

## Os fungos melanizados e atenuação da radiação ionizante: Revisão bibliográfica

Melanized fungi and ionizing radiation attenuation: A literature review

Hongos melanizados y atenuación de la radiación ionizante: Una revisión de la literatura

Recebido: 13/12/2025 | Revisado: 20/12/2025 | Aceitado: 21/12/2025 | Publicado: 22/12/2025

**Bruno Igor Barboza Gomes**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8207-5079>

Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: Brunoigo506@gmail.com

**Antonio Marques Dos Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-0710>

Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: antonio.marques@ifrn.edu.b

**Bruno Lustosa De Moura**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6295-3526>

Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: bruno.moura@ifrn.edu.br

### Resumo

A radiação ionizante representa um desafio crítico em contextos terrestres e, especialmente, na exploração espacial, onde níveis elevados de radiação cósmica ameaçam a segurança de missões tripuladas fora da magnetosfera terrestre. Nesse cenário, os fungos melanizados radiotróficos emergem como alternativa biotecnológica promissora devido à capacidade singular da melanina fúngica de absorver, dissipar e atenuar radiação ionizante, além de potencialmente converter parte dessa energia em benefício metabólico. O presente trabalho tem como objetivo examinar criticamente, por meio de uma revisão bibliográfica, o papel dos fungos melanizados na atenuação da radiação ionizante e avaliar sua viabilidade enquanto alternativa biotecnológica emergente para sistemas de blindagem radiológica. Esta pesquisa, conduzida por meio de revisão bibliográfica exploratória e qualitativa, analisou estudos laboratoriais e experimentos realizados na Estação Espacial Internacional, que demonstram aumento de crescimento e capacidade protetora de espécies como *Cladosporium sphaerospermum*. Os resultados indicam que a melanina fúngica pode atuar como um radioprotetor natural eficiente, com aplicações voltadas à construção de estruturas autorregenerativas e sistemas de blindagem produzidos in situ em ambientes extraterrestres. Embora promissores, os avanços ainda são limitados por lacunas metodológicas e pela necessidade de maior padronização e aprofundamento experimental. Assim, destaca-se o potencial dos fungos melanizados para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de proteção radiológica tanto em ambientes terrestres quanto espaciais.

**Palavras-chave:** Fungos melanizados; Melanina fúngica; Radiação ionizante; Radiotropismo; Blindagem biotecnológica; Exploração espacial; Proteção radiológica.

### Abstract

Ionizing radiation represents a critical challenge in terrestrial contexts and, especially, in space exploration, where high levels of cosmic radiation threaten the safety of manned missions outside the Earth's magnetosphere. In this scenario, radiotrophic melanized fungi emerge as a promising biotechnological alternative due to the unique ability of fungal melanin to absorb, dissipate, and attenuate ionizing radiation, as well as potentially converting some of this energy into metabolic benefits. This work aims to critically examine, through a literature review, the role of melanized fungi in the attenuation of ionizing radiation and evaluate their viability as an emerging biotechnological alternative for radiological shielding systems. This research, conducted through an exploratory and qualitative literature review, analyzed laboratory studies and experiments carried out on the International Space Station, which demonstrate increased growth and protective capacity of species such as *Cladosporium sphaerospermum*. The results indicate that fungal melanin can act as an efficient natural radioprotector, with applications aimed at building self-regenerating structures and shielding systems produced in situ in extraterrestrial environments. Although promising, advances are still limited by methodological gaps and the need for greater standardization and experimental depth. Thus, the potential of melanized fungi for the development of sustainable radiological protection technologies in both terrestrial and space environments is highlighted.

**Keywords:** Melanized fungi; Fungal melanin; Ionizing radiation; Radiotropism; Biotechnological shielding; Space exploration; Radiological protection.

## Resumen

La radiación ionizante representa un desafío crítico en contextos terrestres y, especialmente, en la exploración espacial, donde altos niveles de radiación cósmica amenazan la seguridad de las misiones tripuladas fuera de la magnetosfera terrestre. En este escenario, los hongos melanizados radiotróficos emergen como una alternativa biotecnológica prometedora debido a la capacidad única de la melanina fúngica para absorber, disipar y atenuar la radiación ionizante, así como para convertir potencialmente parte de esta energía en beneficios metabólicos. Este trabajo tiene como objetivo examinar críticamente, a través de una revisión bibliográfica, el papel de los hongos melanizados en la atenuación de la radiación ionizante y evaluar su viabilidad como una alternativa biotecnológica emergente para sistemas de blindaje radiológico. Esta investigación, realizada a través de una revisión bibliográfica exploratoria y cualitativa, analizó estudios de laboratorio y experimentos realizados en la Estación Espacial Internacional, que demuestran un mayor crecimiento y capacidad protectora de especies como *Cladosporium sphaerospermum*. Los resultados indican que la melanina fúngica puede actuar como un radioprotector natural eficaz, con aplicaciones destinadas a la construcción de estructuras autorregenerativas y sistemas de blindaje producidos in situ en entornos extraterrestres. Si bien son prometedores, los avances aún se ven limitados por lagunas metodológicas y la necesidad de una mayor estandarización y profundidad experimental. Por lo tanto, se destaca el potencial de los hongos melanizados para el desarrollo de tecnologías sostenibles de protección radiológica tanto en entornos terrestres como espaciales.

**Palabras clave:** Hongos melanizados; Melanina fúngica; Radiación ionizante; Radiotropismo; Blindaje biotecnológico; Exploración espacial; Protección radiológica.

## 1. Introdução

Com o advento da física nuclear e a descoberta das primeiras formas de radiação ionizante, intensificou-se a busca por métodos seguros de utilização e mitigação dessa energia. Embora essa preocupação tenha se consolidado historicamente nos campos da energia nuclear e da saúde (Okuno, 2013; Tauhata et al., 2013), a problemática relacionada à exposição a ambientes altamente irradiados ganhou nova centralidade no contexto da exploração espacial, onde a radiação cósmica representa um dos principais entraves para missões tripuladas além da magnetosfera terrestre (Vasileiou & Summerer, 2020).

Nesse cenário, a comunidade científica tem direcionado esforços para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e soluções produzidas in situ, capazes de reduzir a dependência de materiais tradicionais de blindagem, uma estratégia coerente com tendências metodológicas contemporâneas em pesquisa aplicada (Gil, 2008; Lakatos & Marconi, 2003, 2007; Prodanov & Freitas, 2013). Entre essas abordagens, destaca-se o uso de microrganismos com propriedades biofísicas singulares, especialmente os fungos melanizados radiotróficos, organismos que habitam ambientes extremos, como as regiões adjacentes ao reator de Chernobyl (Dighton, Tugay & Zhdanova, 2008). Esses fungos demonstram não apenas tolerância excepcional, mas também um aparente benefício metabólico associado à exposição à radiação ionizante (Dadachova & Casadevall, 2008; Robertson et al., 2012; Malo & Dadachova, 2019).

A principal base bioquímica dessa resiliência reside na melanina fúngica, um pigmento escuro capaz de absorver, dissipar e potencialmente transformar energia ionizante, caracterizando-se como um radioprotetor natural cujas propriedades físico-químicas têm sido amplamente discutidas na literatura (Meredith & Sarna, 2006; Dadachova & Casadevall, 2008; Malo & Dadachova, 2019). Evidências experimentais recentes fortalecem esse entendimento, demonstrando, por exemplo, alterações no crescimento e pigmentação de fungos melanizados quando expostos à radiação gama e ultravioleta (Bland et al., 2022).

No âmbito espacial, estudos conduzidos a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS) evidenciaram que fungos melanizados, como *Cladosporium sphaerospermum*, podem apresentar maior crescimento sob exposição contínua à radiação ionizante, sugerindo um possível comportamento radiotrófico em microgravidade (Averesch, Shunk & Kern, 2022; Shunk et al., 2020). Esses achados reforçam o potencial biotecnológico dos fungos melanizados e de sua melanina para aplicações em sistemas de blindagem radiológica.

A relevância desse pigmento extrapola o campo da microbiologia e tem motivado instituições como a National Aeronautics and Space Administration (NASA) a investigar o emprego de fungos melanizados na concepção de estruturas autorregenerativas e em novas estratégias de proteção para habitats extraterrestres (NASA, 2020). Pesquisas recentes também

apontam a aplicabilidade desses organismos como agentes protetores e biorremediadores em áreas afetadas por radiação terrestre, ampliando o escopo de interesse biotecnológico (Tibolla & Fischer, 2025).

Diante da crescente importância da proteção radiológica em ambientes extremos, particularmente no âmbito da exploração espacial, e considerando as robustas evidências que apontam para o radiotropismo e para a capacidade atenuadora da melanina fúngica, o presente trabalho tem como objetivo examinar criticamente, por meio de uma revisão bibliográfica, o papel dos fungos melanizados na atenuação da radiação ionizante e avaliar sua viabilidade enquanto alternativa biotecnológica emergente para sistemas de blindagem radiológica.

## 2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa documental de fonte indireta em artigos científicos (Snyder, 2019) num estudo com pouca sistematização (Pereira et al., 2018) e do tipo de revisão narrativa da literatura (Rother, 2007) e, com uso das palavras de busca: Fungos melanizados, Melanina fúngica, Radiação ionizante, Radiotropismo, Blindagem biotecnológica, Exploração espacial e, Proteção radiológica.

A presente investigação foi desenvolvida com base em uma abordagem metodológica adequada aos objetivos propostos. O estudo caracteriza-se como exploratório quanto aos fins, pois busca proporcionar maior familiaridade com o fenômeno analisado e consolidar o referencial teórico existente, conforme recomenda Gil (2008). A pesquisa possui natureza qualitativa, uma vez que se concentra na compreensão aprofundada da interação entre os processos biológicos de fungos melanizados e os princípios da física da radiação, privilegiando a interpretação analítica do fenômeno.

O procedimento técnico utilizado foi a pesquisa bibliográfica, entendida como o levantamento, seleção e análise de produções científicas relevantes sobre o tema, conforme descrito por Prodanov e Freitas (2013). A coleta de dados teóricos ocorreu por meio de buscas sistemáticas em bases científicas especializadas, tais como PubMed e Frontiers Media S.A., e em indexadores multidisciplinares, como Google Scholar. Priorizou-se a utilização de artigos científicos submetidos à revisão por pares. Entretanto, diante do número reduzido de estudos quantitativos consolidados sobre a atenuação biológica da radiação em ambiente espacial, também foram considerados preprints de relevância científica, como o estudo conduzido a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS) envolvendo *Cladosporium sphaerospermum*. Tais materiais foram analisados com cautela metodológica e não constituíram a única base para as conclusões.

Foram estabelecidos critérios de delimitação e seleção do material consultado. Consideraram-se publicações compreendidas entre os anos de 2000 e 2025, período em que se concentram os principais avanços sobre radiotropismo e melanização em ambientes radioativos. Os critérios de inclusão abrangeram artigos originais, revisões sistemáticas ou narrativas, capítulos de livros, preprints relevantes e estudos que abordassem fungos melanizados, melanina fúngica, radiação ionizante, radiotropismo ou biotecnologias de blindagem radiológica. Foram excluídos documentos sem rigor científico, textos opinativos, materiais sem acesso integral e estudos que não apresentavam relação direta com o tema da pesquisa.

A busca inicial resultou em aproximadamente 40 trabalhos, dos quais 20 atenderam aos critérios estabelecidos e compuseram o corpus final da análise. O processo de seleção ocorreu em etapas: levantamento do material, leitura de títulos e resumos, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, leitura integral dos textos selecionados, categorização temática e síntese crítica dos conteúdos para fundamentação da discussão teórica.

A análise dos dados foi realizada por meio de análise temática qualitativa, permitindo identificar padrões, convergências, lacunas e contribuições relevantes referentes ao radiotropismo, à interação entre melanina e radiação ionizante, ao potencial de atenuação observado e às perspectivas tecnológicas emergentes. As limitações metodológicas incluem o número reduzido de estudos quantitativos sobre o tema em ambiente espacial, a concentração de pesquisas em poucos grupos

internacionais, a dependência parcial de preprints e a limitação linguística devido à predominância de estudos em inglês e português.

### **3. Resultados e Discussão**

#### **3.1 Radiação Ionizante: Processos de Ionização, Fontes Naturais e Artificiais e seus Efeitos Biológicos**

A literatura caracteriza a radiação ionizante como uma forma de energia dotada de capacidade para remover elétrons de átomos e moléculas, produzindo pares de íons e desencadeando uma série de interações físicas e químicas na matéria (Okuno, 2013). Essa radiação compreende tanto partículas, como alfa e beta, quanto ondas eletromagnéticas de alta energia, como raios gama, cuja penetração e potencial de interação variam significativamente (Tibolla & Fischer, 2025). O dano biológico associado decorre da deposição de energia em estruturas celulares, levando a quebras químicas e instabilidade molecular (Soares, 2008).

Conforme discutido por Soares (2008), o DNA constitui o principal alvo biológico, de modo que suas lesões podem resultar em morte celular, mutações, inviabilização da divisão e, potencialmente, carcinogênese. Tais efeitos podem manifestar-se de modo determinístico, com dose limiar e gravidade crescente, ou de modo estocástico, quando a probabilidade de ocorrência, e não a gravidade, aumenta proporcionalmente à dose.

As fontes de radiação ionizante podem ser naturais, como radionuclídeos presentes no solo e radiação cósmica, ou artificiais, provenientes de reatores nucleares, ambientes industriais ou equipamentos de diagnóstico (Tauhata et al., 2013). A radiação cósmica é particularmente relevante no contexto espacial, uma vez que sua intensidade cresce com a altitude, tornando astronautas e pilotos mais expostos que indivíduos ao nível do solo (Okuno, 2013), o que expressa a problemática destacada na introdução sobre riscos radiológicos em missões além da magnetosfera terrestre.

#### **3.2 Os Fungos Radiotróficos e o Fenômeno do Radiotropismo**

A revisão bibliográfica mostra que ambientes altamente irradiados, como a zona de exclusão de Chernobyl, apresentam uma diversidade expressiva de fungos melanizados, especialmente *Cladosporium sphaerospermum* (Dighton, Tugay & Zhdanova, 2008). Pesquisas seminais de Dadachova e Casadevall (2008) demonstram que tais fungos exibem crescimento orientado à fonte de radiação, fenômeno denominado radiotropismo, reforçando a hipótese de que esses organismos conseguem aproveitar metabolicamente a energia ionizante.

Esse comportamento, que envolve reorganizações metabólicas e resposta celular aprimorada sob radiação, fundamenta o interesse biotecnológico descrito na introdução, ao sugerir que processos naturais observados em ambientes extremos podem ser aplicados a estratégias modernas de blindagem radiológica.

#### **3.3 O Mecanismo de Atenuação: O Papel da Melanina**

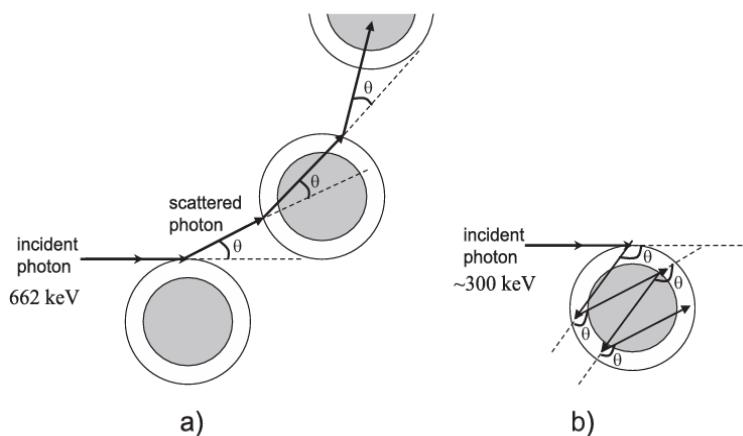
A melanina fúngica, pigmento amplamente descrito na literatura, desempenha papel central na interação dos fungos melanizados com a radiação ionizante. Estudos de Meredith e Sarna (2006), Dadachova e Casadevall (2008) e Malo e Dadachova (2019) apontam que a melanina apresenta:

- alta capacidade de absorção de amplo espectro eletromagnético;
- habilidade de transdução energética associada à radiação;
- atenuação física de fótons de alta energia;
- neutralização de radicais livres gerados pela radiólise da água.

Essas propriedades sustentam a hipótese da radiossíntese, segundo a qual a melanina converte energia ionizante em

energia metabólica útil (Dadachova & Casadevall, 2008). Um exemplo do seu papel na atenuação física é detalhado na Figura 1, na qual (a) representa o espalhamento frontal dos fótons iniciais de alta energia na melanina e (b) a oscilação e o espalhamento para trás dos fótons secundários de energia reduzida dentro das esferas de melanina. Neste modelo proposto por (Malo & Dadachova, 2019), é possível entender como a microestrutura da melanina dissipia a energia, reduzindo significativamente a dose de radiação que alcança o interior da célula. Tais achados reforçam a importância bioquímica desse pigmento, destacada também na introdução, como elemento-chave para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e soluções biológicas *in situ* para ambientes irradiados.

**Figura 1** - Modelo proposto de dispersão da radiação ionizante por esferas de melanina.



Fonte: Dadachova et al. (2008).

### 3.4 Análise da Capacidade Protetora dos Fungos

A literatura revisada indica que fungos melanizados exibem maior resistência e viabilidade em ambientes submetidos à radiação. Como mostram os estudos pioneiros de Dadachova et al. (2007), amplamente citados nos trabalhos subsequentes, que demonstraram que cepas melanizadas de *Cryptococcus neoformans* apresentam resistência superior quando comparadas a variantes albinas expostas à radiação gama.

Essa observação foi reforçada por Robertson et al. (2012), que identificaram aceleração do crescimento de *Wangiella dermatitidis* sob radiação ionizante. De forma complementar, Bland et al. (2022) verificaram que *Cladosporium cladosporioides* apresentou alterações fenotípicas, incluindo intensificação da pigmentação, quando submetido à radiação gama e ultravioleta, indicando resposta adaptativa.

Esses achados convergem para a premissa central deste trabalho, já destacada na introdução, de que a melanina fúngica constitui um radioprotetor natural com potencial aplicação tecnológica.

### 3.5 Aplicações Biotecnológicas e Perspectivas Futuras

A possibilidade de utilizar fungos melanizados em soluções de blindagem radiológica tem ganhado destaque, especialmente no setor espacial. Projetos da NASA vêm investigando o emprego desses organismos para a criação de estruturas vivas, autorregenerativas e produzidas *in situ* para habitats extraterrestres (NASA, 2020), alinhando-se à tendência apontada por Gil (2008), Lakatos e Marconi (2003, 2007) e Prodanov e Freitas (2013) quanto à busca por tecnologias sustentáveis e inovadoras.

No contexto orbital, Averesch, Shunk e Kern (2022) forneceram a primeira demonstração quantitativa de atenuação de radiação em microgravidade, utilizando biomassa de *C. sphaerospermum* cultivada na Estação Espacial Internacional. Sensores

instalados no experimento registraram redução mensurável dos níveis de radiação sob a camada fúngica, confirmando achados preliminares apresentados por Shunk et al. (2020).

Além da aplicação espacial, a literatura aponta que tais organismos podem atuar como agentes de micorremediação de ambientes terrestres contaminados por radionuclídeos, como césio e urânio (Tibolla & Fischer, 2025), constituindo uma alternativa sustentável e de menor custo em relação aos materiais tradicionais utilizados na blindagem radiológica.

#### **4. Conclusão**

Este estudo, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo, analisou o potencial dos fungos melanizados na atenuação da radiação ionizante, articulando os princípios biofísicos que fundamentam esse fenômeno e as evidências laboratoriais e espaciais disponíveis. Verificou-se que diferentes espécies radiotróficas, como *Cladosporium sphaerospermum*, *Cryptococcus neoformans* e *Aureobasidium pullulans*, apresentam mecanismos singulares de adaptação mediados pela melanina fúngica, pigmento que atua tanto na proteção contra danos diretos da radiação quanto no potencial de conversão energética descrita pela hipótese da radiossíntese.

Os resultados revisados demonstram que esses organismos não apenas exibem elevada resiliência, mas podem apresentar crescimento favorecido sob radiação ionizante, caracterizando o radiotropismo discutido na literatura. Esse comportamento, observado em ambientes terrestres altamente irradiados e confirmado em experimentos conduzidos na Estação Espacial Internacional, reforça o interesse biotecnológico identificado ao longo deste trabalho. Em especial, os estudos realizados com *C. sphaerospermum* no ambiente orbital evidenciaram atenuação estatisticamente significativa da radiação, fornecendo uma das primeiras demonstrações quantitativas em microgravidade. Esses achados complementam análises laboratoriais com biocompósitos de melanina, que apresentaram aumentos expressivos de eficiência para fótons gama de alta energia, validando o potencial físico desse biomaterial.

Apesar dos avanços observados, foram identificadas limitações importantes na literatura, sobretudo a escassez de estudos quantitativos robustos, a variabilidade metodológica entre pesquisas e a falta de padronização na caracterização estrutural da melanina fúngica. Essas lacunas refletem os desafios apontados na presente investigação e evidenciam a necessidade de abordagens interdisciplinares biotecnologia, física nuclear, engenharia de materiais, microbiologia e ciências espaciais.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de estudos experimentais sistemáticos com melaninas isoladas de diferentes espécies, a padronização de protocolos de medição de atenuação, a modelagem físico-química da radiossíntese e a avaliação da viabilidade desses organismos e biomateriais em estruturas híbridas de blindagem. Considerando hipóteses recentes que sugerem participação de fenômenos de biologia quântica, como tunelamento e transferência de spin, na interação melanina–radiação, investigações sobre as propriedades semicondutoras desse pigmento podem ampliar significativamente a compreensão de sua funcionalidade.

Diante das evidências analisadas, conclui-se que os fungos melanizados e a melanina fúngica constituem uma alternativa biotecnológica promissora, sustentável e potencialmente escalável para aplicações em proteção radiológica, tanto em ambientes terrestres quanto em cenários de exploração espacial de longa duração. A consolidação desse campo poderá contribuir de forma estratégica para o desenvolvimento de soluções produzidas *in situ* e para a construção de sistemas de blindagem mais eficientes, autorregenerativos e adaptáveis às condições extremas do espaço, respondendo às necessidades destacadas desde a introdução deste trabalho.

#### **Agradecimentos**

Aos meus professores e, em especial, aos meus orientadores, Dr. Antonio Marques e Dr. Bruno Lustosa, pela paciência,

pelos ensinamentos valiosos e por acreditar no meu potencial, guiando-me com maestria até a conclusão deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até aqui, o meu mais sincero obrigado.

## Referências

- Averesch, N. J. H., Shunk, G. K., & Kern, C. (2022). Cultivation of the dematiaceous fungus *Cladosporium sphaerospermum* aboard the International Space Station and effects of ionizing radiation. *Frontiers in Microbiology*, 13, 877625. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.877625>
- Bland, J., et al. (2022). Evaluating changes in growth and pigmentation of *Cladosporium cladosporioides* and *Paecilomyces variotii* in response to gamma and ultraviolet irradiation. *Scientific Reports*, 12, 12142. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16063-z>
- Dadachova, E., & Casadevall, A. (2008). Ionizing radiation: How fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin. *Current Opinion in Microbiology*, 11(6), 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2008.09.013>
- Dighton, J., Tugay, T., & Zhdanova, N. (2008). Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS Microbiology Letters*, 281(1), 109-120. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01108.x>
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (6. ed.). Editora Atlas.
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2003). *Fundamentos de metodología científica* (5. ed.). Editora Atlas.
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2007). *Metodologia do trabalho científico* (6. ed.). Editora Atlas.
- Malo, N., & Dadachova, E. (2019). Melanin as an energy transducer and a radioprotector in black fungi. In S. M. Tiquia-Arashiro & M. Grube (Eds.), *Fungi in extreme environments: Ecological role and biotechnological significance* (pp. 249-266). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19030-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19030-9_10)
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2020). Mycelial composites for space habitats. [https://www.nasa.gov/directories/spacetech/niac/2020\\_Phase\\_I\\_Phase\\_II/myco-architecture/](https://www.nasa.gov/directories/spacetech/niac/2020_Phase_I_Phase_II/myco-architecture/)
- Okuno, E. (2013). Radiação: Efeitos, riscos e benefícios. Oficina de Textos.
- Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico* (2. ed.). Feevale. [https://www.feevale.br/Composicao/com\\_apoio\\_institucional/proppex/Pdf/E-book\\_Metodologia\\_do\\_Trabalho\\_Cientifico.pdf](https://www.feevale.br/Composicao/com_apoio_institucional/proppex/Pdf/E-book_Metodologia_do_Trabalho_Cientifico.pdf)
- Robertson, K. L., et al. (2012). Ionizing radiation: Molecular and cellular responses in the fungal kingdom. *PLoS One*, 7(12), e50963. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050963>
- Shunk, G. K., Gomez, X. R., Kern, C., & Averesch, N. J. H. (2020). Growth of the radiotrophic fungus *Cladosporium sphaerospermum* aboard the International Space Station and effects of ionizing radiation [Pre-print]. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.205534>
- Soares, J. C. A. C. R. (2008). *Princípios de física em radiodiagnóstico* (2. ed. rev.). Colégio Brasileiro de Radiologia.
- Tauhata, L., et al. (2013). *Radioproteção e dosimetria: Fundamentos* (9. ed. rev.). IRD/CNEN. [http://www.ird.gov.br/images/stories/Arquivos/Prt/Apostila\\_RD\\_Fundamentos.pdf](http://www.ird.gov.br/images/stories/Arquivos/Prt/Apostila_RD_Fundamentos.pdf)
- Tibolla, M. H., & Fischer, J. (2025). Fungos radiotróficos e sua utilização como agentes de biorremediação de áreas afetadas por radiação e como agentes protetores. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 14(1), e2514147965. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i1.47965>
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), 5-6.
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Editora da UFSM.
- Vasileiou, T., & Summerer, L. (2020). Biotechnology for radiation shielding in space habitats. *Acta Astronautica*, 170, 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.019>
- Meredith, P.; Sarna, T. The physical and chemical properties of eumelanin. *Pigment Cell Research*, 19(6), 572–594, dez. 2006.
- Zhdanova, N. N., Zakharchenko, V. A., Vember, V. V., & Nakonechnaya, L. T. (2000). Fungi from Chernobyl: mycobiota of the inner regions of the containment structures of the damaged nuclear reactor. *Mycological Research*, 104(12), 1421–1426. <https://doi.org/10.1017/S0953756200002756>