência de palavras-chave dos artigos experimentais (a) e de revisão (b) que abordaram a fortificação de alimentos com óleos microencapsulados.

Na Fig. 4a está retratada a rede de palavras-chave dos artigos originais. No cluster 1 estão relacionados alguns materiais de parede que são empregados no processo de microencapsulamento, além de um dos compostos bioativos, os carotenoides, que vem sendo microencapsulado. No cluster 2 está elencada a técnica de microencapsulamento mais utilizada quando se trata do encapsulamento de óleos comestíveis, que é o *spray drying*. Também estão associadas palavras-chave que remetem à fortificação de alimentos com óleos microencapsulados a fim de protegê-los da oxidação lipídica que pode ocorrer ao longo do

período de armazenamento. O cluster 3 traz a relação do óleo de peixe, óleo comestível utilizado pela maioria dos estudos incluídos nesta revisão, com um dos produtos cárneos mais empregado na fortificação com as microcápsulas, que são as salsichas. No cluster 4 as conexões estão relacionadas aos ácidos graxos ômega-3, composto bioativo de interesse da indústria alimentícia para o enriquecimento de alimentos por conta dos benefícios promovidos à saúde dos consumidores. Nos clusters 5, 6 e 7 estão demonstradas as matrizes alimentícias que vêm sendo usadas para fortificação com óleos microencapsulados, como hambúrgueres, biscoitos e pães, alimentos que podem ser considerados acessíveis à grande parcela da população. O cluster 8 é representado por outra técnica de microencapsulação (coacervação complexa) que também vem sendo adotada para a elaboração das microcápsulas de óleos. Por fim, o cluster 9 traz a microencapsulação como a palavra-chave central, que só não está conectada a apenas um dos outros clusters, simbolizando a principal tecnologia desenvolvida pelos pesquisadores na busca de garantir proteção aos óleos comestíveis contra a oxidação e consequente degradação.

Já na Fig. 4b está representada a rede de palavras-chave que foi formada a partir dos artigos de revisão. O primeiro cluster apresenta a microencapsulação como ponto principal, estando a ela associadas algumas técnicas, como *spray drying*, coacervação complexa e gelificação iônica. Os ácidos graxos poli-insaturados vêm representando um dos variados componentes que podem ser microencapsulados. O cluster 2 traz a abordagem do desenvolvimento de alimentos funcionais a partir da fortificação com óleos comestíveis, como o óleo de peixe. Também relaciona os atributos sensoriais, aspecto que deve ser avaliado quando novos produtos são desenvolvidos. No último cluster estão elencadas palavras-chave que também fazem *link* direto com a microencapsulação, trazendo o queijo como uma matriz alimentícia que pode ser enriquecida com microcápsulas, desde que os parâmetros de qualidade sejam atendidos, e a oxidação lipídica como um efeito que pode ser minimizado com o microencapsulamento dos óleos.

Diante dos resultados obtidos a partir da análise de co-ocorrência de palavras-chave é possível observar que a tecnologia de microencapsulação já vem se consolidando entre as pesquisas quando o objetivo é a proteção dos óleos comestíveis e aplicação destes na fortificação de alimentos. Nota-se também que estes resultados estão convergentes aos desfechos encontrados neste estudo, uma vez que os tópicos abordados perpassam pelas palavras-chave e conexões retratadas na Fig. 4.

Considerando a crescente demanda por alimentos funcionais e o déficit de estudos relacionados, como pode ser notado nas análises de co-ocorrência, propõe-se que pesquisas

futuras possam focar em estudos *in vitro* e *in vivo* e destacar as análises de bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade destes alimentos enriquecidos com óleos microencapsulados, uma vez que é importante garantir a estabilidade dos óleos e de seus compostos bioativos durante o processo de digestão e absorção bem como certificar que não serão formadas substâncias tóxicas ao organismo humano.

5. Conclusões

A fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados é uma estratégia que tem sido aplicada para a adição de nutrientes promotores de efeitos benéficos à saúde dos consumidores e se iniciou nos anos 90, com destaque para os anos 2020, 2021 e 2022. Quanto aos alimentos que são fortificados com óleos microencapsulados, os produtos de panificação e confeitaria, os cárneos e os laticínios são os mais empregados para aplicação das microcápsulas.

Em relação ao atendimento ao que é preconizado pelas agências reguladoras para considerar um alimento como fortificado ou enriquecido, nos estudos em que foi possível essa avaliação, observou-se cumprimento do que é recomendado. No que se refere a estabilidade desses alimentos enriquecidos ao longo do armazenamento, a maior parte manteve as suas características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais, mostrando que o acréscimo de óleos comestíveis na sua forma microencapsulada serve como alternativa de melhorar a qualidade nutricional dos alimentos sem perder a qualidade original do produto.

Poucos estudos avaliaram a bioacessibilidade e biodisponibilidade dos óleos e de seus compostos bioativos nos alimentos fortificados, mas, os que investigaram, ressaltaram a importância da microencapsulação em conferir proteção a esses componentes para que possam suprir às necessidades nutricionais dos consumidores e promover efeitos benéficos à saúde. Quanto à citotoxicidade, é importante que futuros estudos envolvendo o enriquecimento de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados determinem o efeito citotóxico destas microcápsulas no organismo dos consumidores, uma vez que é fundamental garantir que estes alimentos não ofereçam risco à saúde humana. No que diz respeito à análise de co-ocorrência de palavras-chave, foi possível, a partir das conexões, mapear o desenvolvimento da tecnologia de fortificação de alimentos com óleos comestíveis na forma microencapsulada e detectar os aspectos que necessitam ser explorados, como os estudos de bioacessibilidade, biodisponibilidade e citotoxicidade dos óleos microencapsulados, e seus compostos bioativos, quando aplicados nos alimentos para fins de fortificação.

Por fim, ressalta-se que este foi o primeiro estudo que avaliou a fortificação de alimentos com óleos comestíveis microencapsulados sob esses aspectos (alimentos mais utilizados, efeitos na composição nutricional, estudos de estabilidade, de metabólicos e de citotoxicidade), podendo contribuir para o campo científico, tecnológico, social e econômico em um futuro próximo.

Declaração de conflito de interesse:

Os autores confirmam não ter conflitos de interesse associados a qualquer aspecto deste estudo.

Financiamento:

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo n° 409924/2021-0).

Agradecimentos:

Os autores expressam seu especial agradecimento aos membros da Coordenação de Aperfeiçoamento e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil). Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil - Processo n. 409924/2021-0). C. D. Ferreira Ribeiro agradece ao CNPq/Brasil pela bolsa de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora (Processo n. 303587/2021-0).

Referências

- Abedi, A.-S., Rismanchi, M., Shahdoostkhany, M., Mohammadi, A., & Hosseini, H. (2016). Microencapsulation of *Nigella sativa* seeds oil containing thymoquinone by spray-drying for functional yogurt production. *International Journal of Food Science and Technology*, *51*, 2280–2289. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13208>.
- Akhtar, G., Masoodi, F. A., Rather, Z. U. K. & Wani, T. A. (2022). Exploiting encapsulated Himalayan walnut oil as a vivid source of essential fatty acids for the development of novel functional bread. *International Journal of Food Science and Technology*, *57*, 4129–4137. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15729>.
- Amani, F., Rezaei, A., Damavandi, M. S., Doost, A. S., & Jafari, S. M. (2022). Colloidal carriers of almond gum/gelatin cocervates for rosemary essential oil: Characterization and in-vitro cytotoxicity. *Food Chemistry*, *377*, Article 131998. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131998>.

- Andajani, P. T. (2016). Microencapsulated mixture of fish oil and fortified in ice cream. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, 11.
- Aquilani, C., Pérez-Palacios, T., Sirtori, F., Jiménez-Martín, E., Antequera, T., Franci, O., et al. (2018). Enrichment of Cinta Senese burgers with omega-3 fatty acids. Effect of type of addition and storage conditions on quality characteristics. *Grasas Y Aceites*, 69, Article e235. <https://doi.org/10.3989/gya.0671171>.
- Bakry, A. M., Chen, Y. Q., Liang, L. (2019). Developing a mint yogurt enriched with omega-3 oil: Physicochemical, microbiological, rheological, and sensorial characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43, Article e14287. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14287>.
- Beikzadeh, S., Shojae-Aliabadi, S., Dadkhodazade, E., Sheidaei, Z., Abedi, A.-S., Mirmoghtadaie, L., et al. (2020). Comparison of properties of breads enriched with omega-3 oil encapsulated in β -glucan and *saccharomyces cerevisiae* yeast cells. *Applied Food Biotechnology*, 7, 11–20. <http://dx.doi.org/10.22037/afb.v7i1.25969>.
- Bermúdez-Aguirre, D. & Barbosa-Cánovas, G. V. (2012). Fortification of queso fresco, cheddar and mozzarella cheese using selected sources of omega-3 and some nonthermal approaches. *Food Chemistry*, 133, 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.093>.
- Brasil. (1998). Portaria n.31 SVS/MS, de 13 de janeiro de 1998. A Secretária de Vigilância Sanitária do MS aprova o Regulamento Técnico referente a Alimentos Adicionados de Nutrientes Essenciais. *Diário Oficial da União*. 1998 16 jan; (11-E):5; Seção 1.
- Bueno, F., Chouljenko, A., Reyes, V. & Sathivel, S. (2022). Spray-dried almond milk powder containing microencapsulated flaxseed oil. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2061507>.
- Carbonell-Capella, J. M., Buniowska, M., Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frígola, A. (2014). Analytical methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13, 155–171. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12049>.
- Codex, A. (2011). Milk and milk products (2nd ed., pp. 7e8). Rome: WHO, FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/015/i2085e/i2085e00.pdf>
- Comunian, T. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2016). Microencapsulation using biopolymers as an alternative to produce food enhanced with phytosterols and omega-3 fatty acids: A review. *Food Hydrocolloids*, 61, 442–457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.003>.
- Damerou, A., Mustonen, S. A., Ogrodowska, D., Varjotie, L., Brandt, W. & Laaksonen, O. et al. (2022). Food fortification using spray-dried emulsions of fish oil produced with maltodextrin, plant and whey proteins - Effect on sensory perception, volatiles and storage stability. *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27113553>.
- Dellarosa, N., Laghi, L., Martinsdóttir, E., Jónsdóttir, R., & Sveinsdóttir, K. (2015). Enrichment of convenience seafood with omega-3 and seaweed extracts: Effect on lipid oxidation. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 746–752. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.032>.
- Ebata, A., Thorpe, J., Islam, A., Sultana, S., & Mbuya, M. N. N. (2021). Understanding drivers of private-sector compliance to large-scale food fortification: A case study on edible

oil value chains in Bangladesh. *Food Policy*, 104.
<https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102127>.

Elsebaie, E. M., Kassem, M. M., Mousa, M. M., Basuony, M. A. M., Zeima, N. M. & Essa, R. Y. (2022). Cod liver oil's encapsulation into sodium alginate/lupin protein beads and its application in functional meatballs' preparation. *Foods*, 11.
<https://doi.org/10.3390/foods11091328>.

European Food Safety Authority (EFSA). (2017). *Dietary Reference Values for nutrients. Summary Report*. EFSA supporting publication, 98 p.
<https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.e15121>.

Estrada, J. D., Boeneke, C., Bechtel, P., & Sathivel, S. (2011). Developing a strawberry yogurt fortified with marine fish oil. *Journal of Dairy Science*, 94, 5760–5769.
<https://doi.org/10.3168/jds.2011-4226>.

Fadini, A. L., Alvim, I. D., Carazzato, C. A., Paganotti, K. B. de F., Miguel, A. M. R. de O., & Rodrigues, R. A. F. (2021). Microparticles loaded with fish oil: stability studies, food application and sensory evaluation. *Journal of Microencapsulation*, 38, 365–380.
<https://doi.org/10.1080/02652048.2021.1948622>.

Farbod, F., Kalbasi, A., Moini, S., Emam-Djomeh, Z., Razavi, H., & Mortazavi, A. (2015). Effects of storage time on compositional, micro-structural, rheological and sensory properties of low fat Iranian UF-Feta cheese fortified with fish oil or fish oil powder. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 1372–1382. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1163-z>.

Fard, S. G., Loh, S. P., Turchini, G. M., Wang, B., Elliott, G., & Sinclair, A. J. (2020). Microencapsulated tuna oil results in higher absorption of DHA in toddlers. *Nutrients*, 12.
<https://doi.org/10.3390/nu12010248>.

Feizollahi, E., Hadian, Z., & Honarvar, Z. (2018). Food fortification with omega-3 fatty acids; Microencapsulation as an addition method. *Current Nutrition & Food Science*, 14, 90–103.
<https://doi.org/10.2174/1573401313666170728151350>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). *Fats and fatty acid in human nutrition*. FAO Food and Nutrition Paper.

Food and Drug Administration (FDA). (2013). *Guidance for Industry: A Food Labeling Guide*.

Gallardo, G., Guida, L., Martinez, V., López, M. C., Bernhardt, D., Blasco, R., et al. (2013). Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application. *Food Research International*, 52, 473–482. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.020>.

González, A., Bordon, M. G., Bustos, M. C., Salazar, K. L. C., Ribotta, P. D., & Martinez, M. L. (2021). Study of the incorporation of native and microencapsulated chia seed oil on pasta properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 56, 233–241.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.14623>.

González, A., Martínez, M. L., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2018). Effects on bread and oil quality after functionalization with microencapsulated chia oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 4903–4910. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9022>.

- Gowda, A., Sharma, V., Goyal, A., Singh, A. K., & Arora, S. (2018). Process optimization and oxidative stability of omega-3 ice cream fortified with flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, *55*, 1705–1715. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3083-4>.
- Goyal, A., Sharma, V., Sihag, M. K., Singh, A. K., Arora, S., & Sabikhi, L. (2016). Fortification of dahi (Indian yoghurt) with omega-3 fatty acids using microencapsulated flaxseed oil microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, *53*, 2422–2433. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2220-1>.
- Goyal, A., Sharma, V., Sihag, M. K., Singh, A. K., Arora, S., & Sabikhi, L. (2017). Oxidative stability of alpha-linolenic acid (ω -3) in flaxseed oil microcapsules fortified market milk. *International Journal of Dairy Technology*, *70*, 188–196. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12326>.
- Gulzar, S., Nilsuwan, K., Raju, N. & Benjakul, S. (2022). Whole wheat crackers fortified with mixed shrimp oil and tea seed oil microcapsules prepared from mung bean protein isolate and sodium alginate. *Foods*, *11*. <https://doi.org/10.3390/foods11020202>.
- Gumus, C. E., & Gharibzahedi, S. M. T. (2021). Yogurts supplemented with lipid emulsions rich in omega-3 fatty acids: New insights into the fortification, microencapsulation, quality properties, and health-promoting effects. *Trends in Food Science & Technology*, *110*, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.016>.
- Habibi, A., Keramat, J., Hojjatoleslami, M., & Tamjidi, F. (2017). Preparation of fish oil microcapsules by complex coacervation of gelatin–gum arabic and their utilization for fortification of pomegranate juice. *Journal of Food Process Engineering*, *40*, Article e12385. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12385>.
- Hasani, S., Ojagh, S. M., Hasani, M., & Ghorbani, M. (2019). Sensory and technological properties of developed functional bread enriched by microencapsulated fish oil. *Progress in Nutrition*, *21*, 406–415. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i1-S.6202>.
- Hastarini, E., Nabila, Napitupulu, R. J., & Poernomo, S. H. (2019). Characteristics of instant mushroom cream soup enriched with catfish oil microcapsules. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *292*, Article 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/292/1/012005>.
- Jamshidi, A., Cao, H., Xiao, J., & Simal-Gandaraf, J. (2020). Advantages of techniques to fortify food products with the benefits of fish oil. *Food Research International*, *137*, Article 109353. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109353>.
- Jeyakumari, A., Janarthanan, G., Chouksey, M. K., & Venkateshwarlu, G. (2016). Effect of fish oil encapsulates incorporation on the physico-chemical and sensory properties of cookies. *Journal of Food Science and Technology*, *53*, 856–863. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1981-2>.
- Jiménez-Martín, E., Pérez-Palacios, T., Carrascal, J. R., & Rojas, T. A. (2016). Enrichment of chicken nuggets with microencapsulated omega-3 fish oil: effect of frozen storage time on oxidative stability and sensory quality. *Food and Bioprocess Technology*, *9*, 285–297. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1621-x>.

- Kairam, N., Kandi, S., & Sharma, M. (2021). Development of functional bread with flaxseed oil and garlic oil hybrid microcapsules. *LWT - Food Science and Technology*, *136*, Article 110300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110300>.
- Kawecki, K., Rezler, R., Baranowska, H. M., & Stangierskia, J. (2021a). Influence of fish oil and microencapsulated fish oil additives on water binding and the rheological properties of poultry sausage batters. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*, 1127–1133. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10723>.
- Kawecki, K., Stangierski, J., & Konieczny, P. (2021b). An Analysis of Oxidative Changes and the Fatty Acid Profile in Stored Poultry Sausages with Liquid and Microencapsulated Fish Oil Additives. *Molecules*, *26*, Article 4293. <https://doi.org/10.3390/molecules26144293>.
- Kawecki, K., Stangierski, J., & Cegielska-Radziejewska, R. (2021c). The influence of packing methods and storage time of poultry sausages with liquid and microencapsulated fish oil additives on their physicochemical, microbial and sensory properties. *Sensors*, *21*. <https://doi.org/10.3390/s21082653>.
- Kolanowski, W., & Weißbrodt, J. (2008). Possibilities of fisherman's friend type lozenges fortification with omega-3 lc pufa by addition of microencapsulated fish oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *85*, 339–345. <https://doi-org.libproxy.viko.lt/10.1007/s11746-008-1203-4>.
- Kolanowski, W., Jaworska, D., Laufenberg, G., & Weißbrodt, J. (2007). Evaluation of sensory quality of instant foods fortified with omega-3 PUFA by addition of fish oil powder. *European Food Research and Technology*, *225*, 715–721. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0474-y>.
- Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Campagnol, P. C. B., & Domínguez, R. (2016). Healthy Spanish salchichón enriched with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. *Food Research International*, *89*, 289–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.012>.
- Makimori, R. Y., Endo, E. H., Makimori, J. W., Zanqueta, E. B., Ueda-Nakamura, T., Leimann, F. V., et al. (2020). Preparation, characterization and antidermatophytic activity of free-and microencapsulated cinnamon essential oil. *Journal de Mycologie Médicale*, *30*, Article 100933. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2020.100933>.
- Martin, L., Zarn, D., Hansen, A. M., Wismer, W., & Mazurak, V. (2008). Food products as vehicles for n-3 fatty acid supplementation. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*, *69*. <https://doi.org/10.3148/69.4.2008.203>.
- Morsy Dr., M. K., & Elsabagh Dr., R. (2021). Quality parameters and oxidative stability of functional beef burgers fortified with microencapsulated cod liver oil. *LWT - Food Science and Technology*, *142*, Article 110959. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110959>.
- Nasrin, T. A. A., & Anal, A. K. (2015). Enhanced oxidative stability of fish oil by encapsulating in culled banana resistant starch-soy protein isolate based microcapsules in functional bakery products. *Journal of Food Science and Technology*, *52*, 5120–5128. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1606-1>.

Nayana, N., Abraham, L. M., Ishwarya, S. P., & Nisha, P. (2021) Spray-dried microcapsules of red palm olein-flaxseed oil blend: Development, physicochemical characterization, and evaluation of its potential applications as a fat replacer and β -carotene fortificant in cupcakes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, Article e15663. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15663>.

Nielsen, N. S., & Jacobsen, C. (2009). Methods for reducing lipid oxidation in fish-oil-enriched energy bars. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 1536–1546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01786.x>.

Nielsen, N. S., & Jacobsen, C. (2011). Retardation of lipid oxidation in fish oil-enriched fish pâté – combination effects. *Journal of Food Biochemistry*, 37, 88–97. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2011.00605.x>.

Olson, R., Gavin-Smith, B., Ferraboschi, C., & Kraemer, K. (2021). Food fortification: the advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*, 13. <https://doi.org/10.3390/nu13041118>.

Organisation For Economic Co-Operation And Developmen. (2010). Guidance document on using cytotoxicity tests to estimate starting doses for acute oral systemic toxicity tests, No. 129. Paris: OECD, 2010. (OECD Environment, Health and Safety Publications. Series on Testing and Assessment, n. 129 - ENV/JM/MONO (2010) 20). Disponível em: <<http://iccvam.niehs.nih.gov/SuppDocs/FedDocs/OECD/OECD-GD129.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

Patel, A., Desai, S. S., Mane, V. K., Enman, J., Rova, U., Christakopoulos, P., et al. (2022). Futuristic food fortification with a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of lifestyle diseases. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.006>.

Pérez-Palacios, T., Ruiz-Carrascal, J., Jiménez-Martín, E., Solomando, J. C., & Antequera, T. (2018). Improving the lipid profile of ready-to-cook meat products by addition of omega-3 microcapsules: effect on oxidation and sensory analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 5302–5312. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9069>.

Pramestia, S. P., Riyanto, B., & Trilaksani, W. (2015). Mikroenkapsulasi minyak ikan kaya asam lemak omega-3 sebagai bahan fortifikasi pada sup krim keping instan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 18. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v18i2.10611>.

Rahmani-Manglano, N. E., González-Sánchez, I., García-Moreno, P. J., Espejo-Carpio, F. J., Jacobsen, C., & Guadix, E. M. (2020). Development of fish oil-loaded microcapsule containing whey protein hydrolysate as film-forming material for fortification of low-fat mayonnaise. *Foods*, 9. <https://doi.org/10.3390/foods9050545>.

Rios-Mera, J. D., Saldaña, E., Patinho, I., Selani, M. M., & Contreras-Castillo, C. J. (2021). Enrichment of NaCl-reduced burger with long-chain polyunsaturated fatty acids: Effects on physicochemical, technological, nutritional, and sensory characteristics. *Meat Science*, 177, Article 108497. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108497>.

Rojas, V. M., Marconi, L. F. da C. B., Guimarães-Inácio, A., Leimann, F. V., Tanamati, A., Gozzo, Â. M., et al. (2019). Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of

- microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils. *Food Chemistry*, 274, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.015>.
- Rojas, V. M., Inácio, A. G., Fernandes, I. P. M., Leimann, F. V., Gozzo, A. M., & Fuchs, R. H. B. (2020). Whey protein supplement as a source of microencapsulated PUFA-rich vegetable oils. *Food Bioscience*, 37, Article 100690. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100690>.
- Rubilar, M., Morales, E., Contreras, K., Ceballos, C., Acevedo, F., Villarroel, M., et al. (2012). Development of a soup powder enriched with microencapsulated linseed oil as a source of omega-3 fatty acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114, 423–433. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100378>.
- Rutz, J. K., Borges, C. D., Zambiazzi, R. C., Rosa, C. G., & Silva, M. M. (2016). Elaboration of microparticles of carotenoids from natural and synthetic sources for applications in food. *Food Chemistry*, 202, 324–333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.140>.
- Rutz, J. K., Borges, C. D., Zambiazzi, R. C., Crizel-Cardozo, M. M., Kuck, L. S., & Noreña, C. P. Z. (2017). Microencapsulation of palm oil by complex coacervation for application in food systems. *Food Chemistry*, 220, 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.194>.
- Santhanam, A. K., Lekshmi, M., Chouksey, M. K., Tripathi, G., & Gudipati, V. (2015). Delivery of omega-3 fatty acids into cake through emulsification of fish oil-in-milk and encapsulation by spray drying with added polymers. *Drying Technology*, 33, 83–91. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.934832>.
- Santos, P. D. de F., Rubio, F. T. V., Silva, M. P., Pinho, L. S., & Favaro-Trindade, C. S. (2021). Microencapsulation of carotenoid-rich materials: A review. *Food Research International*, 147, Article 110571. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110571>.
- Serna-Saldivar, S. O., Zorrilla, R., De La Parra, C., Stagnitti, G., & Abril, R. (2006). Effect of dha containing oils and powders on baking performance and quality of white pan bread. *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, 121–129. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0009-5>.
- Shen, Z., Apriani, C., Weerakkody, R., Sanguansri, L., & Augustin, M. A. (2011). Food matrix effects on in vitro digestion of microencapsulated tuna oil powder. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 8442–8449. <https://doi.org/10.1021/jf201494b>.
- Silva, L. C., Castelo, R. M., Magalhães, H. C. R., Furtado, R. F., Cheng, H. N. & Biswas, A. et al. (2022). Characterization and controlled release of pequi oil microcapsules for yogurt application. *LWT - Food Science and Technology*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113105>.
- Singh, H., Kumar, Y. & Meghwal, M. (2022). Encapsulated oil powder: Processing, properties, and applications. *Journal of Food Process Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14047>.
- Solomando, J. C., Antequera, T., & Perez-Palacios, T. (2020a). Lipid digestion and oxidative stability in ω -3-enriched meat model systems: Effect of fish oil microcapsules and processing or culinary cooking. *Food Chemistry*, 328, Article 127125. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127125>.

- Solomando, J. C., Antequera, T., González-Mohíno, A., & Perez-Palacios, T. (2020b). Fish oil/lycopene microcapsules as a source of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids: a case study on spreads. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*, 1875–1886. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10188>.
- Solomando, J. C., Antequera, T., & Pérez-Palacios, T. (2020c). Study on fish oil microcapsules as neat and added to meat model systems: Enrichment and bioaccessibility of EPA and DHA. *LWT - Food Science and Technology*, *120*, Article 108946. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108946>
- Solomando, J. C., Antequera, T., Ventanas, S., & Perez-Palacios, T. (2021). Sensory profile and consumer perception of meat products enriched with EPA and DHA using fish oil microcapsules. *International Journal of Food Science and Technology*, *56*, 2926–2937. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14932>.
- Sridhar, K., Sharma, M., Choudhary, A., Dikkala, P. K., & Narsaiah, K. (2021). Fish and garlic oils hybridized microcapsules: Fortification in functional bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*, Article e15346. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15346>.
- Srivastava, S., & Mishra, H. N. (2021). Development of microencapsulated vegetable oil powder based cookies and study of its physicochemical properties and storage stability. *LWT - Food Science and Technology*, *152*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112364>.
- Stangierski, J., Rezler, R., Kawecki, K., & Peplińska, B. (2020). Effect of microencapsulated fish oil powder on selected quality characteristics of chicken sausages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*, 2043–2051. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10226>.
- Suwannasang, S., Zhong, Q., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Uttapap, D. & Puttanlek, C. et al. (2022). *LWT - Food Science and Technology*, *161*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113375>.
- Taguchi, K., Iwami, K., Ibuki, F., & Kawabata, M. (1992). Oxidative stability of sardine oil embedded in spray-dried egg white powder and its use for n-3 unsaturated fatty acid fortification of cookies. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, *56*, 560–563. <http://dx.doi.org/10.1271/bbb.56.560>.
- Takeungwongtrakul, S., Benjakul, S., & H-kittikun, A. (2015). Characteristics and oxidative stability of bread fortified with encapsulated shrimp oil. *Italian Journal of Food Science*, *27*, 476–486. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v380>.
- Takeungwongtrakul, S., & Benjakul, S. (2017). Biscuits fortified with micro-encapsulated shrimp oil: characteristics and storage stability. *Journal of Food Science and Technology*, *54*, 1126–1136. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2545-4>.
- Tamjidi, F., Nasirpour, A., & Shahedi, M. (2011). Physicochemical and sensory properties of yogurt enriched with microencapsulated fish oil. *Food Science and Technology International*, *18*, 381–390. <https://doi.org/10.1177/1082013211428212>.
- Trilaksani, W., Riyanto, B., & Syifa, A. L. (2020). Extraction and microencapsulation of tuna virgin fish oil with mangrove fruit extract fortified into extrusion cereals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *420*, Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/420/1/012032>.

- Ullah, R., Nadeem, M., Imran, M., Khan, M. K., Mushtaq, Z., Asif, M., et al. (2020). Effect of microcapsules of chia oil on Ω -3 fatty acids, antioxidant characteristics and oxidative stability of butter. *Lipids in Health and Disease*, 19. <https://doi.org/10.1186/s12944-020-1190-5>.
- Umesha, S. S., Manohar, R. S., Indiramma, A. R., Akshitha, S., & Naidu, K. A. (2015). Enrichment of biscuits with microencapsulated omega-3 fatty acid (Alpha-linolenic acid) rich Garden cress (*Lepidium sativum*) seed oil: Physical, sensory and storage quality characteristics of biscuits. *LWT - Food Science and Technology*, 62, Article 654e661. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.018>.
- Villamil, R.-A., Guzman, M.-P., Ojeda-Arredondo, M., Cortes, L. Y., Archila, E. G., Giraldo, A., et al. Cheese fortification through the incorporation of UFA-rich sources: A review of recent (2010-2020) evidence. *Heliyon*, 6, Article e05785. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05785>.
- Vishnu, K. V., Kumar, K. K. A., Chatterjee, N. S., Lekshmi, R. G. K., Sreerexha, P. R., Mathew, S., et al. (2018). Sardine oil loaded vanillic acid grafted chitosan microparticles, a new functional food ingredient: attenuates myocardial oxidative stress and apoptosis in cardiomyoblast cell lines (H9c2). *Cell Stress and Chaperones*, 23, 213–222. <https://doi.org/10.1007/s12192-017-0834-5>.
- Walia, M., Rawat, K., Bhushan, S., Padwad, Y. S., & Singh, B. (2014). Fatty acid composition, physicochemical properties, antioxidant and cytotoxic activity of apple seed oil obtained from apple pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 929–934. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6337>.
- Wallace, J. M. W., McCabe, A. J., Robson, P. J., Keogh, M. K., Murray, C. A., Kelly, P. M., et al. (2000). Bioavailability of n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) in foods enriched with microencapsulated fish oil. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 44, 157–162. <https://doi.org/10.1159/000012839>.
- Yep, Y. L., Li, D., Mann, N. J., Bode, O., & Sinclair, A. J. (2002). Bread enriched with microencapsulated tuna oil increases plasma docosahexaenoic acid and total omega-3 fatty acids in humans. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 11, 285–291. <https://doi.org/10.1046/j.1440-6047.2002.00309.x>.
- Zhao, X.-H., & Tang, C.-H. (2016). Spray-drying microencapsulation of CoQ10 in olive oil for enhanced water dispersion, stability and bioaccessibility: Influence of type of emulsifiers and/or wall materials. *Food Hydrocolloids*, 61, 20–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.04.045>.