

Nigella sativa L.: PRODUÇÃO AGRÁRIA, COMPOSTOS BIOATIVOS E APLICAÇÕES EM ALIMENTOS FUNCIONAIS COM ABORDAGEM DE EYE-TRACKING E EXPERIMENT BUILDER

Nigella sativa L.: AGRICULTURAL PRODUCTION, BIOACTIVE COMPOUNDS, AND APPLICATIONS IN FUNCTIONAL FOODS USING AN EYE-TRACKING AND EXPERIMENT BUILDER APPROACH

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.030-004>

Eliena da Silva Gomes
 Doutora em Ciências de Alimentos
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-4459>

Andrea Cecilia Broncano Maltese
 Mestranda em Ciência e Tecnologia de Alimentos
 Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0488-9272>

Bianca Pazinato
 Mestranda em Ciência de Alimentos
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8534-2502>

Deborah Heloise Fernandes Machado
 Mestranda em Biociências e Fisiopatologia
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6327-3657>

Gabrieli de França Tonhão
 Engenheira de Alimentos
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3055-9342>

Isadora Maria Melo Torres
 Engenheira de Alimentos
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5478-9748>

Julie Suzan da Silva
 Mestranda em Engenharia de Alimentos
 Universidade Estadual de Maringá - UEM
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9258-5404>



Luana Moraes Antonini

Doutoranda em Ciências de Alimentos

Universidade Estadual de Maringá - UEM

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5462-7242>

Simone Maria Altoé Porto

Doutoranda em Ciências de Alimentos

Universidade Estadual de Maringá - UEM

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8182-9199>

RESUMO

A Nigella sativa L., conhecida popularmente como cominho-preto, tem despertado crescente interesse na Ciência de Alimentos devido ao seu elevado potencial funcional .Este capítulo teve como objetivo analisar os principais aspectos relacionados à composição bioativa e aplicações tecnológicas da *Nigella sativa L.* como alimento funcional, integrando uma abordagem inovadora de análise do consumidor por meio do uso do Eye-Tracking aliado ao software Experiment Builder. A metodologia adotada consistiu em uma revisão narrativa da literatura científica, contemplando estudos sobre cultivo, condições edafoclimáticas, colheita, pós-colheita, composição química, processamento e incorporação da *Nigella sativa L.*, em matrizes alimentares funcionais, bem como pesquisas que empregam técnicas de rastreamento ocular na avaliação de rótulos e alegações nutricionais. Os resultados evidenciam que fatores agronômicos e tecnológicos influenciam diretamente a qualidade da matéria-prima e a concentração de compostos bioativos, com destaque para a timoquinona, os ácidos graxos essenciais e os compostos fenólicos, associados à elevada atividade antioxidante e a efeitos benéficos à saúde. Adicionalmente, a aplicação do Eye-Tracking permite compreender de forma objetiva a atenção visual e a percepção do consumidor frente às informações nutricionais e funcionais, contribuindo para o desenvolvimento de produtos mais eficazes . Conclui-se que a *Nigella sativa L.* apresenta elevado potencial como ingrediente funcional, sendo a integração entre produção agrícola, tecnologia de alimentos e análise do comportamento do consumidor uma estratégia promissora para inovação, sustentabilidade e promoção da saúde.

Palavras-chave: *Nigella sativa L.*; Alimentos funcionais; Compostos bioativos; Eye-Tracking; Comportamento do consumidor.

ABSTRACT

Nigella sativa L., commonly known as black cumin, has attracted growing interest in food science due to its high functional potential. This chapter aimed to analyze the main aspects related to the bioactive composition and technological applications of *Nigella sativa L.* as a functional food, integrating an innovative approach to consumer analysis through the use of eye tracking combined with Experiment Builder software. The methodology adopted consisted of a narrative review of the scientific literature, covering studies on cultivation, soil and climate conditions, harvesting, post-harvesting, chemical composition, processing, and incorporation of *Nigella sativa L.* into functional food matrices, as well as research employing eye-tracking techniques in the evaluation of labels and nutritional claims. The results show that agronomic and technological factors directly influence the quality of the raw material and the concentration of bioactive compounds, with emphasis on thymoquinone, essential fatty acids, and phenolic compounds, associated with high antioxidant activity and beneficial health effects. Additionally, the application of Eye-Tracking allows for an objective understanding of consumer visual attention and perception of nutritional and functional information, contributing to the development of more effective products. It is concluded that *Nigella sativa L.* has high potential as a functional ingredient, and that the integration of agricultural production, food technology, and consumer behavior analysis is a promising strategy for innovation, sustainability, and health promotion.



Keywords: *Nigella sativa L.*; Functional foods; Bioactive compounds; Eye-Tracking; Consumer behavior.

Ciências Agrárias: Teoria e Prática

Nigella sativa L.: PRODUÇÃO AGRÁRIA, COMPOSTOS BIOATIVOS E APLICAÇÕES EM ALIMENTOS FUNCIONAIS COM ABORDAGEM DE EYE-TRACKING E EXPERIMENT BUILDER



1 INTRODUÇÃO

A *Nigella sativa L.*, conhecida popularmente como cominho-preto, é uma espécie vegetal pertencente à família Ranunculaceae que tem despertado crescente interesse na ciência de alimentos e devido ao seu elevado potencial funcional e às suas múltiplas aplicações ao longo da cadeia produtiva. Muito utilizada na culinária e na medicina tradicional em diferentes culturas, essa espécie vem sendo investigada como fonte natural de compostos bioativos capazes de promover benefícios à saúde além da nutrição básica (Ali; Blunden, 2003; Butt; Sultan, 2010; Alu'Datt et al., 2024).

Estudos científicos demonstram que as sementes de *Nigella sativa L.*, apresentam uma complexa composição fitoquímica, contendo óleos fixos e voláteis, compostos fenólicos, alcaloides, saponinas e ácidos graxos essenciais. Entre esses constituintes, destaca-se a timoquinona, considerada o principal marcador bioativo da espécie, associada a atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas, o que reforça seu potencial como ingrediente funcional em alimentos destinados à promoção da saúde (Hassanien et al., 2015; Randhawa; Al-Ghazzewy, 2011; Shahidi; Ambigaipalan, 2015).

Apesar do reconhecimento de seus benefícios, a qualidade funcional da *Nigella sativa L.*, pode ser significativamente influenciada por fatores agronômicos e ambientais, como condições edafoclimáticas, manejo agrícola, estágio de colheita e práticas de pós-colheita. Esses fatores interferem diretamente na concentração e estabilidade dos metabólitos secundários, impactando a funcionalidade e a padronização da matéria-prima destinada à aplicação em alimentos funcionais (Hefnawy; Ramadan, 2013; Khan; Shaikh, 2025).

Dessa maneira na cadeia produtiva de alimentos funcionais, torna-se essencial compreender a integração entre produção agrícola sustentável, processamento tecnológico e preservação dos compostos bioativos. Assim práticas inadequadas de processamento, armazenamento e incorporação em matrizes alimentares podem resultar em perdas significativas de compostos sensíveis, como a timoquinona, comprometendo a eficácia funcional dos produtos desenvolvidos (Rodriguez Amaya, 2016; Granato et al., 2020).

Além dos avanços relacionados à produção agrária, à caracterização fitoquímica e às aplicações tecnológicas da *Nigella sativa L.*, estudos recentes têm destacado a importância de compreender como as informações associadas aos alimentos funcionais são percebidas e processadas pelos consumidores. Nesse contexto, abordagens metodológicas oriundas da ciência cognitiva e do comportamento do consumidor, como o Eye-Tracking, têm sido incorporadas à Nutrição e à Ciência de Alimentos como ferramentas objetivas para a análise da atenção visual e da tomada de decisão alimentar (Wedel; Pieters, 2008; Orquin; Mueller Loose, 2013).

O Eye-Tracking consiste no rastreamento dos movimentos oculares, permitindo identificar áreas de interesse visual, tempo de fixação e padrões de varredura do olhar diante de estímulos como rótulos

nutricionais, embalagens e alegações funcionais. Diferentemente de métodos autorrelatados, essa técnica fornece dados objetivos sobre o comportamento visual do consumidor, reduzindo vieses cognitivos e ampliando a compreensão dos processos de escolha alimentar (Holmqvist et al., 2011; Orquin; Mueller Loose, 2013).

A aplicação do Eye-Tracking na Nutrição tem sido amplamente explorada em estudos sobre rotulagem nutricional, alimentos funcionais e comunicação de benefícios à saúde, evidenciando que a atenção visual direcionada a informações específicas influencia significativamente a compreensão do produto e a intenção de compra (Bialkova et al., 2014; Van Herpen; Van Trijp, 2011). Nesse cenário, o uso de softwares especializados, como o Experiment Builder, permite a construção de experimentos controlados e reproduzíveis, assegurando a apresentação padronizada dos estímulos visuais e a definição precisa de áreas de interesse, o que confere maior rigor metodológico às pesquisas baseadas em rastreamento ocular (Holmqvist et al., 2011).

Figura 1. *Nigella sativa L.* (planta inteira, flor e sementes)



Fonte: (Ahmad, et al.,2013)

No contexto dos alimentos funcionais, como aqueles desenvolvidos a partir da *Nigella sativa L.*, a integração do Eye-Tracking aliado ao Experiment Builder possibilita avaliar se informações relacionadas à presença de compostos bioativos, como a timoquinona, são efetivamente percebidas pelo consumidor. Dessa forma, essa abordagem contribui para a otimização da comunicação nutricional, para o desenvolvimento de produtos mais transparentes e para o fortalecimento da interface entre ciência de alimentos, nutrição e comportamento do consumidor (WedeL; Pieters, 2008; Bialkova et al., 2014).

Diante desse contexto, o problema de pesquisa deste trabalho concentra-se na necessidade de compreender como os aspectos agronômicos, fitoquímicos e tecnológicos influenciam a qualidade funcional da *Nigella sativa L.* e sua aplicação como ingrediente em alimentos funcionais, bem como de analisar como as informações associadas a esses produtos são percebidas pelo consumidor.

Ciências Agrárias: Teoria e Prática



O objetivo geral consiste em apresentar a *Nigella sativa L.* como uma matéria-prima estratégica para alimentos funcionais, destacando seu cultivo, composição bioativa, aplicações tecnológicas e os desafios relacionados à estabilidade e biodisponibilidade da timoquinona, integrando uma abordagem complementar de análise do comportamento do consumidor por meio do uso do Eye-Tracking aliado ao software Experiment Builder.

A relevância deste estudo fundamenta-se na crescente demanda por alimentos mais saudáveis, inovadores e sustentáveis, aliada à necessidade de estratégias eficazes de comunicação nutricional que favoreçam a compreensão e a aceitação de alimentos funcionais pelo consumidor (Siró et al., 2008; Bigliardi; Galati, 2013; Wedel; Pieters, 2008; Alu'Datt et al., 2024).

2 METODOLOGIA

2.1 TIPO DE PESQUISA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, uma revisão narrativa da literatura.

2.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico no período de 2000 a 2025, em bases de dados científicas nacionais e internacionais, incluindo artigos científicos, livros e revisões, especializadas que abordam o cultivo, a composição bioativa, o processamento e as aplicações da *Nigella sativa L.* e o uso do Eye-Tracking aliado ao software Experiment Builder.

2.3 ANÁLISE E ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES

Os estudos selecionados foram analisados de forma crítica e organizados em categorias temáticas, contemplando aspectos agronômicos, fitoquímicos e tecnológicos. A discussão foi fundamentada na literatura científica, buscando estabelecer relações entre produção agrícola, qualidade funcional e aplicação em alimentos.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 *Nigella sativa L.*

A *Nigella sativa L.* é uma planta herbácea anual pertencente à família *Ranunculaceae*, amplamente conhecida como cominho-negro ou black cumin. A espécie é nativa do sudoeste da Ásia e da região do Mediterrâneo, sendo atualmente cultivada em diversas partes do mundo, incluindo Oriente Médio, Norte da África, Sul da Europa e Ásia Meridional. A planta apresenta caule ereto, ramificado, folhas finamente



divididas e flores geralmente azuladas ou brancas, características morfológicas típicas do gênero *Nigella* (Dalli et al., 2022).

Do ponto de vista botânico, a *Nigella sativa L.* produz frutos do tipo cápsula, contendo numerosas sementes pequenas, ovais e de coloração preta, que constituem a principal parte de interesse agronômico e tecnológico. Essas sementes são tradicionalmente utilizadas como especiaria alimentar e como matéria-prima para extração de óleo, sendo reconhecidas por seu aroma característico e sabor levemente amargo. A relevância econômica da espécie está diretamente associada ao uso das sementes tanto na alimentação quanto na indústria de produtos naturais e funcionais (Botnariu; Alexa, 2021).

Quimicamente, as sementes de *Nigella sativa L.* apresentam uma composição rica e diversificada, incluindo óleo fixo (30–40%), óleo essencial, proteínas, carboidratos, fibras alimentares, vitaminas e minerais. O óleo fixo é caracterizado pela predominância de ácidos graxos insaturados, especialmente ácido linoleico e oleico, enquanto o óleo essencial contém compostos bioativos voláteis responsáveis pelas propriedades funcionais da espécie. Essa composição confere à *N. sativa* elevado potencial para aplicações alimentares e nutracêuticas (Hefnawy; Ramadan, 2013).

Entre os compostos bioativos presentes no óleo essencial de *Nigella sativa L.* destaca-se a timoquinona, considerada o principal marcador funcional da espécie. Além da timoquinona, outros constituintes relevantes incluem timohidroquinona, ditimoquinona, p-cimeno, carvacrol e timol, os quais contribuem de forma sinérgica para as propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas atribuídas às sementes. A concentração desses compostos pode variar em função de fatores genéticos, ambientais e agronômicos, bem como das condições de processamento (Forouzanfar et al., 2014).

3.2 CULTIVO E MANEJO AGRÍCOLA DA *Nigella sativa L.*

O cultivo da *Nigella sativa L.* tem sido considerado tecnicamente viável em diferentes regiões, sobretudo em ambientes de clima temperado a semiárido, devido à sua relativa rusticidade e adaptação a condições moderadas de estresse hídrico. A espécie apresenta ciclo anual e desenvolvimento satisfatório quando submetida a temperaturas amenas durante o crescimento vegetativo, sendo sensível a excesso de umidade no período de maturação das sementes. Essas características agronômicas tornam a planta uma cultura promissora para sistemas produtivos diversificados, especialmente em contextos de agricultura familiar e produção de insumos para alimentos funcionais (Ali; Bunden, 2003; Butt; Sultan, 2010).

No que se refere às exigências edáficas, a *Nigella sativa L.* desenvolve-se adequadamente em solos bem drenados, de textura média, com pH variando de levemente ácido a neutro. A adequada estrutura física do solo favorece o crescimento radicular e a absorção de nutrientes, refletindo positivamente na produtividade e na qualidade fitoquímica das sementes. Estudos indicam que solos compactados ou com drenagem deficiente podem comprometer o desenvolvimento da planta e reduzir o teor de óleo e de



compostos bioativos, evidenciando a importância do preparo adequado do solo antes da semeadura (Hefnawy; Ramadan, 2013; Sultan et al., 2021).

O manejo da semeadura constitui etapa crítica no cultivo da *Nigella sativa L.*, sendo recomendada a semeadura direta, com espaçamento e densidade ajustados para evitar competição excessiva entre plantas. A profundidade de semeadura deve ser controlada, uma vez que sementes excessivamente profundas podem apresentar emergência irregular. A uniformidade do estande influencia diretamente o rendimento da cultura e a homogeneidade da matéria-prima, aspectos relevantes quando o objetivo é a aplicação das sementes em produtos alimentícios funcionais (Randhawa; Al-Ghazzewy, 2011; Gholamnezhad et al., 2016).

A adubação deve ser baseada em análises químicas do solo, priorizando o equilíbrio nutricional e evitando excessos, especialmente de nitrogênio. Evidências científicas sugerem que a adubação nitrogenada excessiva pode favorecer o crescimento vegetativo em detrimento da síntese de metabólitos secundários, reduzindo a concentração de compostos bioativos como a timoquinona. Assim, o manejo nutricional da *Nigella sativa* deve considerar não apenas a produtividade, mas também a qualidade funcional das sementes, alinhando-se aos princípios das Ciências Agrárias voltadas à produção de alimentos com valor agregado (Hefnawy; Ramadan, 2013; Shahidi; Ambigaipalan, 2015).

O controle de plantas daninhas, pragas e doenças na cultura da *Nigella sativa L.* pode ser realizado por meio de práticas de manejo integrado, com ênfase em métodos preventivos e culturais. A adoção de rotação de culturas, preparo adequado do solo e monitoramento constante reduz a necessidade de insumos químicos, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo e para a segurança da matéria-prima destinada à alimentação humana. Essa abordagem é especialmente relevante quando se considera o uso da *N. sativa L.* como ingrediente funcional, uma vez que resíduos químicos podem comprometer sua aceitação e aplicabilidade tecnológica (Bigliardi; Galati, 2013; Granato et al., 2020).

Sua colheita deve ser realizada quando as cápsulas atingem a maturação fisiológica, momento em que as sementes apresentam maior teor de óleo e estabilidade dos compostos bioativos. A colheita tardia pode resultar em perdas por degrana, enquanto a colheita precoce compromete a qualidade química das sementes. Após a colheita, práticas adequadas de secagem e armazenamento são fundamentais para preservar a funcionalidade da matéria-prima, reforçando a importância do manejo agrícola integrado ao longo de toda a cadeia produtiva (Hefnawy; Ramadan, 2013; Rodriguez-Amaya, 2016).

Dessa forma, o cultivo e o manejo agrícola exercem influência direta sobre a produtividade, a qualidade fitoquímica e o potencial funcional das sementes. A adoção de práticas agronômicas adequadas permite maximizar o acúmulo de compostos bioativos e garantir matéria-prima de elevada qualidade para aplicação em alimentos funcionais.(Siró et al., 2008; Granato et al., 2020).

Ciências Agrárias: Teoria e Prática



3.3 COMPOSTOS BIOATIVOS DA *Nigella sativa L.*: TIMOQUINONA EM FOCO

A *Nigella sativa L.* é reconhecida por sua rica composição em compostos bioativos, os quais conferem à espécie elevado potencial funcional e interesse científico crescente. As sementes constituem a principal fonte desses compostos, apresentando uma matriz complexa formada por óleos fixos e voláteis, ácidos graxos insaturados, alcaloides, saponinas, flavonoides e compostos fenólicos. Essa diversidade fitoquímica fundamenta as múltiplas propriedades biológicas atribuídas à espécie e justifica sua aplicação tanto na alimentação quanto no desenvolvimento de ingredientes funcionais e nutracêuticos (Ali; Blunden, 2003; Butt; Sultan, 2010).

Entre os constituintes bioativos, a timoquinona destaca-se como o principal composto responsável por grande parte das atividades biológicas relatadas na literatura científica. Trata-se de uma quinona monoterpênica presente majoritariamente no óleo essencial das sementes, cuja concentração pode variar de acordo com fatores genéticos, ambientais e tecnológicos. A timoquinona tem sido amplamente investigada devido às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas e moduladoras de vias metabólicas, o que a posiciona como marcador funcional da qualidade bioativa da *N. sativa* (Randhawa; Al-Ghazzewy, 2011; Gholamnezhad et al., 2016).

Do ponto de vista bioquímico, a atividade antioxidante da timoquinona está associada à sua capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio e de modular sistemas endógenos de defesa antioxidante. Esses mecanismos são particularmente relevantes no contexto da prevenção do estresse oxidativo, processo intimamente relacionado ao desenvolvimento de doenças crônicas não transmissíveis. Estudos experimentais demonstram que a presença da timoquinona contribui significativamente para a capacidade antioxidante total das sementes de *Nigella sativa*, reforçando seu valor como componente funcional em matrizes alimentares (Forouzanfar et al., 2014; Shahidi; Ambigaipalan, 2015).

Além da timoquinona, outros compostos bioativos presentes na *Nigella sativa L.* contribuem de forma sinérgica para sua funcionalidade, incluindo ácidos graxos essenciais como ácido linoleico e oleico, além de compostos fenólicos e terpenos voláteis, como p-cimeno e carvacrol. Essa interação entre diferentes classes de metabólitos secundários potencializa os efeitos biológicos observados e amplia as possibilidades de aplicação da espécie em alimentos funcionais, uma vez que a funcionalidade não se limita a um único composto isolado, mas ao conjunto fitoquímico presente na matéria-prima (Hefnawy; Ramadan, 2013; Granato et al., 2020).

A concentração e a estabilidade da timoquinona e dos demais compostos bioativos da *Nigella sativa* são fortemente influenciadas pelas condições de produção agrária e pelos métodos de processamento. Fatores como manejo agrícola, estágio de maturação das sementes, técnicas de extração e condições de armazenamento podem promover degradação oxidativa ou perdas significativas desses compostos. Dessa forma, a preservação da timoquinona ao longo da cadeia produtiva constitui um desafio tecnológico e

agrário, exigindo estratégias integradas que considerem desde o cultivo até a aplicação final em produtos alimentícios funcionais (Hefnawy; Ramadan, 2013; Rodriguez-Amaya, 2016).

Em relação a ciências de alimentos, o estudo da timoquinona como composto bioativo de referência permite compreender a *Nigella sativa L.* não apenas como uma cultura agrícola, mas como uma fonte estratégica de ingredientes funcionais. A valorização desse composto está alinhada às tendências contemporâneas de desenvolvimento de alimentos com benefícios à saúde, reforçando a necessidade de abordagens interdisciplinares que integrem produção sustentável, qualidade fitoquímica e inovação tecnológica (Siró et al., 2008; Bigliardi; Galati, 2013).

3.4 APLICAÇÕES DA *Nigella sativa L.* EM ALIMENTOS FUNCIONAIS

A aplicação da *Nigella sativa L.* em alimentos funcionais tem despertado crescente interesse científico e tecnológico, principalmente em função de sua composição rica em compostos bioativos e de seu histórico de uso alimentar tradicional. As sementes inteiras, moídas ou na forma de óleo têm sido incorporadas a diferentes matrizes alimentares com o objetivo de agregar valor nutricional e funcional aos produtos. Nesse contexto, a *N. sativa L.* destaca-se como ingrediente natural capaz de conferir propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas, atendendo à demanda crescente por alimentos que promovam benefícios à saúde além da nutrição básica (Butti; Sultan, 2010; Bigliardi; Galati, 2013).

Entre as principais formas de aplicação da *Nigella sativa L.* em alimentos funcionais, destaca-se o uso do óleo extraído das sementes, o qual apresenta elevada concentração de ácidos graxos insaturados e timoquinona. Esse óleo tem sido explorado na formulação de produtos como pães, biscoitos, produtos lácteos, bebidas funcionais e suplementos alimentares, contribuindo para o aumento da capacidade antioxidante e para a melhoria do perfil lipídico dos alimentos. Estudos indicam que a incorporação do óleo de *Nigella sativa L.* em níveis adequados pode resultar em produtos tecnologicamente viáveis e com potencial funcional significativo (Ali; Blunden, 2003; Forouzanfar et al., 2014).

A utilização das sementes moídas de *Nigella sativa L.* também representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de alimentos funcionais, especialmente em produtos de panificação e cereais. Além de atuar como fonte de compostos bioativos, as sementes contribuem para o aumento do teor de fibras e compostos fenólicos, podendo influenciar positivamente a digestibilidade e a resposta antioxidante do alimento. No entanto, aspectos sensoriais, como sabor e aroma intensos, devem ser cuidadosamente avaliados para garantir a aceitação do consumidor, evidenciando a necessidade de equilíbrio entre funcionalidade e qualidade sensorial (Shahidi; Ambigaipalan, 2015; Granato et al., 2020).

No contexto tecnológico, a estabilidade dos compostos bioativos da *Nigella sativa L.*, especialmente da timoquinona, constitui um dos principais desafios para sua aplicação em alimentos funcionais. Processos como aquecimento, exposição à luz e oxidação podem promover a degradação desses compostos, reduzindo



sua eficácia funcional. Assim, estratégias como microencapsulação, uso de embalagens adequadas e controle das condições de processamento têm sido estudadas como alternativas para preservar a funcionalidade da *N. sativa L.* ao longo da vida de prateleira dos produtos alimentícios (Rodriguez-Amaya, 2016; Granato et al., 2020).

Além das aplicações diretas em alimentos convencionais, a *Nigella sativa L.* tem sido explorada no desenvolvimento de alimentos funcionais voltados a públicos específicos, como produtos destinados à prevenção de distúrbios metabólicos e à promoção da saúde intestinal. Evidências científicas sugerem que seus compostos bioativos podem atuar na modulação do metabolismo lipídico e glicídico, bem como na redução de processos inflamatórios, o que amplia suas possibilidades de aplicação em formulações com alegações funcionais. Essas aplicações reforçam o potencial da *N. sativa L.* como ingrediente estratégico no desenvolvimento de alimentos com apelo à saúde (Siró et al., 2008; Randhawa; Al-Ghazzewy, 2011).

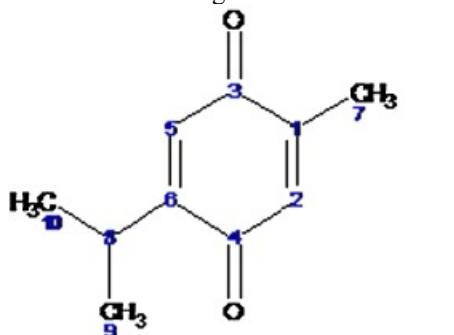
Dessa forma, a sua incorporação em alimentos funcionais representa uma alternativa inovadora e sustentável para agregação de valor à produção agrícola, ao mesmo tempo em que atende às demandas contemporâneas por alimentos mais saudáveis (Granato et al., 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

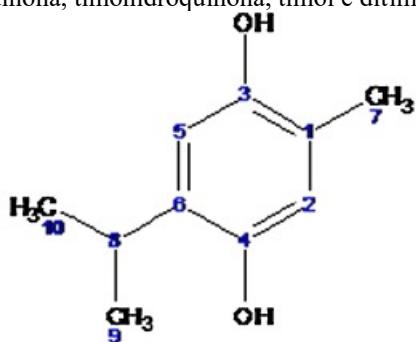
Os resultados obtidos na literatura indicam que as propriedades físico-químicas do óleo de *Nigella sativa L.* variam significativamente conforme o método de extração utilizado. Estudos comparativos entre extração por fluidos supercríticos, prensa a frio e métodos convencionais demonstraram diferenças claras na composição de compostos bioativos, como a timoquinona, fenóis totais e capacidade antioxidante, evidenciando que técnicas menos agressivas preservam melhor os constituintes funcionais. Esse comportamento ressalta a importância de escolha adequada de tecnologia para manter o potencial funcional do óleo extraído (Abedinzadeh et al., 2023; Tiruppur Venkatachallam et al., 2010).

A análise química detalhada de extratos de *Nigella sativa L.*, por técnicas como GC-MS e NMR revelou a presença de compostos voláteis e fenólicos, incluindo timoquinona, ditimoquinona, timohidroquinona e outros metabólitos ainda pouco explorados em sua totalidade. Essas descobertas ampliam o conhecimento sobre o perfil fitoquímico da planta e sua diversidade metabólica, apontando caminhos para futuras aplicações em alimentos funcionais e ingredientes bioativos (Tiruppur Venkatachallam et al., 2010).

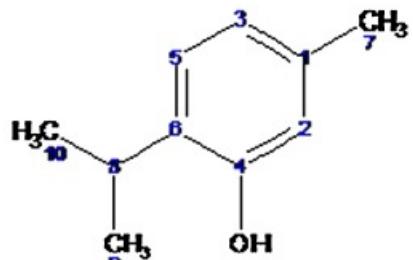
Figura 2. Estruturas da timoquinona, timohidroquinona, timol e ditimoquinona



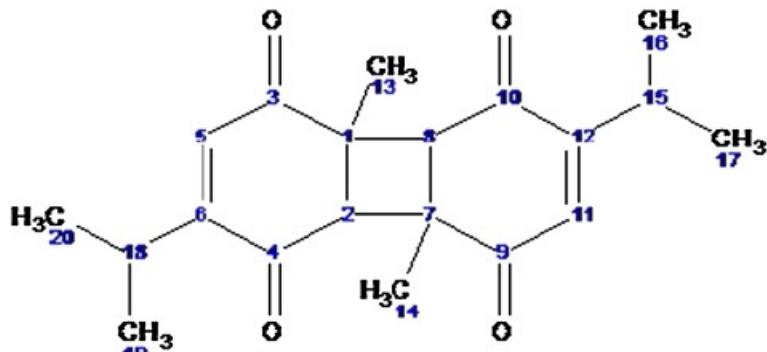
Timoquinona (TQ)



Timohidroquinona (THQ)



Timol (THY)



Ditimoquinona (DTQ)

Fonte: (Tiruppur Venkatachallam, et al.,2010)

Em relação à atividade antioxidante, diferentes estudos demonstraram que os extratos e óleos de *Nigella sativa L.* exibem forte capacidade de neutralização de radicais livres e redução de estresse oxidativo, atribuída tanto à timoquinona quanto a outros componentes fenólicos e terpenoides. Essa propriedade tem implicações diretas na saúde humana, pois mecanismos antioxidantes estão associados à mitigação de doenças crônicas e processos inflamatórios (Ahmad et al., 2021).

Adicionalmente, pesquisas recentes exploraram a influência de tratamentos térmicos e processamento físico sobre as propriedades bioativas da *Nigella sativa L.* observando que técnicas como processamento por micro-ondas podem alterar significativamente os índices de qualidade do óleo, a estabilidade de esteróis, tocoferóis e compostos antioxidantes. Isso demonstra a importância de otimizar parâmetros de processamento para manter a funcionalidade dos componentes durante a produção de alimentos e ingredientes (Oubannin et al., 2024).

Por fim, abordagens inovadoras, como a incorporação de extratos de *Nigella sativa L.* em materiais funcionais, mostram potenciais aplicações além da alimentação, por exemplo na formulação de filmes com propriedades antimicrobianas e antioxidantes. Esses avanços tecnológicos apontam para a versatilidade dos



compostos bioativos da espécie, reforçando sua importância como recurso funcional em diferentes setores (Hashempur et al., 2025).

Nigella sativa L. possui atributos funcionais e em conjunto com a aplicação do Eye-Tracking aliado ao software Experiment Builder surge como uma ferramenta complementar para avaliar se os benefícios associados à *Nigella sativa L.* são visualmente percebidos e compreendidos, contribuindo para o alinhamento entre qualidade tecnológica, comunicação nutricional e aceitação de alimentos funcionais.

5 CONCLUSÃO

Conclui que *Nigella sativa L.* possui elevado potencial para o desenvolvimento de alimentos funcionais, devido a sua composição bioativa, com destaque para a timoquinona, que apresenta várias possibilidades de aplicação. Nota-se que os resultados reforçam o seu processamento e a qualidade funcional e a estabilidade dos compostos bioativos.

Adicionalmente, a incorporação de abordagens complementares, como o Eye-Tracking aliado ao software Experiment Builder, amplia a compreensão sobre a percepção do consumidor frente às informações nutricionais e funcionais, contribuindo para estratégias mais eficazes de comunicação, inovação e aceitação de alimentos funcionais.

Dessa forma, a integração entre produção agrícola, tecnologia de alimentos e análise do comportamento do consumidor mostra-se fundamental para o desenvolvimento de produtos mais saudáveis, transparentes e alinhados às demandas do mercado.



REFERÊNCIAS

ABEDINZADEH, Solmaz et al. Effect of refining on the quality of oils extracted by cold press from black cumin (*Nigella sativa L.*) seed and by solvent from its cake. International Journal of Food Science and Technology, v. 58, n. 12, p. 6475-6484, 2023.

AGRICULTURAL SCIENCE. Cultivation of Black Cumin: Black cumin (*Nigella sativa*) is an erect-stemmed annual herb. Just Agriculture, v. 4, n. 5, p. 83-85, 2024.

AHMAD, Aftab et al. A review on therapeutic potential of *Nigella sativa L.*: A miracle herb. Asian Pacific journal of tropical biomedicine, v. 3, n. 5, p. 337-352, 2013.

AHMAD, Md Faruque et al. An updated knowledge of Black seed (*Nigella sativa Linn.*): Review of phytochemical constituents and pharmacological properties. Journal of herbal medicine, v. 25, p. 100404, 2021.

ALBAKRY, Zainab et al. Nutritional composition and volatile compounds of black cumin (*Nigella sativa L.*) seed, fatty acid composition and tocopherols, polyphenols, and antioxidant activity of its essential oil. Horticulturae, v. 8, n. 7, p. 575, 2022.

ALI, B. H.; BLUNDEN, Gerald. Pharmacological and toxicological properties of *Nigella sativa*. Phytotherapy Research: An international journal devoted to pharmacological and toxicological evaluation of natural product derivatives, v. 17, n. 4, p. 299-305, 2003.

ALU'DATT, M. H.; RABABAH, T.; ALHAMAD, M. N.; et al. *Nigella sativa L.*: Phytochemistry, functional properties, food applications, and health-promoting effects. Food Chemistry, v. 437, 2024.

ALU'DATT, Muhammad H. et al. Designing novel industrial and functional foods using the bioactive compounds from *Nigella sativa L.* (black cumin): biochemical and biological prospects toward health implications. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 4, p. 1865–1893, 2024.

ASLANI, Mohammad Reza; SAADAT, Saeideh; BOSKABADY, Mohammad Hossein. Comprehensive and updated review on anti-oxidant effects of *Nigella sativa* and its constituent, thymoquinone, in various disorders. Iranian Journal of Basic Medical Sciences, v. 27, n. 8, p. 923, 2024.

BAYDAR, Hasan.; KARA, Nimet.; KATAR, Duran. Yield and Quality of Black Cumin (*Nigella sativa L.*) Populations: The Effect of Ecological Conditions. Field Crops Research, v. 20, n. 1, p. 9-14, 2016.

BIALKOVA, S.; GRUNERT, K. G.; VAN TRIJP, H. C. M. Standing out in the crowd: The effect of information clutter on consumer attention for front-of-pack nutrition labels. Food Quality and Preference, v. 35, p. 65–74, 2013.

BIGLIARDI, Barbara; GALATI, Francesco. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. Trends in Food Science & Technology, v. 31, n. 2, p. 118-129, 2013.

BURDOCK, George A. Assessment of black cumin (*Nigella sativa L.*) as a food ingredient and putative therapeutic agent. Regulatory Toxicology and Pharmacology, v. 128, p. 105088, 2022.

BUTT, Masood Sadiq; SULTAN, Muhammad Tauseef. *Nigella sativa*: reduces the risk of various maladies. Critical reviews in food science and nutrition, v. 50, n. 7, p. 654-665, 2010.



GRANATO, Daniel. et al. Functional foods and nondairy probiotic food development: Trends, concepts, and products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Hoboken, v. 19, n. 1, p. 1–29, 2020.

HASHEMPUR, Mohammad Hashem et al. Synthesize, antioxidant and antimicrobial properties of a chitosan xerogel film with *Nigella Sativa* extract. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 24635, 2025.

HASSANIEN, Mohamed F. R. et al. Health-promoting value and food applications of black cumin essential oil: an overview. *Journal of Food Science and Technology*, v. 52, n. 10, p. 6136-6142, 2015.

HOLMQVIST, Kenneth et al. Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. oup Oxford, 2011.

KARA, Nimet; KATAR, Duran; BAYDAR, Hasan. Yield and quality of black cumin (*Nigella sativa L.*) populations: the effect of ecological conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, v. 20, n. 1, p. 9-14, 2015.

KHAN, Imran; SHAIKH, J. D. Phytochemical profiling and antioxidant potential of different extracts of *Nigella sativa* seeds. *International Journal of Pharmacognosy*, v. 12, p. 319-329, 2025.

NAINAWAT, Kripa Shanker et al. Pharmaceutical perspectives of thymoquinone, a lead molecule from black cumin (*Nigella sativa L.*) with diverse biological targets. *Food Chemistry Advances*, v. 8, p. 101053, 2025.

NUTRIENT MANAGEMENT. Nitrogen Uptake, Use Efficiency, and Productivity of *Nigella sativa L.*. *Sustainability*, v. 14, n. 7, p. 3842, 2022.

ORQUIN, J. L.; MUELLER LOOSE, S. Attention and choice: A review on eye movements in decision making. *Acta Psychologica*, v. 144, n. 1, p. 190–206, 2013.

OUNBANNIN, Samira et al. Antioxidant activity, physico-chemical properties, and bioactive compounds of *Nigella sativa seeds* and oil impacted by microwave processing technique. *Heliyon*, v. 10, n. 18, 2024.

PANDEY, Raghvendra; PANDEY, Brijesh; BHARGAVA, Atul. An updated review on the phytochemistry and pharmacological activity of black cumin (*Nigella sativa L.*). *Advanced Chinese Medicine*, v. 2, n. 1, p. 13-29, 2025.

RANDHAWA, Muhammad A.; AL-GHAMDI, Mastoor S. A review of the pharmaco-therapeutic effects of *Nigella sativa*. *Journal of Ayub Medical College Abbottabad*, Abbottabad, v. 23, n. 1, p. 1–7, 2011.

RODRIGUEZ-AMAYA, Delia B. *Food carotenoids: chemistry, biology and technology*. 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2016.

SHAHIDI, Fereidoon; AMBIGAIPALAN, Priyatharini. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of functional foods*, v. 18, p. 820-897, 2015.

SIRÓ, István et al. Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance—A review. *Appetite*, v. 51, n. 3, p. 456-467, 2008.



SOLIMAN, Rabab M. et al. Stability study of thymoquinone, carvacrol and thymol using HPLC-UV and LC-ESI-MS. *Acta Pharmaceutica*, v. 70, n. 3, p. 325-342, 2020.

TIRUPPUR VENKATACHALLAM, Suresh Kumar et al. Chemical composition of *Nigella sativa L.* seed extracts obtained by supercritical carbon dioxide. *Journal of food science and technology*, v. 47, n. 6, p. 598-605, 2010.

VAN HERPEN, E.; VAN TRIJP, H. C. M. Front-of-pack nutrition labels: Their effect on attention and choices when consumers have varying goals and time constraints. *Appetite*, v. 57, n. 1, p. 148–160, 2011.

WEDEL, Michel et al. Eye tracking for visual marketing. *Foundations and Trends® in Marketing*, v. 1, n. 4, p. 231-320, 2008.