

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

CAMILA DANIELI CARVALHO

**PRODUÇÃO DE CORANTES E PIGMENTOS NATURAIS POR FUNGOS
FILAMENTOSOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

ALFENAS/MG

2025

CAMILA DANIELI CARVALHO

**PRODUÇÃO DE CORANTES E PIGMENTOS NATURAIS POR FUNGOS
FILAMENTOSOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Ciências Biológicas, pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Rosymar Coutinho de Lucas

ALFENAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Carvalho, Camila Danieli.

Produção de corantes e pigmentos naturais por fungos filamentosos:
uma revisão de literatura / Camila Danieli Carvalho. - Alfenas, MG, 2025.
34 f. -

Orientador(a): Rosymar Coutinho de Lucas.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) -
Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Fungos. 2. Pigmentos. 3. Metabólitos. 4. Policetídeos. I. de Lucas,
Rosymar Coutinho, orient. II. Título.


CAMILA DANIELI CARVALHO

**PRODUÇÃO DE CORANTES E PIGMENTOS NATURAIS POR FUNGOS
FILAMENTOSOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação/Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Ciências Biológicas, pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 12 de dezembro de 2025

Prof.^a Dr.^a Rosymar Coutinho de Lucas
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:
Documento assinado digitalmente
 ROSYMAR COUTINHO DE LUCAS
Data: 17/12/2025 15:39:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Ma. Hillary Ananda Gonçalves Aniceto
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Ma. Rafaela Franco Dias Bruzadelli
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mariza e Dorandi, pelo apoio incondicional, pelos sacrifícios silenciosos e pelos abraços de saudade que sempre renovaram minhas energias. Aos meus irmãos, gratidão por carregarem comigo o peso e as alegrias da caminhada e por me presentarem com o título de Tia. Aos meus sobrinhos - Vitor, Ana Cecília, João Gabriel e Maria Clara, dedico esse momento. À Stefanie, minha parceira de vida, pelo incentivo infinito e amor absurdo.

À todos os meus professores, que são o caminho para este momento, e em especial à minha incrível orientadora, Prof^ª Dr^ª Rosymar Coutinho de Lucas, por me guiar durante todo o processo e pela paciência e carinho comigo e com nosso trabalho. Obrigada, Unifal, pela oportunidade e experiências vividas.

RESUMO

Os corantes e pigmentos naturais são objeto de grande interesse industrial, visto que os sintéticos são responsáveis por causar efeitos danosos ao meio ambiente. Os fungos filamentosos apresentam diversas vantagens na produção desses metabólitos secundários, tais como: facilidade de cultivo e isolamento, estabilidade gênica, baixo custo, alto rendimento do metabólito, além de sofrerem pouca interferência da sazonalidade no seu desenvolvimento. Além disso, esses compostos naturais podem oferecer propriedades antioxidantes, imunossupressoras, antivirais, antitumorais, redutoras de colesterol, funcionando como compostos bioativos que aumentam o potencial nutricional e farmacológico, atrelando seus múltiplos benefícios a grande variedade de cores a determinados alimentos a que forem adicionados. Esta revisão busca apresentar as condições ambientais e os fatores de cultivo que influenciam a produção desses compostos, analisar as propriedades bioativas dos corantes e pigmentos fúngicos e sua toxicidade, além de investigar os avanços biotecnológicos que permitam o aumento da produção e a segurança de corantes e pigmentos derivados de fungos. A busca na literatura foi realizada nos bancos de dados Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO e Google Scholar, além de pesquisas em teses e dissertações, selecionando apenas materiais publicados entre junho de 2015 e outubro 2025, excluindo estudos que, foram publicados fora do intervalo de tempo determinado, envolvem pigmentos de origem não fúngicas, trabalhos sem dados experimentais claros ou fora do escopo biotecnológico e artigos duplicados, resumos de congresso e patentes. O refinamento dessa revisão considerou como critério de inclusão artigos científicos com índice de citação e revistas científicas com fator de impacto relevante. Os resultados demonstram que os fungos filamentosos são capazes de produzir compostos de classes como policetídeos, carotenoides e flavinas. Os estudos analisados evidenciam que fatores como composição do meio, pH, temperatura, disponibilidade de nitrogênio e condições de estresse modulam a produção, a cor e o rendimento dos pigmentos.

Palavras-chave: Fungos; Pigmentos; Metabólitos; Policetídeos.

ABSTRACT

Natural colorants and pigments are of great industrial interest, since synthetic ones are responsible for causing harmful effects on the environment. Filamentous fungi present several advantages in the production of these secondary metabolites, such as ease of cultivation and isolation, genetic stability, low cost, high metabolite yield, and low interference from seasonality in their development. In addition, these natural compounds may offer antioxidant, immunosuppressive, antiviral, antitumor, and cholesterol-lowering properties, acting as bioactive compounds that enhance nutritional and pharmacological potential, while associating their multiple benefits with a wide variety of colors in the foods to which they are added.

This review aims to present the environmental conditions and cultivation factors that influence the production of these compounds, analyze the bioactive properties and toxicity of fungal colorants and pigments, and investigate biotechnological advances that enable increased production and improved safety of fungi-derived colorants and pigments. The literature search was conducted in the Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO, and Google Scholar databases, as well as in theses and dissertations, selecting only materials published between June 2015 and October 2025. Studies published outside the defined time frame, involving pigments of non-fungal origin, lacking clear experimental data or outside the biotechnological scope, as well as duplicated articles, conference abstracts, and patents were excluded. The refinement of this review considered as inclusion criteria scientific articles with citation indices and journals with relevant impact factors.

The results demonstrate that filamentous fungi are capable of producing compounds from classes such as polyketides, carotenoids, and flavins. The analyzed studies show that factors such as medium composition, pH, temperature, nitrogen availability, and stress conditions modulate pigment production, color, and yield.

Keywords: Fungi; Pigments; Metabolites; Polyketides.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais classes químicas de pigmentos produzidos por fungos filamentosos	14
Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos sobre produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	DIVERSIDADE DE FUNGOS FILAMENTOSOS PRODUTORES DE PIGMENTOS.....	11
2.2	TIPOS DE PIGMENTOS E CORANTES PRODUZIDOS.....	13
2.3	EXTRAÇÃO, PURIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PIGMENTOS.....	16
2.4	DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	18
3	METODOLOGIA.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

A industrialização impulsionou a produção de corantes sintéticos com a descoberta do pigmento malva de Perkin para aplicações nas indústrias têxtil, cosmética, farmacêutica e alimentícia. No entanto, a ampla disseminação desses compostos não naturais ao longo das décadas revelou uma série de preocupações toxicológicas e regulatórias. Os riscos associados ao consumo, como os impactos ambientais decorrentes do uso extensivo de pigmentos sintéticos, considerando-se sua persistência no ambiente, a dificuldade de degradação e o potencial de geração de subprodutos tóxicos durante sua produção e descarte, impulsionou uma busca intensiva por alternativas mais seguras e sustentáveis, motivando o avanço de pesquisas em pigmentos naturais (Kalra; Conlan; Goel, 2020).

A utilização de pigmentos e corantes fúngicos apresenta uma alternativa promissora para a substituição de pigmentos sintéticos visto que os corantes utilizados na atualidade podem causar efeitos tóxicos como mutagenicidade, potencial carcinogênico, hiperatividade em crianças, urticária, indisposição estomacal e vômitos (Oliveira, *et al.* 2023).

A complexidade dos microrganismos fúngicos permite uma resistência frente ao estresse ambiental, isso é possível por meio da produção de metabólitos secundários. Essas biomoléculas, além de garantir uma maior taxa de sobrevivência dos indivíduos, podem resultar em corantes e pigmentos de alto interesse das indústrias. Dentre as vantagens que a produção de corantes e pigmentos, a partir de fungos filamentosos, apresenta, estão a facilidade de cultivo e isolamento, o baixo custo e as propriedades antioxidantes que podem ser obtidas (Kalra; Conlan; Goel, 2020).

As cores produzidas por fungos filamentosos são diversas e podem ter origem de diferentes classes químicas. O fungo *Monascus sp.*, por exemplo, dá origem a cores como laranja, vermelho ou amarelo e que são obtidas principalmente de monascina e ankaflavina. Pigmentos desse organismo são popularmente utilizados como corante alimentar e na medicina tradicional chinesa. Além das classes químicas citadas, podem ser obtidos carotenoides, melaninas, flavinas, fenazinas, quinonas e uma grande variedade de cores em espécies fúngicas diferentes (Ree Yoon H *et al.*, 2023).

Com isso, ressalta-se então a importância de desenvolver estudos acerca de preencher as lacunas na produção de pigmentos e corantes por fungos. O objetivo deste trabalho foi sistematizar, através de uma revisão bibliográfica, o conhecimento atual sobre a produção, otimização e aplicações de pigmentos naturais de fungos filamentosos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DIVERSIDADE DE FUNGOS FILAMENTOSOS PRODUTORES DE PIGMENTOS

Os fungos filamentosos são organismos eucariontes multicelulares, compostos por hifas tubulares septadas ou cenocíticas que formam micélio. Esses organismos desempenham papel fundamental na decomposição de matéria orgânica e na ciclagem dos nutrientes. Também podem estabelecer associações simbióticas com plantas, com relações micorrízicas, endofíticas, ou relações patogênicas (Powers-Fletcher *et al.*, 2016).

Assim, podem ser classificados como saprofiticos, parasitários ou simbióticos (Spiteller, 2015). Os fungos saprofiticos, como *Aspergillus niger*, também são conhecidos como “mofo”, degradam matéria orgânica e têm aplicações industriais na produção de enzimas (Powers-Fletcher *et al.*, 2016). Quanto aos simbióticos, espécies do gênero *Fusarium* são um exemplo de organismos capazes de estabelecer essa interação, como ocorre com o *Fusarium oxysporum* endofítico, que vive no interior de plantas sem causar danos e pode promover crescimento vegetal ou aumentar a resistência a estresses bióticos e abióticos (Kuldau; Bacon, 2008). O próprio gênero *Fusarium*, contudo, também inclui organismos saprofiticos e patogênicos que podem causar doenças em vegetais e humanos, destacando a versatilidade ecológica dos fungos (Powers-Fletcher *et al.*, 2016).

Sendo assim, os fungos são capazes de colonizar diversos habitats, desde ambientes terrestres, se estabelecendo no solo, em relações ecológicas com outros seres vivos, em ambientes marinhos, e até mesmo podem ser encontrados na Antártica, superando as condições mais adversas de vida. Um dos fatores do grande sucesso dos fungos em colonizar ecossistemas tão diversos está na produção de metabólitos secundários (Nikitin, 2023).

Os metabólitos secundários são biomoléculas que aumentam a resistência dos fungos frente ao estresse ambiental. Esses produtos não são essenciais para o seu desenvolvimento, mas aumentam sua taxa de sobrevivência em estresse (Conrado, 2022). Esses compostos produzidos por fungos apresentam uma grande diversidade de atividade biológica, que propiciam benefícios para a sociedade (Bills; Gloer, 2016). Um dos metabólitos secundários mais importantes para a sociedade e para a indústria farmacêutica é a penicilina, um antibiótico usado para tratamento de infecções bacterianas, inicialmente isolada do fungo filamentosso *Penicillium notatum* (Conrado, 2022).

Entre os metabólitos secundários está o pigmento. Os pigmentos, quando produzidos por fungos, têm vantagens com relação aos outros, obtidos de maneira sintética ou por meio de extração de plantas e animais. Os fungos filamentosos, como *Monascus*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma* e *Talaromyces* (Toma, *et al.*, 2023) oferecem facilidade de cultivo e isolamento, estabilidade gênica, baixo custo, alto rendimento do metabólito, além de sofrerem pouca interferência da sazonalidade no seu desenvolvimento e garantir uma variada gama de cores (Kalra; Conlan; Goel, 2020). Os fungos são de grande importância e interesse quando se trata da produção de cores para aplicações industriais, devido aos seus padrões de crescimento rápido, que também podem ser controlados geneticamente para promover maior produção de pigmentos (Toma, *et al.*, 2023).

O filo Ascomycota, o mais abundante entre os fungos, é composto por gêneros como *Monascus*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Trichoderma* e *Talaromyces* que se destacam quanto à produção de cores que variam do amarelo ao violeta, derivadas de classes químicas como riboflavina, ankaflavina, monascina, bikaverina, carotenos e quinonas (Oliveira, *et al.*, 2022).

As espécies filamentosas de Basidiomicetos como o “cogumelo ostra”, foram estudados por Zhang, 2022, que extraiu pigmentos preto, amarelo e rosa correspondente a cor do píleo de cada amostra e identificou a classe do pigmento como uma variação entre eumelanina e feomelanina.

O filo zygomycota, ainda é pouco estudado em aplicações biológicas de corantes e pigmentos, o que resulta em pouca informação quanto às classes químicas e cores que seus representantes podem produzir. Ainda assim, segundo Torres; Zaccarim (2016), as espécies *Blakeslea trispora*, *Mucor circinelloides* e *Phycomyces blakesleeanus* pertencem ao filo zygomycota e produzem γ -caroteno, um corante amarelo.

2.2 TIPOS DE PIGMENTOS E CORANTES PRODUZIDOS

Os corantes naturais produzidos por microrganismos podem ser classificados como pigmentos ou corantes. Os fatores que diferenciam essas substâncias são, principalmente, o tamanho da partícula e a solubilidade. Sendo assim, os pigmentos são insolúveis e apresentam partículas de aproximadamente 1-2 micrômetros. Os corantes, por sua vez, são substâncias que se dissolvem no meio e são compostos por partículas menores (Torres; Zaccarim, 2016).

A produção de pigmentos por alguns fungos filamentosos, também pode resultar na produção de micotoxinas, como a citrinina, responsável por efeitos tóxicos e impactos negativos para a saúde, sendo esse o maior desafio encontrado para a substituição de corantes sintéticos por corantes fúngicos na indústria alimentícia (Kalra; Conlan; Goel, 2020).

Segundo Dufossé *et al.* (2014), os fungos filamentosos são produtores de diversas classes químicas de pigmentos como carotenoides, melaninas e quinonas. Para além da coloração, esses compostos oferecem propriedades antioxidantes, imunossupressoras, antivirais, antitumorais e redutoras de colesterol (Oliveira, 2023). Sendo assim, aumentam o potencial nutricional e farmacológico dos produtos alimentícios que os utilizam. Sendo este um dos grandes motivos de interesse industrial na produção de pigmentos por fungos filamentosos (Kalra; Conlan; Goel, 2020).

Atualmente, diversos pigmentos são utilizados, principalmente pela indústria têxtil e alimentícia, as astaxantinas e cantaxintinas são xantofilas, ou seja, são um tipo de carotenóide, e estão presentes industrialmente em rações de animais. Suas principais fontes naturais descritas são plantas, algas fitoplanctônicas e *Xanthophyllomyces dendrorhous*, um basidiomiceto na forma de levedura (Stachowiak, 2021).

Ainda assim, pigmentos como xantinas e outras classes são produzidas por fungos filamentosos. A Tabela 1 apresenta os metabólitos secundários e seus pigmentos correspondentes mais relevantes no estudo de produção de pigmentos por fungos filamentosos (Oliveira, *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Principais classes químicas de pigmentos produzidos por fungos filamentosos

Classe Geral	Tipo de Pigmento	Exemplos de Compostos
Policetídeos	Quinonas	Antraquinonas, hidroxiantraquinonas, xilindeína, naftoquinona
	Azafilonas	monascinas, ankaflavinas, monascorubrina, rubropunctatina, xantomonasina, bikaverina,
	Melanina	eumelanina, feomelanina, alomelanina, neuromelanina
carotenoides	Carotenos	γ -caroteno, b-caroteno, licopeno
	Xantinas	Astaxantina, cantaxantinas
Flavina	Riboflavina	flavina adenina dinucleotídeo (FDA), flavina mononucleotídeo (FMN)

Fonte: autora, 2025.

A Tabela 1 sintetiza a diversidade química dos pigmentos produzidos por fungos filamentosos, evidenciando três grandes grupos: policetídeos, carotenoides e flavinas. A predominância dos policetídeos reflete a versatilidade das vias biossintéticas fúngicas, capazes de gerar compostos estruturalmente complexos, como quinonas, azafilonas e melaninas.

As quinonas, representadas por antraquinonas e xilindeína, são pigmentos frequentemente associados à defesa fúngica e à comunicação ambiental (Santos; Bicas, 2021).

As azafilonas, especialmente abundantes em gêneros como *Monascus* e *Talaromyces*, destacam-se pela variedade de tonalidades que proporcionam, do amarelo ao vermelho intenso, e pelo forte potencial bioativo, incluindo atividades antioxidantes, antimicrobianas e anticâncer (Morales-Oyervides *et al.*, 2020). Pigmentos como monascorubrina, rubropunctatina e bikaverina são amplamente estudados por sua relevância industrial e farmacêutica.

Já as melaninas incluem subclassificações como a eumelanina e a feomelanina, moléculas de alto peso molecular e coloração escura que atuam como protetores contra radiação UV, espécies reativas e metais pesados (Singh *et al.*, 2021).

Os carotenoides, distribuídos entre carotenos e xantinas, são pigmentos tetraterpenoides associados a cores vivas e a elevada capacidade antioxidante. Compostos como β -caroteno e licopeno são amplamente explorados pela indústria alimentícia e nutracêutica, enquanto pigmentos como astaxantina e cantaxantina são reconhecidos por sua forte bioatividade e potencial terapêutico (Lin; Xu, 2022). A presença dessas moléculas em fungos filamentosos reforça o potencial desses organismos como biofábricas de alto valor agregado.

Por fim, o grupo das flavinas, representado pela riboflavina (vitamina B2) e seus derivados FAD e FMN, indica a capacidade dos fungos de produzirem pigmentos associados a rotas metabólicas essenciais. Embora menos estudadas no contexto de corantes, as flavinas possuem interesse crescente devido à sua estabilidade e segurança para aplicações industriais (Lin; Zhang; Xu, 2023).

De forma geral, o Tabela 1 evidencia a complexidade e o potencial dos fungos filamentosos que podem produzir classes diferentes de pigmentos e são explorados como alternativas aos pigmentos sintéticos e a outros pigmentos naturais.

Oliveira *et al.* (2023) evidenciou o potencial biotecnológico das espécies fúngicas do solo da Amazônia para a produção de corantes por meio de um processo de isolamento, seleção e caracterização dos pigmentos produzidos. Inicialmente, fungos filamentosos foram isolados de amostras de solo, cultivados em meio líquido para induzir a bioprodução de corantes. Em seguida, os pesquisadores extraíram e purificaram os metabólitos secundários coloridos. O potencial foi comprovado ao demonstrar-se que a fração corante selecionada, além de apresentar cores adequadas para aplicação industrial, exibia baixa citotoxicidade e atividade antimicrobiana contra diversas linhagens bacterianas. No estudo de

Oliveira *et al.* (2023), o fungo *Penicillium sclerotiorum* P3SO224 foi identificado como o mais promissor para tingimento têxtil após a aplicação direta dos extratos corantes em amostras de tecido. A contínua investigação sobre suas vias biossintéticas, propriedades bioativas e condições ótimas de produção é essencial para o avanço da biotecnologia de pigmentos naturais.

2.3 EXTRAÇÃO, PURIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PIGMENTOS

A extração de pigmentos fúngicos é uma etapa central nos processos biotecnológicos, já que influencia diretamente o rendimento e a qualidade do produto final. A eficiência dessa etapa depende da localização do pigmento e de sua natureza química (Mussagy *et al.*, 2019). Quando os pigmentos são liberados para o meio extracelular, o processo é simplificado, envolvendo principalmente filtração ou centrifugação para separação do sobrenadante, o que reduz custos e evita a necessidade de etapas agressivas de ruptura celular (Morales-Oyervides *et al.*, 2020).

Pigmentos hidrossolúveis, como algumas antraquinonas, podem ser recuperados diretamente do sobrenadante, facilitando o processo (Souza *et al.*, 2016). Porém, os carotenoides, são exemplos de compostos predominantemente intracelulares e lipofílicos, que necessitam do uso de solventes como etanol, metanol ou hexano (Mussagy *et al.*, 2019) para a extração.

Para pigmentos intracelulares, técnicas tradicionais utilizando solventes orgânicos, como etanol, metanol, acetato de etila e hexano, continuam sendo amplamente empregues devido à capacidade de solubilizar compostos de diferentes polaridades (Oliveira *et al.*, 2023). Contudo, métodos sustentáveis vêm ganhando destaque, especialmente a extração assistida por ultrassom, que promove cavitação e ruptura da parede celular, favorecendo maior liberação de pigmentos. Estudos mostram que ondas ultrassônicas aumentam significativamente o rendimento de compostos pigmentares em espécies de *Talaromyces* e *Penicillium* (Xia *et al.*, 2025).

A extração assistida por microondas é uma outra técnica empregada, que utiliza aquecimento rápido e uniforme para romper estruturas celulares, reduzindo tempo de processo e consumo de solventes. Essa abordagem tem sido citada como alternativa eficiente na bioprospecção de pigmentos termoestáveis e é especialmente útil para fungos cujo pigmento se encontra densamente associado à parede celular (Morales-Oyervides *et al.*, 2020).

Métodos físicos tradicionais, como moagem mecânica, homogeneização de alta pressão e tratamento químico alcalino, também são utilizados para romper barreiras celulares e liberar pigmentos intracelulares, especialmente melaninas, como demonstrado no estudo de Zhang (2022), no qual a extração envolveu etapas de alcalinização, sonicação e precipitação ácida.

A remoção de impurezas e concentração dos compostos de interesse ocorre através do processo de purificação. Métodos cromatográficos, como HPLC e cromatografia em coluna, são amplamente aplicados para separar moléculas pigmentares com base em propriedades físico-químicas (Souza *et al.*, 2016). O HPLC pode ser utilizado tanto para purificação quanto para análise qualitativa e quantitativa dos pigmentos (Oliveira *et al.*, 2023). Em casos específicos, métodos simples como precipitação química, filtração seletiva e extração líquido-líquido podem ser utilizados quando há forte diferença de solubilidade entre o pigmento e os demais componentes celulares (Zhang, 2022). Estudos com fungos filamentosos demonstraram que essas técnicas permitiram a identificação de compostos como oosporeína e orevactaeno, evidenciando a eficiência do processo de purificação (Souza *et al.*, 2016).

A caracterização dos pigmentos envolve um conjunto de técnicas espectroscópicas e cromatográficas. A espectrofotometria UV-Vis é frequentemente utilizada como etapa inicial, permitindo identificar comprimentos de onda característicos de classes de pigmentos, como carotenoides, antraquinonas ou melaninas (Xia *et al.*, 2025). Técnicas mais detalhadas, como LC-MS/MS, espectrometria de massas e ressonância magnética nuclear, são necessárias para determinar com precisão a estrutura química, especialmente em carotenoides microbianos (Mussagy *et al.*, 2019). Além de que, técnicas como HPLC e LC-MS fornecem informações sobre pureza, massa molecular e padrões de fragmentação, essenciais para a identificação estrutural dos compostos (Oliveira *et al.*, 2023).

A espectroscopia FTIR é aplicada para caracterizar grupos funcionais e interações químicas, sendo amplamente utilizada em estudos com melaninas extraídas de fungos (Zhang, 2022). Por fim, a ressonância magnética nuclear (RMN) representa a ferramenta mais completa para elucidação estrutural, permitindo determinar ligações químicas, conformações e unidades monoméricas presentes nos pigmentos (Morales-Oyervides *et al.*, 2020).

Com o avanço da biotecnologia, métodos sustentáveis de extração têm ganhado espaço, incluindo o uso de solventes verdes e fluidos supercríticos. Além de reduzirem impactos ambientais, essas técnicas podem aumentar a seletividade e estabilidade dos pigmentos, sobretudo dos carotenoides (Mussagy *et al.*, 2019). Os desafios relacionados à instabilidade térmica, oxidativa e lumínica de muitos pigmentos fúngicos têm estimulado o desenvolvimento de processos de estabilização. No caso dos pigmentos de *Monascus*, estratégias como microencapsulação e complexação com hidrocolóides têm se mostrado eficientes para ampliar a viabilidade industrial desses compostos (Chaudhary *et al.*, 2022).

Assim, as etapas de extração, purificação e caracterização dos pigmentos fúngicos compõem um processo integrado que exige seleção criteriosa de métodos apropriados à natureza química dos compostos e à espécie produtora. Avanços recentes em técnicas verdes e análises instrumentais têm aprimorado significativamente a eficiência e a qualidade desses processos.

2.4 DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos ainda enfrenta importantes barreiras tecnológicas, especialmente relacionadas à variação metabólica entre espécies e cepas. Essa variabilidade influencia diretamente o rendimento, a estabilidade e a composição química dos pigmentos, dificultando a padronização dos processos industriais (Morales-Oyervides *et al.*, 2020). Da mesma forma, fatores ambientais, como pH, temperatura e composição do meio, afetam a produção dos metabólitos secundários, exigindo ajustes específicos para cada fungo (Oliveira *et al.*, 2023).

Os desafios regulatórios também representam um entrave significativo para a expansão industrial desses bioprodutos. A comercialização de pigmentos microbianos, especialmente para as indústrias alimentícia e cosmética, exige

comprovações robustas de segurança toxicológica, incluindo estudos de citotoxicidade, genotoxicidade e análises de possíveis metabólitos indesejáveis. Contudo, para muitos fungos, ainda há escassez de dados completos que permitam sua aceitação por agências reguladoras, como FDA (Food and Drug Administration) e EFSA (European Food Safety Authority) (Morales-Oyervides *et al.*, 2020). Além disso, legislações divergentes entre países dificultam a expansão global dessas moléculas bioativas (Oliveira *et al.*, 2023).

Outro ponto crítico refere-se à necessidade de padronização dos processos de produção, extração e purificação. As diferenças existentes entre pigmentos intracelulares e extracelulares exigem protocolos específicos de ruptura celular, micro-ondas ou ultrassom, o que dificulta a criação de metodologias universais aplicáveis a todos os gêneros fúngicos (Xia *et al.*, 2025). Essa falta de padronização compromete a reprodutibilidade e qualidade do produto final, impactando diretamente sua aceitação industrial e regulatória (Zhang, 2022).

Apesar dessas limitações, avanços recentes em engenharia genética e edição genômica, como CRISPR-Cas9, têm impulsionado a capacidade de manipulação metabólica de fungos para aumentar o rendimento, eliminar subprodutos tóxicos e direcionar vias biossintéticas desejadas. Esses avanços têm permitido otimizar espécies como *Talaromyces atroroseus* e *Monascus sp* para produção mais consistente e segura (Xia *et al.*, 2025). Paralelamente, melhorias no design de biorreatores, incluindo cultivos em modos feed-batch, controle eletrônico de oxigenação e sensores em tempo real, têm ampliado a eficiência da produção em larga escala (Morales-Oyervides *et al.*, 2020).

Do ponto de vista econômico e mercadológico, as perspectivas para biopigmentos derivados de fungos são altamente promissoras. O crescimento da demanda por ingredientes naturais, seguros e sustentáveis nas áreas de alimentos, cosméticos, têxteis tem impulsionado o interesse industrial por pigmentos microbianos (Oliveira *et al.*, 2023). Além disso, a descoberta contínua de novos pigmentos em fungos de ambientes pouco explorados, como solos tropicais e biomas extremos, amplia a diversidade de moléculas com potencial funcional e comercial (Zhang, 2022).

As tendências apontam para um cenário de forte expansão, impulsionado por legislações que restringem o uso de corantes sintéticos, pelo apelo ambiental do consumidor moderno e pela versatilidade química dos pigmentos fúngicos. Assim, a integração entre avanços biotecnológicos, otimização de processos e fortalecimento das bases regulatórias tende a consolidar os biopigmentos fúngicos como alternativas competitivas no mercado global.

3 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma revisão bibliográfica que busca sistematizar o conhecimento atual sobre a produção, otimização e aplicações de pigmentos naturais de fungos filamentosos. A busca na literatura foi realizada nos bancos de dados Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO e Google Scholar, além de pesquisas em teses e dissertações. Foram selecionados apenas materiais publicados entre junho de 2015 e outubro de 2025, nos idiomas inglês e português. Os trabalhos passaram por triagem de títulos e resumos, seguida de leitura na íntegra dos estudos elegíveis. Foram excluídos estudos publicados fora do intervalo de tempo determinado, que não envolvem pigmentos de fungos filamentosos, trabalhos sem dados experimentais claros ou fora do escopo biotecnológico e artigos duplicados, bem como resumos de congresso e patentes.

As palavras-chaves utilizadas para a pesquisa nos bancos de dados foram:

1. (polyketides) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);
2. (carotenoids) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);
3. (riboflavin) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);
4. (basidiomycota) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);
5. (ascomycota) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);
6. (zygomycota) AND (filamentous fungi) AND (natural pigments OR natural colorants) AND (production) AND (industrial application);

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, o Tabela 2 apresenta um panorama detalhado dos estudos mais relevantes encontrados, detalhando as espécies fúngicas produtoras, as classes químicas dos pigmentos, os métodos e condições de cultivo empregados, além de destacar as principais aplicações industriais, as propriedades bioativas e os resultados principais de cada estudo.

Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos sobre produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos

(continua)

Autor(es) / Ano	Espécie Fúngica	Cor	Classe Química	Método de Produção	Condições de Cultivo	Método de Extração / Purificação	Aplicações	Propriedades Bioativas	Resultados Principais
Santos MCD, Bicas JL., 2021	<i>Fusarium oxysporum</i>	Inicialmente Vermelho, pós tratamento: azul	Poliquetídeo aromático. A bikaverina é uma naftoquinona.	Fermentação submersa, fermentação em estado sólido	Meio com alta relação Carbono/Nitrogênio; O pH ácido e aeração elevada	O extrato vermelho (Bikaverina) foi obtido com solventes orgânicos (acetato de etila, clorofórmio, hexano, etanol). O pigmento azul está associado ao aumento de temperatura e aminoácidos.	Alimentar, Cosmética e Farmacêutica/Médica	Antitumoral, antimicrobiana	A biomassa vermelha produtora de bikaverina torna-se azul após tratamento térmico. A mudança de cor pode ser resultado da ligação/interação da bikaverina com componentes da parede celular, possivelmente proteínas. O azul foi evidenciado na presença de arginina, histidina e triptona após tratamento térmico.
Stange S, et al., 2019	<i>Chlorociboria aeruginascens</i>	Azul-verde	Policetídeo do tipo Quinona (Xilindeína)	Fermentação Submersa	22 °C; 160 rpm; pH inicial 4. A pigmentação é induzida por limitação de nitrogênio.	N/A	Indústria de folheados (vener), semicondutores orgânicos, rotulagem fluorescente	N/A	A produção do pigmento é um metabólito secundário induzido pela limitação de nitrogênio. Meios complexos (como suco de laranja) encorajam a pigmentação.
Yu, et al. 2021	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	Roxo-vermelho	Policetídeo;	Fermentação Submersa	N/A	Separado com acetato de etila acidificado e purificado por cromatografia coluna de sílica gel	indústria agrícola	N/A	O pigmento TD16 é um novo pigmento policetídeo. Sua produção é um produto secundário não associado ao crescimento e apresenta atividade antimicrobiana de amplo espectro.
Lin; Xu, 2022	<i>Aspergillus, Penicillium, Paecilomyces, e Monascus</i>	Amarelo, Laranja, Vermelho, Azul, Marrom	carotenoides, Policetídeos;	Fermentação em biorreatores (larga escala)	N/A	Downstream bioprocessing	Alimentar, Cosmética, Têxtil e Farmacêutica	anti-tumoral, anti-oxidativa, e imunossupressora, radioprotetoras, antimicrobianos e anti-inflamatórios.	A biossíntese de pigmentos é frequentemente um mecanismo de adaptação para a sobrevivência e disseminação sob estresse ambiental. Pigmentos fúngicos são metabólitos secundários com estruturas diversas e potenciais aplicações industriais e médicas.
Lin L, Zhang T, Xu J, 2023	<i>Blakeslea trispora, Xanthophyllomyces dendrorhous, Fusarium spp., Amorophotheca resinae, Monascus sp.</i>	Amarelo, Laranja e Vermelho; preto;	carotenoides, Policetídeos;	Fermentação em biorreatores (larga escala)	Luz azul aumenta, Temperatura 20°C a 30°C. Disponibilidade de Nitrogênio e Ca++, estresse por NaCl.	Downstream bioprocessing	Alimentar, Cosmética, Têxtil e Farmacêutica	anti-tumoral, anti-oxidativa, e imunossupressora, radioprotetoras, antimicrobianos e anti-inflamatórios.	Otimização do meio e o controle de fatores de estresse podem aumentar o rendimento. A manipulação do equilíbrio metabólico, minimizando a acumulação de intermediários, é uma estratégia eficaz para aumentar o nível de β-caroteno em hospedeiros heterólogos.

Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos sobre produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos

Autor(es) / Ano	Espécie Fúngica	Cor	Classe Química	Método de Produção	Condições de Cultivo	Método de Extração / Purificação	Aplicações	Propriedades Bioativas	Resultados Principais
Singh, et al. 2021	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Auricularia auricula</i> , <i>Cryptococcus neoformans</i> , <i>Exophiala pisciphila</i> .	Amarelo, Marrom e preto;	Policetídeo do tipo Melanina (Eumelanina, Neuromelanina, Alomelanina)	Fermentação submersa, fermentação em estado sólido	Variável de acordo com a espécie e do tipo melanina.	Lise celular e precipitação ácida (pH baixo), seguida de lavagens e solubilização em solventes alcalinos diluídos (Ex: NaOH ou KOH 0,5-1 M). Métodos recentes buscam extração in situ e processamento a jusante mais fácil.	Cosmética e Farmacêutica	Fotoprotetoras, Anti oxidantes, Radioprotetoras, Antifúngicas, Antivirais	A produção microbiana apresenta vantagens em relação a outras fontes (como animais) devido ao alto rendimento e à facilidade de controle do processo. A aplicação em nanotecnologia e em áreas como protetores solares tem sido o foco de pesquisas recentes.
Frandsen, et al., 2018	<i>Aspergillus nidulans</i>	Vermelho	Policetídeo do tipo Quinona (Antroquinona)	Produção Heteróloga através de Engenharia Metabólica.	O cultivo do <i>A. nidulans</i> recombinante foi realizado em condições de laboratório, visando a expressão dos genes e a produção do pigmento.	O corante foi detectado e quantificado em culturas líquidas do fungo geneticamente modificado.	Alimentar, Cosmética	anti-inflamatórias e antioxidantes	O esqueleto tricíclico do ácido carmínico foi produzido com sucesso em <i>A. nidulans</i> utilizando uma via biossintética semi-natural: uma policetídeo sintase (PKS) do tipo III de planta formou um octacetídeo linear, que foi dobrado na estrutura desejada (Antrona de Ácido Flavokermésico - FKA) por uma ciclase e uma aromatase bacterianas do tipo II PKS. O FKA foi então oxidado a Ácido Flavokermésico e Ácido Kermésico por enzimas endógenas do <i>A. nidulans</i> .
Mishra, et al. 2021	<i>Talaromyces assiutensis</i>	Vermelho	Policetídeo do tipo Azafilona (Monascorubramina, Rubropunctatina)	Fermentação Submersa	Temperatura ótima de 25 °C. pH ótimo de 6.0. Tempo de cultivo máximo: 12 dias.	Foi extraído com acetato de etila após a separação da biomassa por filtração.	Farmacêutica e Alimentar	Antimicrobiana e Anticancerígena	A cepa CPEF04 foi identificada como <i>Talaromyces assiutensis</i> . A produção máxima do pigmento (1.14 AU/mL) foi obtida em meio Czapek Dox modificado com 2% de glicose e 0.5% de extrato de levedura a 25 °C e pH 6.0.
Zihui Ma, et al., 2022.	<i>Auricularia auricula</i> (fungo comestível e medicinal). A cepa AU-3 foi a hiperprodutora selecionada	Amarelo, Marrom e preto;	Melanina, especificamente uma mistura de eumelanina, feomelanina e melanina 1,8-diidroxinaftaleno (DHN).	Fermentação Submersa	Fermentação submersa a 25°C e 160 rpm. O pH foi otimizado para 7,0. O rendimento máximo foi geralmente alcançado no 9º dia.	Extração alcalina (NaOH 1 mol/L para pH 12,0), precipitação ácida (HCl 3 mol/L para pH 2,0). Hidrólise ácida (HCl 7 mol/L a 100°C por 6 h) e extração sucessiva com clorofórmio, acetato de etila e etanol absoluto.	Desenvolvimento em pigmentos funcionais com possíveis aplicações terapêuticas.	Atividades antioxidantes substanciais, antibacterianas, antitumorais.	O rendimento mais alto de melanina foi 1,797 g/L (cepa AU-3 no Meio I). As vias Raper-Mason e DHN melanina estão envolvidas na biossíntese de melanina. Foi confirmada a presença de eumelanina e feomelanina através da detecção de seus produtos de degradação (PTCA, PDCA e BTCA).

Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos sobre produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos

Autor(es) / Ano	Espécie Fúngica	Cor	Classe Química	Método de Produção	Condições de Cultivo	Método de Extração / Purificação	Aplicações	Propriedades Bioativas	Resultados Principais
Zhang, et al. 2022	Pleurotus cornucopiae (chapéu preto), Pleurotus citrinopileatus (chapéu amarelo) e Pleurotus djamor (chapéu rosa).	Amarelo, Marrom, marrom-avermelhado e preto;	Melanina, identificada como uma mistura de eumelanina e feomelanina	Produção de corpos de frutificação.	de 18-20° C, com 85% de umidade e fotoperíodo de 12 h (300-350 lx).	Isolamento: Extração alcalina (NaOH 1.5 mol/L a 25°C); a precipitação ácida (HCl de 7 mol/L para pH 1.5). Purificação: Tratamento com HCl 7 mol/L a 100°C, seguido por lavagens sequenciais com etanol, clorofórmio e acetato de etila. Repetição de dissolução em NaOH 2 mol/L e precipitação com HCl 2 mol/L (4 vezes).	N/A	N/A	A melanina dos cogumelos ostra é uma mistura de eumelanina e feomelanina. A variação de cor é causada pelas quantidades e proporções relativas desses dois tipos de melanina. As unidades de melanina são intracelulares.
Vishu Chaudhary et al. / 2022	<i>Monascus (principalmente M. purpureus)</i>	Amarelo, Laranja e Vermelho	Policetídeos (Azaphilonos)	Fermentação Submersa e Fermentação em Estado Sólido.	SSF: 56% de umidade, 30°C, 10 dias, pH 5 (em arroz quebrado). Otimização de parâmetros é crucial.	Extração estática ou Soxhlet. Solventes polares para vermelho; não polares para amarelo (ex: etanol, metanol, hexano, acetonitrilo).	Indústria alimentícia e farmacêutica (potencial terapêutico).	Anticâncer, anti-diabético, anti-inflamatório, antimicrobiano, antiobesidade, antioxidante, neurocitoprotetor, anti-hipertensivo, hepatoprotetor e antiaterosclerótico.	Monascus é uma fonte potencial de pigmentos naturais seguros e com valor terapêutico. Foram identificados seis compostos fundamentais (2 amarelos, 2 laranjas, 2 vermelhos).
Gong Chen & Zhenqiang Wu / 2016	Fungos <i>Monascus</i>	Amarelo (MYPs)	Azafilonas	Fermentação Submersa	pH baixo (≤ 2.5) ou baixo teor de íon amônio favorece MYP's. Regime de temperatura de dois estágios (34°C inicial, depois 32°C) aumenta o rendimento.	Fermentação extrativa usando micela de surfactante não iônico (Triton X-100) para extração e secreção.	Indústrias alimentícia e farmacêutica (componentes funcionais, aditivos).	Inibição da monoamina oxidase (MAO), Antiproliferativo, Citotoxicidade seletiva. Antitumoral, anti-diabético, antioxidativo, anti-inflamatório, antiobesidade.	35 MYPs e derivados foram identificados. MYPs apresentam maior resistência à fotodegradação, estabilidade térmica e de pH em comparação com outros pigmentos <i>Monascus</i> .
Iqbal Hussain et al. / 2025	<i>Talaromyces purpureogenus PH7</i>	Vermelho	Não especificada (menciona metabólitos secundários corantes microbianos em geral).	Fermentação Submersa.	pH 7 e 28°C (ótimos para crescimento e produção). Agitação: 121 rpm. Tempo: 10 dias. Otimização de	Incubar filtrado e biomassa a 98°C por 1 hora em banho-maria, seguido por filtração e centrifugação.	Corante têxtil para algodão e tecidos.	Forte atividade antioxidante (DPPH e ABTS). Produção de metabólitos que promovem o crescimento de plantas (AIA,	O corante tingiu eficientemente o algodão e os tecidos, e não desbotou com tratamentos de água/detergentes/sol. Máxima absorção de corante em tecidos (0.65%).

Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos sobre produção de pigmentos naturais por fungos filamentosos

Autor(es) / Ano	Espécie Fúngica	Cor	Classe Química	Método de Produção	Condições de Cultivo	Método de Extração / Purificação	Aplicações	Propriedades Bioativas	Resultados Principais
Lourdes Morales-Oyevides et al. / 2020	Gêneros <i>Talaromyces</i> / <i>Penicillium</i>	Vermelho, Amarelo, Laranja, Violeta (e derivados)	Poliquetóides azaphilones (Monascus-like pigments)	Fermentação Submersa; Fermentação em Estado Sólido;	Cr em 800 µg/g aumentou a produção de corante. Temperatura ótima (SmF): 24-30°C. pH ótimo (SmF): Varia, mas 4.5-6.5 é comum. Agitação (SmF): 150-200 rpm. Luz: Incubação na escuridão estimula a síntese.	Recuperação de pigmentos extracelulares (centrifugação/filtração). Extração intracelulares com solventes ou fervura. Purificação por Cromatografia Coluna e TLC.	Indústria de alimentos, têxtil, farmacêutica, nutracêutica.	flavonoides, fenólicos, etc.). Antioxidante, antibacteriana, citotóxica contra linhagens de câncer. Pigmentos demonstram baixa toxicidade.	<i>Talaromyces</i> / <i>Penicillium</i> produzem pigmentos semelhantes aos de <i>Monascus</i> sem a produção conhecida de micotoxinas. Os pigmentos são mais estáveis sob calor, pH e luz do que outros pigmentos naturais.
Donglou Wang et al. / 2025	<i>Thermomyces dupontii</i> (cepa 2155)	Amarelo, Vermelho Escuro/Púrpura. Cor da colônia: Amarelo, Laranja, Marrom.	Antraquinonas (Carviolin A e derivados clorados/diclorados).	Fermentação Submersa	Temperaturas de 45°C (ótima) e 37°C (estresse pelo frio). Cultivo a 180 rpm.	Extração com acetato de etila (EtOAc). Purificação por cromatografia repetida (resina macroporosa, Sephadex LH-20, sílica gel e RP-18).	Contribui para a sobrevivência fúngica sob estresse pelo frio. Aumenta a formação de ATP e melhora a resistência à parede celular (Congo Red).	N/A	<i>T. dupontii</i> utiliza a cloração de antraquinonas para elevar a formação de ATP, compensando a diminuição de ATP causada pela reação Fenton extracelular.

Fonte: autora, 2025

A análise dos estudos reunidos na Tabela 2 demonstra uma ampla diversidade de fungos filamentosos capazes de produzir pigmentos naturais com variadas cores, estruturas químicas e aplicações industriais. Observa-se que a síntese de pigmentos policetídeos é predominante nas espécies analisadas, incluindo bikaverina em *Fusarium oxysporum*, xilindeína em *Chlorociboria aeruginascens*, pigmentos TD16 em *Paecilomyces lilacinus* e múltiplas azafilonas em espécies de *Monascus*, *Talaromyces* e *Penicillium*. Estes pigmentos apresentam cores que variam do vermelho ao azul-esverdeado, passando por tons amarelos, alaranjados e violetas, refletindo a grande plasticidade metabólica fúngica. Também se destacam as melaninas, uma classe distinta de policetídeos, presentes em *Aspergillus nidulans*, *Auricularia auricula* e *Pleurotus spp.*, responsáveis por tonalidades marrons, pretas e variações intermediárias.

Os métodos de produção, apresentados na Tabela 2, foram principalmente fermentação submersa (SmF) e fermentação em estado sólido (SSF), com condições de cultivo altamente variáveis. Fatores como pH, disponibilidade de nitrogênio, temperatura e presença de estresses físicos ou químicos influenciaram diretamente a síntese dos pigmentos. Por exemplo, *Fusarium oxysporum* produziu biomassa inicialmente vermelha que se tornou azul após tratamento térmico na presença de aminoácidos específicos, enquanto *Chlorociboria aeruginascens* intensificou a formação de xilindeína sob limitação de nitrogênio. Em *Thermomyces dupontii*, a cloração de antraquinonas aumentou a produção de ATP sob estresse pelo frio, evidenciando que a pigmentação pode ter papel fisiológico adaptativo.

Os métodos de extração e purificação, detalhados na Tabela 2, variaram conforme a classe química dos pigmentos e sua localização extracelular ou intracelular. Solventes orgânicos como acetato de etila, etanol e clorofórmio foram amplamente utilizados, muitas vezes associados a etapas cromatográficas. No caso das melaninas, predominaram extrações alcalinas seguidas de precipitação ácida e subsequentes etapas de purificação. Em *Monascus*, avanços como fermentação extrativa e uso de surfactantes facilitaram a recuperação de pigmentos extracelulares.

Os estudos também evidenciaram amplas aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e têxtil, além de potenciais uso em nanotecnologia e rotulagem fluorescente. Bioatividades recorrentes incluem propriedades antioxidantes, antitumorais, antimicrobianas e anti-inflamatórias, confirmando o papel funcional dos pigmentos fúngicos. Os resultados principais ressaltam tanto o potencial biotecnológico, como o tingimento eficiente de tecidos por *Talaromyces purpureogenus*, quanto avanços em engenharia metabólica, como a produção heteróloga de estruturas análogas ao ácido carmínico em *Aspergillus nidulans*.

Os resultados compilados evidenciam que os fungos filamentosos representam uma das fontes mais promissoras de pigmentos naturais devido à sua versatilidade metabólica, elevada produtividade e capacidade de síntese sob múltiplas condições ambientais. Essa diversidade é amplamente corroborada por trabalhos recentes, que destacam os policetídeos como classes centrais na coloração fúngica (Santos; Bicas, 2021; Singh *et al.*, 2021). A presença de vias biossintéticas moduláveis permite aos fungos ajustar a produção pigmentária em resposta a estresses, como limitação nutricional, variações térmicas ou exposição luminosa, comportamento observado em *Chlorociboria aeruginascens* e *Thermomyces dupontii*, e também descrito por Lin; Xu (2022).

A predominância da fermentação submersa nos estudos analisados confirma sua relevância industrial pela facilidade de controle de parâmetros e escalabilidade. Entretanto, a fermentação em estado sólido (SSF), embora menos explorada, apresenta resultados expressivos, especialmente para *Monascus*, onde a SSF proporcionou rendimentos mais elevados e composição diferenciada de pigmentos. Essa tendência está alinhada às observações de Morales-Oyervides *et al.* (2020), que ressaltam o potencial da SSF para reduzir custos operacionais e aumentar a concentração dos pigmentos extracelulares.

A variabilidade dos métodos de extração reflete a complexidade estrutural dos pigmentos fúngicos. Pigmentos hidrofóbicos, como antraquinonas e azafilonas, exigem solventes orgânicos e purificação cromatográfica, enquanto melaninas demandam processos drásticos de alcalinização e precipitação. Estudos como o de Ma *et al.* (2022) reforçam que a purificação da melanina ainda representa um gargalo tecnológico, pela necessidade de etapas sucessivas que garantam a

remoção de impurezas proteicas e fenólicas. Essa limitação também é mencionada por Singh *et al.* (2021).

No âmbito das aplicações, os pigmentos demonstraram amplo espectro de emprego industrial. Pigmentos de *Monascus* continuam sendo referência em corantes alimentícios e compostos bioativos, embora a preocupação com micotoxinas esteja impulsionando o uso de espécies alternativas, como *Talaromyces purpureogenus* e *Penicillium spp.* (Morales-Oyervides *et al.*, 2020). Pigmentos melamínicos, por sua vez, destacam-se como materiais avançados com potencial para fotoproteção, aplicações biomédicas e nanotecnologia, em consonância com revisões de literatura mais recentes (Lin; Zhang; Xu, 2023).

De modo geral, os dados indicam que as estratégias de otimização, incluindo manipulação de substratos, ajustes de pH, disponibilidade de íons e engenharia metabólica, são essenciais para aumentar rendimentos e modular a cor final. Frandsen *et al.* (2018), ao produzirem estruturas análogas ao ácido carmínico em *A.nidulans*, ilustram claramente como a engenharia genética pode expandir o repertório cromático dos fungos, superando limitações naturais.

Portanto, a literatura aponta que a produção de corantes e pigmentos naturais por fungos filamentosos encontra-se em clara expansão, impulsionada pela demanda por alternativas sustentáveis aos corantes sintéticos e pela alta aplicabilidade bioindustrial desses metabólitos. Ainda assim, permanecem desafios relativos à padronização de processos, escalabilidade e purificação, constituindo lacunas importantes para pesquisas futuras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão de literatura teve como objetivo analisar a produção de corantes e pigmentos naturais por fungos filamentosos, destacando suas características químicas, condições de biossíntese, aplicações industriais e potencial biotecnológico. Com base nos estudos examinados, constatou-se que esses organismos constituem uma fonte altamente promissora de compostos pigmentares, pertencentes principalmente às classes dos policetídeos, carotenoides e flavinas. Essas moléculas apresentam ampla variação estrutural, cromática e funcional, refletindo a elevada versatilidade metabólica dos fungos filamentosos.

Os resultados evidenciam que gêneros como *Monascus*, *Talaromyces*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Aspergillus* e *Chlorociboria* destacam-se na produção de pigmentos com propriedades bioativas relevantes, tais como atividade antioxidante, antimicrobiana, antitumoral, anti-inflamatória e fotoprotetora. Observou-se também que a síntese e o rendimento desses pigmentos são significativamente influenciados por condições ambientais, incluindo composição do meio de cultivo, pH, temperatura, disponibilidade de nitrogênio e presença de estresses físico-químicos. Tais fatores permitem modular a tonalidade e a produtividade dos pigmentos, reforçando o potencial desses micro-organismos como biofábricas de grande plasticidade.

A análise dos dados confirma a relevância dos fungos filamentosos como alternativa sustentável aos corantes sintéticos. Além de apresentarem elevada eficiência produtiva, esses micro-organismos podem ser cultivados em substratos de baixo custo, incluindo resíduos agroindustriais, o que contribui para a redução de impactos ambientais e para a promoção de práticas alinhadas à economia circular. A produção microbiana de pigmentos também se destaca por exigir menor uso de solventes agressivos e permitir maior controle das condições de processo, favorecendo a obtenção de produtos mais seguros para as indústrias alimentícia, cosmética, farmacêutica e têxtil.

Apesar dos avanços observados, persistem lacunas significativas na literatura. Dentre elas, destaca-se a necessidade de ampliar estudos com espécies alternativas a *Monascus purpureus*, devido à produção da micotoxina citrinina. Nesse sentido, o gênero *Talaromyces* apresenta-se como alternativa promissora, por gerar pigmentos estruturalmente semelhantes sem registros tóxicos. Além disso, há

escassez de investigações comparativas que avaliem, de forma sistemática, o impacto de diferentes substratos, temperaturas, fontes de nitrogênio e faixas de pH sobre a produção de pigmentos específicos, o que limita a otimização em escala industrial. A integração de ferramentas de engenharia metabólica, genômica, transcriptômica e metabolômica também se mostra pouco explorada, embora essencial para o entendimento detalhado das vias biossintéticas e para o aprimoramento do rendimento pigmentário.

Diante dessas lacunas, recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem a caracterização de novos fungos pigmentogênicos, avaliem substratos agroindustriais alternativos, investiguem parâmetros ambientais extremos para indução de cores diferenciadas e adotem abordagens integradas de bioprocessos e biologia molecular. Tais avanços são fundamentais para consolidar os fungos filamentosos como fontes viáveis, seguras e economicamente competitivas de pigmentos naturais, contribuindo para a substituição progressiva dos corantes sintéticos e para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- BILLS, Gerald F.; GLOER, James B. Biologically Active Secondary Metabolites from the Fungi. **Microbiology Spectrum**, v. 4, n. 6, p. 1-32, 23 dez. 2016.
- CHAUDHARY, Vishu *et al.* Natural pigment from *Monascus*: The production and therapeutic significance. **Journal of Applied Microbiology**, v. 133, n. 1, p. 18–38, 2022.
- CHEN, Gong *et al.* Production and biological activities of yellow pigments from *Monascus* fungi. **World Journal Of Microbiology And Biotechnology**, v. 32, n. 8, p. 1-8, 29 jun. 2016.
- CONRADO, Rafael *et al.* Overview of Bioactive Fungal Secondary Metabolites: cytotoxic and antimicrobial compounds. **Antibiotics**, v. 11, n. 11, p. 1604, 11 nov. 2022.
- DUFOSSÉ, Laurent *et al.* Filamentous fungi are large-scale producers of pigments and colorants for the food industry. **Current Opinion In Biotechnology**, v. 26, p. 56-61, abr. 2014.
- FRANSEN, Rasmus J. N. *et al.* Heterologous production of the widely used natural food colorant carminic acid in *Aspergillus nidulans*. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 27 ago. 2018.
- HUSSAIN, Iqbal *et al.* Optimized production and characterization of red dye from *Talaromyces purpureogenus* PH7 for application as a textile dye. **Bmc Microbiology**, v. 25, n. 1, p. 1-10, 2 out. 2025.
- KALRA, Rishu; CONLAN, Xavier A.; GOEL, Mayurika. Fungi as a Potential Source of Pigments: harnessing filamentous fungi. **Frontiers In Chemistry**, v. 8, p. 1-23, 8 maio 2020.
- KULDAU, G. *et al.* Clavicipitaceous endophytes: their ability to enhance resistance of grasses to multiple stresses. **Biological Control**, v. 46, n. 1, p. 57-71, jul. 2008.
- LIN, Lan *et al.* Genetic and Environmental Factors Influencing the Production of Select Fungal Colorants: challenges and opportunities in industrial applications. **Journal Of Fungi**, v. 9, n. 5, p. 1-19, 18 maio 2023.
- LIN, Lan *et al.* Production of Fungal Pigments: molecular processes and their applications. **Journal Of Fungi**, v. 9, n. 1, p. 1-25, 28 dez. 2022.
- LIN, Lan *et al.* Production of Fungal Pigments: molecular processes and their applications. **Journal Of Fungi**, v. 9, n. 1, p. 1-25, 28 dez. 2022.
- MA, Zihui *et al.* Studies on the biosynthetic pathways of melanin in *Auricularia auricula*. **Journal Of Basic Microbiology**, v. 62, n. 7, p. 1-14, 25 abr. 2022.

MISHRA, Rahul Chandra *et al.* Characterization of an Endophytic Strain *Talaromyces assiutensis*, CPEF04 With Evaluation of Production Medium for Extracellular Red Pigments Having Antimicrobial and Anticancer Properties. **Frontiers In Microbiology**, v. 12, p. 1-16, 4 ago. 2021.

MORALES-OYERVIDES, Lourdes *et al.* Biotechnological approaches for the production of natural colorants by *Talaromyces*/*Penicillium*: a review. **Biotechnology Advances**, v. 43, p. 1-23, nov. 2020.

MUSSAGY, Cassamo U., *et al.* Production and extraction of carotenoids produced by microorganisms. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, p. 1095–1114, 2019.

NIKITIN, D. A. Ecological Characteristics of Antarctic Fungi. **Doklady Biological Sciences**, v. 508, n. 1, p. 32-54, fev. 2023.

OLIVEIRA, Luciana A. de *et al.* Ascomycota as a source of natural colorants. **Brazilian Journal Of Microbiology**, v. 53, n. 3, p. 1199-1220, 26 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC.

OLIVEIRA, Luciana A. *et al.* Exploring colorant production by amazonian filamentous fungi: stability and applications. **Journal Of Basic Microbiology**, v. 64, n. 2, p. 1-22, 5 dez. 2023.

POWERS-FLETCHER, Margaret V. *et al.* Filamentous Fungi. **Microbiology Spectrum**, v. 4, n. 3, p. 1, 6 Maio 2016.

REE YOON, H., *et al.* Improved natural food colorant production in the filamentous fungus *Monascus ruber* using CRISPR-based engineering. **Food research international** (Ottawa, Ont.), 167, 112651. (2023)

SANTOS, Marcela Colombo dos *et al.* Natural blue pigments and bikaverin. **Microbiological Research**, v. 244, p. 1-12, mar. 2021.

SINGH, Sanju *et al.* Microbial melanin: recent advances in biosynthesis, extraction, characterization, and applications. **Biotechnology Advances**, v. 53, p. 1-22, dez. 2021.

SOUZA, Patrícia Nirlane da Costa *et al.* Production and chemical characterization of pigments in filamentous fungi. **Microbiology**, v. 162, p. 12–22, 2016.

SPITELLER, Peter. Chemical ecology of fungi. **Natural Product Reports**, v. 32, n. 7, p. 971-993, 2015.

STACHOWIAK, Barbara *et al.* Astaxanthin for the Food Industry. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 1-18, 2 maio 2021.

STANGE, Stephanie *et al.* Influence of the Nutrients on the Biomass and Pigment Production of *Chlorociboria aeruginascens*. **Journal Of Fungi**, v. 5, n. 2, p. 1-15, 16 maio 2019.

TOMA, M. A. *et al.* Pigmentos fúngicos: carotenoides, riboflavina e policetídeos com diversas aplicações. **Journal of Fungi**, v. 9, n. 4, art. 454, 2023.

TORRES, Fábio Aurélio Esteves *et al.* Natural colorants from filamentous fungi. **Applied Microbiology And Biotechnology**, v. 100, n. 6, p. 2511-2521, 18 jan. 2016.

VENIL, Chidambaram Kulandaisamy *et al.* Fungal Pigments: potential coloring compounds for wide ranging applications in textile dyeing. **Journal Of Fungi**, v. 6, n. 2, p. 68, 20 maio 2020.

WANG, Donglou *et al.* Novel Anthraquinone Chlorination Contributes to Pigmentation and ATP Formation in *Thermomyces dupontii*. **Microbial Biotechnology**, v. 18, n. 10, p. 1-18, out. 2025.

XIA, L. *et al.* Isolation, identification and optimization of functional natural pigments produced by *Talaromyces atroroseus* LWT-1. **LWT – Food Science and Technology**, 2025.

YU, Xianyong *et al.* Separation, quantification and characterisation of the pigment produced by *Paecilomyces lilacinus* TD16. **Natural Product Research**, v. 36, n. 19, p. 1-6, 24 abr. 2021.

ZHANG, W. *et al.* Isolation and identification of pigments in oyster mushrooms with black, yellow and pink caps. **Food Chemistry**, 2022.