

BIODEGRADAÇÃO DE CORANTES POR EXTRATO ENZIMÁTICO DE AGARICOMYCETES CULTIVADO EM MEIO LÍQUIDO

BIODEGRADATION OF DYES BY ENZYMATIC EXTRACT FROM AGARICOMYCETES CULTIVATED IN LIQUID MEDIUM

BIODEGRADACIÓN DE TINTES POR EXTRACTO ENZIMÁTICO DE AGARICOMYCETES CULTIVADOS EN MEDIO LÍQUIDO

Maria Alice Ribeiro Alves¹ ; Mário Jeová dos Santos² ; Kivia dos Santos Machado³ ;
Joana Cavalcante de Moura⁴ ; Renato Lúcio Mendes Alvarenga^{5*} 

¹Mestranda em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Recife, Brasil;

²Mestrando em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)Pernambuco, Recife, Brasil;

³Doutoranda em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)Pernambuco, Recife, Brasil;

⁴Doutoranda em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)Pernambuco, Recife, Brasil; ⁵Doutor em Biologia de Fungos, Docente, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)Pernambuco, Recife, Brasil.

* Autor para correspondência: renatolma@gmail.com.

Recebido: 03/04/2025 | Aprovado: 15/04/2025 | Publicado: 24/04/2025

Resumo: Os fungos são essenciais para a estabilidade ecológica e têm grande potencial biotecnológico, sendo usados na produção de enzimas, como a lacase, para degradar materiais complexos. Este estudo teve como objetivo avaliar a atividade da lacase, a produção de biomassa micelial e a capacidade de descoloração de corantes industriais a partir de extratos enzimáticos de espécies de Agaricomycetes cultivados em meio líquido. Para a descoloração foram utilizados dois corantes: Remazol Brilliant Blue R e Vermelho Congo. Inicialmente, realizaram-se testes qualitativos com ácido tânico em meio sólido, a determinação da atividade da lacase em meios líquidos. O isolado *Polyporus* sp. (E01) obteve a maior descoloração do corante RBBR (95,72%), enquanto *Pycnoporus* sp. (E04) foi o mais eficaz na descoloração do corante Vermelho Congo (VC), com 83,23%. *Trametes* sp. (E02) e *Fomitopsis* sp. (E03). Em relação à atividade de lacase, *Polyporus* sp. (E03) demonstrou a maior atividade enzimática (278.025,00 U/L), seguido por *Trametes* sp. (E02) com 202.407,00 U/L, enquanto *Pycnoporus* sp. (E04) e *Fomitopsis* sp. (E01) mostraram as menores atividades. Esses resultados indicam que os extratos enzimáticos têm potencial para biorremediação, degradando corantes de diferentes classes. Mais estudos são necessários para explorar outras enzimas e capacidades enzimáticas.

Palavras-chave: Atividade enzimática. Enzima. pH. Descoloração.

Abstract: Fungi are essential for ecological stability and have great biotechnological potential, being used in the production of enzymes, such as laccase, to degrade complex materials. This study aimed to evaluate laccase activity, mycelial biomass production, and dye decolorization capacity of industrial dyes from enzymatic extracts of Agaricomycetes species cultivated in liquid medium. Two dyes were used for decolorization: Remazol Brilliant Blue R and Congo Red. Initially, qualitative tests with tannic acid on solid medium were conducted, followed by the determination of laccase activity in liquid media. The isolate *Polyporus* sp. (E01) achieved the highest decolorization of RBBR (95.72%), while *Pycnoporus* sp. (E04) was the most effective in decolorizing Congo Red (CR), with 83.23%. *Trametes* sp. (E02) and *Fomitopsis* sp. (E03) showed intermediate results. Regarding laccase activity, *Polyporus* sp. (E03) demonstrated the highest enzymatic activity (278,025.00 U/L), followed by *Trametes* sp. (E02) with 202,407.00 U/L, while *Pycnoporus* sp. (E04) and *Fomitopsis* sp. (E01) exhibited the lowest activities. These results indicate that enzymatic extracts have potential for bioremediation, degrading dyes from different classes. Further studies are necessary to explore other enzymes and enzymatic capabilities.

Keywords: Enzymatic activity. Enzymes. pH. Discoloration.

Resumen: Los hongos son esenciales para la estabilidad ecológica y tienen un gran potencial biotecnológico, utilizándose

en la producción de enzimas, como la lacasa, para degradar materiales complejos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la actividad de la lacasa, la producción de biomasa micelial y la capacidad de decoloración de tintes industriales a partir de extractos enzimáticos de especies de Agaricomycetes cultivadas en medio líquido. Se utilizaron dos tintes para la decoloración: Remazol Brilliant Blue R y Rojo Congo. Inicialmente, se realizaron pruebas cualitativas con ácido tánico en medio sólido, seguidas de la determinación de la actividad de la lacasa en medios líquidos. El aislado *Polyporus* sp. (E01) alcanzó la mayor decoloración del tinte RBBR (95,72%), mientras que *Pycnoporus* sp. (E04) fue el más eficaz en la decoloración del Rojo Congo (RC), con un 83,23%. *Trametes* sp. (E02) y *Fomitopsis* sp. (E03) mostraron resultados intermedios. En cuanto a la actividad de lacasa, *Polyporus* sp. (E03) demostró la mayor actividad enzimática (278.025,00 U/L), seguido por *Trametes* sp. (E02) con 202.407,00 U/L, mientras que *Pycnoporus* sp. (E04) y *Fomitopsis* sp. (E01) mostraron las menores actividades. Estos resultados indican que los extractos enzimáticos tienen potencial para la biorremediación, degradando tintes de diferentes clases. Se necesitan más estudios para explorar otras enzimas y capacidades enzimáticas.

Palabras-clave: Actividad enzimática. Enzima. pH. Descoloramiento.

1 INTRODUÇÃO

Os fungos desempenham um papel ecológico essencial, contribuindo para a estabilidade de diversos ecossistemas. Além disso, são uma fonte valiosa de recursos genéticos com grande potencial biotecnológico, sendo utilizados na produção de enzimas e substâncias biologicamente ativas que podem degradar materiais com cadeias poliméricas complexas. Muitos gêneros fúngicos são relatados na literatura como produtores de enzimas como a lacase (Oliveira *et al.*, 2019; Santana, 2022; Santos, 2024, Oliveira *et al.*, 2017; Doi, Otaguiri, Souza, 2021). Dentre os gêneros frequentemente citados destacam-se *Polyporus*, *Trametes*, *Pycnoporus* e *Fomitopsis*, os quais foram incluídos nesta pesquisa.

O mercado global de enzimas industriais deve atingir US\$7,0 bilhões até 2026, com uma taxa de crescimento anual de 4,9% entre 2018 e 2024. As enzimas são frequentemente utilizadas como biocatalisadores em processos industriais devido à sua alta especificidade e robustez operacional (Anugraha *et al.*, 2016). No entanto, seu custo elevado impulsiona a bioprospecção de novas espécies produtoras e estimula pesquisas de estratégias de cultivo para desenvolver enzimas com características específicas a um custo mais acessível (Ravindran *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2021).

As lacases, ou enzimas multicobre oxidases, são produzidas principalmente por fungos dos filos Ascomycota e Basidiomycota, sendo os últimos, conhecidos como fungos da podridão branca, os mais abundantes (Do Carmo, 2022; Oliveira filho, 2024). Essas enzimas são cruciais para o ciclo do carbono, pois degradam compostos vegetais recalcitrantes, como a lignina, um dos biopolímeros mais abundantes no planeta (Yadav *et al.*, 2023). Além de sua importância ecológica na decomposição da serapilheira florestal, as lacases têm aplicações biotecnológicas significativas, como a degradação de fármacos, detoxificação de efluentes e remoção de poluentes em alimentos e bebidas (Varga *et al.*, 2023). Devido à sua capacidade de operar em diversas condições industriais, as lacases são muito valorizadas pelas indústrias.

Os corantes artificiais são amplamente utilizados em indústrias como têxtil, papel e celulose, farmacêutica e cosmética. No entanto, seu descarte inadequado pode prejudicar a cadeia alimentar, interferindo na fotossíntese e causando efeitos mutagênicos e carcinogênicos (Afena *et al.*, 2021). Os tratamentos abióticos convencionais de água, como ozonização e osmose reversa, muitas vezes se mostram ineficazes, caros e limitados na remoção de

substâncias orgânicas complexas. Em contraste, os processos bióticos são mais adaptáveis a mudanças nas condições ambientais, oferecendo vantagens em eficiência e custo (Yi *et al.*, 2018).

Os fungos Agaricomycetes de podridão branca são decompositores que têm a capacidade de degradar madeira, incluindo a lignina, uma substância recalcitrante presente nas fibras vegetais (Oliveira Filho, 2024). Esses organismos são chamados assim devido à aparência clara e esponjosa que a madeira apresenta após a decomposição. As enzimas responsáveis pela degradação da lignina são conhecidas como ligninases, sendo as mais estudadas as lacases, manganês peroxidases e lignina peroxidases (Do Carmo, 2022).

Vale destacar que a produção de biomassa micelial, produção de enzimas e degradação de corantes por fungos são influenciados por diversos fatores, como linhagem, quantidade de inóculo, fontes de nutrientes, otimização do pH, temperatura, ventilação adequada, condições de luminosidade e umidade. Nutrientes no meio de cultivo podem afetar a expressão e produção de enzimas (Bellettini *et al.*, 2019; Tavares *et al.*, 2020). Dada a relevância da presente pesquisa e ressaltando o aproveitamento de resíduos, se faz necessário a busca incrementar pesquisas no que se refere à produção e atividade de enzimas.

Este estudo teve como objetivo avaliar a atividade da lacase, e a capacidade de descoloração de corantes industriais de extrato enzimático de espécies de Agaricomycetes cultivados em meio líquido.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local da pesquisa e isolados

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O experimento foi conduzido no Laboratório de Micologia Ambiental e no Laboratório de Biotecnologia, ambos do Departamento de Micologia. Foram selecionados quatro isolados fúngicos para analisar a produção das enzimas e do ácido, sendo organizados por códigos de identificação (E01; E02; E03; E04) representando respectivamente: *Fomitopsis* sp., *Trametes* sp., *Polyporus* sp. e *Pycnoporus* sp. (Tab. 1).

Tabela 1 – Isolados fúngicos de Agaricomycetes e seus respectivos códigos de descrição para os resultados.

Fungos	Códigos
<i>Fomitopsis</i> sp.	E01
<i>Trametes</i> sp.	E02
<i>Polyporus</i> sp.	E03
<i>Pycnoporus</i> sp.	E04

Fonte: Autores, 2025.

2.2 Fermentação líquida

O isolado foi cultivado em meio líquido com objetivo de obter o extrato enzimático para a determinação da atividade de lacases e avaliação do potencial de descoloração. O isolado foi repicado para placas de Petri contendo malte, onde permaneceu em incubação em temperatura ambiente por 21 dias, discos de meio de cultura com micélio foram realocados para frascos Erlenmeyer (250mL) contendo 100mL de meio caldo malte, pH 5. Para cada frasco foi transferido um disco de 6mm com três réplicas. As culturas foram incubadas por 21 dias em temperatura ambiente, após esse período o caldo foi filtrado a fim de possibilitar a obtenção do extrato enzimático.

2.3 Investigação qualitativa de polifenoloxidasas

Os isolados foram repicados para placas de Petri contendo meio batata dextrose ágar (BDA) acrescido ácido tânico (1g/L) e incubado em temperatura ambiente. O aparecimento de um halo marrom ao redor das colônias crescidas nas placas contendo ácido tânico foi considerado positivo para produção de polifenoloxidasas.

2.4 Descoloração

A porcentagem de descoloração foi monitorada ao longo de 21 dias em tubos de ensaios com os fungos inoculados em uma solução de 50mg/L de cada um dos corantes VC e RBBR. Após esse período, foi realizada a leitura em espectrofotômetro nos comprimentos de ondas específicos de cada corante, 496 nm e 594 nm, respectivamente, utilizando 1000µL do meio de cultivo. A porcentagem de descoloração foi determinada da seguinte maneira:

$$\text{Descoloração (\%)} = 100 - \left(\frac{100 \times ABS_f}{ABS_i} \right)$$

2.5 Atividade de lacase

A atividade das fenoloxidasas do tipo lacase (LAC) foi determinada por meio da oxidação de 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazoline-6-sulfonato, ABTS), conforme descrito por Buswell *et al.* (1993). A reação foi realizada em uma mistura (1 mL) contendo 100 µL de extrato enzimático, 100 µL de tampão acetato de sódio (pH 5,0; 0,1 M) e 800 µL de solução de ABTS (1 mM). Outrossim, a oxidação foi monitorada pelo aumento da absorbância a 420 nm ($\epsilon_{420} = 36.000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Uma unidade de atividade enzimática corresponde a quantidade de enzima capaz de oxidar 1 µmol de ABTS por minuto.

2.6 Citotoxicidade

Para avaliar a toxicidade do material residual, sementes de berinjela (*Solanum melongena*) foram submetidas a um ensaio simples de fitotoxicidade. Alíquotas de 2mL foram depositadas em placas de Petri contendo três sementes dispostas de maneira equidistante sobre papel filtro duplo qualitativo. O papel filtro foi previamente esterilizado e embebido com o material residual da amostra teste. Como controle, utilizou-se água destilada.

2.7 Análises dos dados

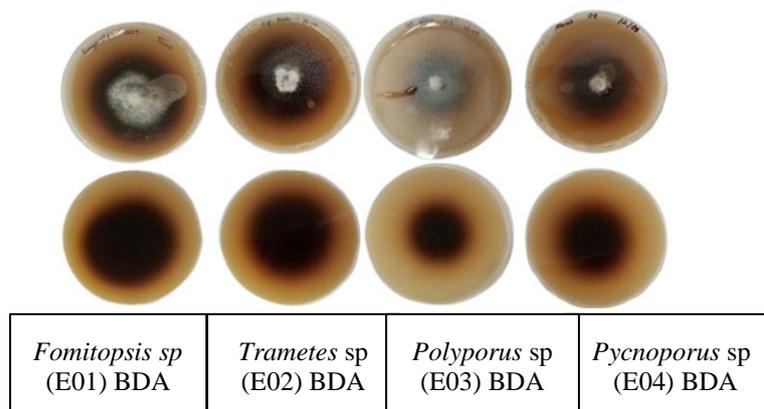
Os resultados foram processados mediante estatísticas descritivas simples utilizando o programa Microsoft Office Excel 2019, contendo as seguintes variáveis: média, desvio padrão e porcentagem, além disso, os dados foram expressos em gráficos para a melhor interpretação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Investigação qualitativa de polifenoloxidas

O cultivo dos isolados em meios contendo ácido tânico revelou a presença de fenoloxidas, confirmando a produção da enzima tanase pelos isolados. As amostras analisadas neste estudo apresentaram halos enzimáticos, bem significativos para os quatro extratos. Embora a medida dos halos não tenha sido realizada, as imagens mostraram que os maiores halos foram observados nos isolados de *Fomitopsis* sp. e *Pycnoporus* sp. ao longo dos 21 dias de experimentos, o menor halo observado para *Polyporus* sp. (Fig. 1).

Figura 1 – Halo enzimático formado durante o crescimento do fungo em meio contendo ácido tânico.



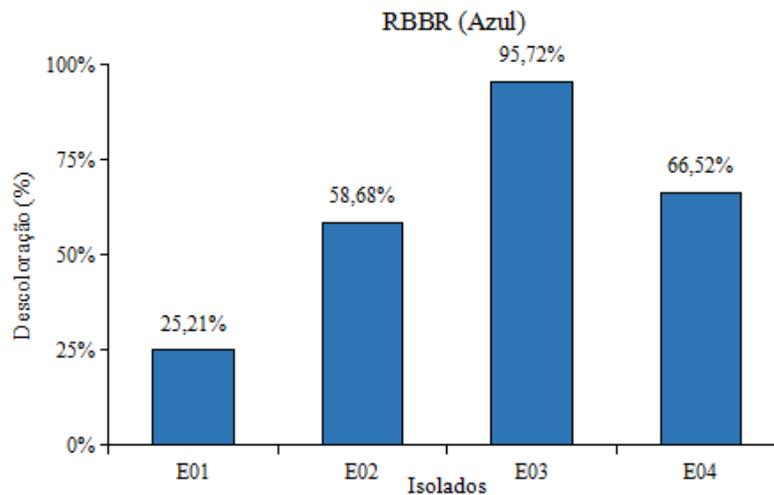
Fonte: Autores, 2025.

Trabalhos anteriores com descoloração de corantes também avaliaram a capacidade de isolados fúngicos produzirem ácido tânico, sendo como indicadores de atividade ligninolítica, e como indutor para a produção de lacase (De Almeida *et al.*, 2012; Do carmo *et al.*, 2022; Oliveira-filho, 2024).

3.2 Descoloração

O ensaio de descoloração demonstrou que o isolado *Polyporus* sp (E01), alcançou 95,72% de descoloração do corante RBRR após 21 dias de tratamento, sendo possível observar um tom de azul bem claro já após 7 dias. O segundo melhor resultado foi obtido pelo isolado *Pycnoporus* sp (EO4), com uma descoloração de 66,52%. Por sua vez, *Trametes* sp (EO2), obteve uma descoloração de 58,68%, enquanto *Fomitopsis* sp apresentou o menor percentual de descoloração com apenas 25,21%.

Figura 2 – Atividade da lacase na descoloração do corante Remazol Brilliant Blue R - RBBR pelos Agaricomycetes *Fomitopsis* sp. (E01), *Trametes* sp. (E02), *Polyporus* sp. (E03) e *Pycnoporus* sp. (E04), ao longo de 21 dias de fermentação líquida.



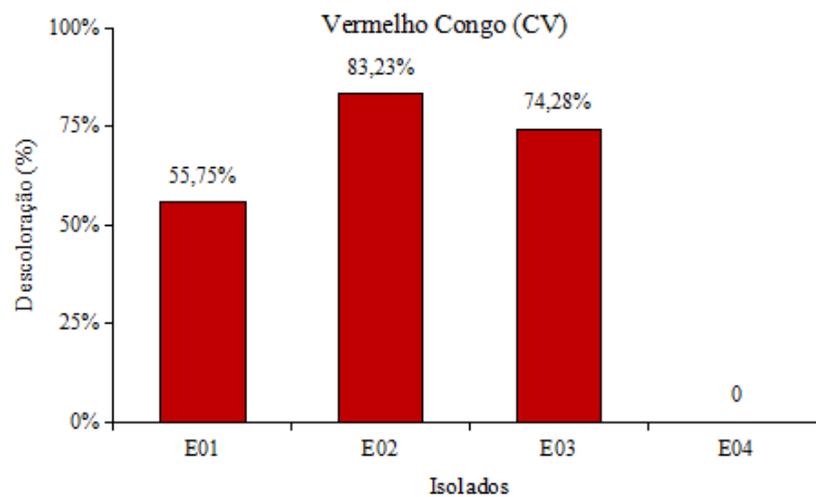
Fonte: Autores, 2025.

Outros estudos também demonstraram a capacidade do mesmo gênero para descolorir soluções coradas, resultados que diferiram dos nossos, com percentuais variados de descoloração. Ferreira-Silva *et al.* (2022) avaliaram a descoloração do corante índigo carmim com discos do gênero *Trametes*, obtendo 96,11%, 81,40% e 85,09% em seus tratamentos após 120 horas. Oliveira *et al.* (2023) avaliaram a descoloração do efluente têxtil obtido de um polo industrial de jeans com várias cepas fúngicas, tendo o *Trametes* sp. descolorindo 51,35% do efluente após 5 dias.

Em um estudo com o gênero *Lentinula*, Pereira *et al.* (2010) investigaram a descoloração do corante RBBR em diferentes condições de pH e com a adição de tampão. No pH 5, com a presença de tampão, foi observada uma descoloração de 100%, enquanto na ausência do tampão, a descoloração foi de 92%. No entanto, neste pH, não foi registrada a adsorção do corante pelo fungo. Em pH 9, com adição de tampão, a descoloração foi de 91%, e na ausência de tampão, 86%. Porém, neste último caso, houve uma considerável adsorção do corante pelo fungo. Em nossa prática usamos pH 5 e obtivemos uma descoloração variando de 21% a 48% para as 4 espécies de isolados, resultados que não foram significativos.

A descoloração do corante vermelho Congo (VC) houveram resultados bastantes significativos, *Trametes* sp (E02) foi o que apresentou o maior percentual de descoloração, atingindo 83,23% após 21 dias de tratamento. *Polyporus* sp (E03), apresentou descoloração de 74,28%. Em contrapartida, *Fomitopsis* sp (E01) obteve 55,75%, enquanto *Pycnoporus* sp., não demonstrou capacidade de descoloração.

Figura 3 – Atividade da lacase na descoloração do corante Vermelho Congo - VC pelos Agaricomycetes *Fomitopsis* sp. (E01), *Trametes* sp. (E02), *Polyporus* sp. (E03) e *Pycnoporus* sp. (E04), ao longo de 21 dias de fermentação líquida.



Fonte: Autores, 2025.

A capacidade dos fungos de podridão branca em degradar o corante também foi investigada por Olikka *et al.* (1993) e Tatarko & Bumpus (1998). O primeiro autor observou uma descoloração de 54% do corante pelo *Pycnoporus* sp., enquanto o segundo reportou níveis de descoloração superiores a 70% entre o terceiro e o quinto dia de tratamento, evidenciando o papel do corante como substrato para a lignina peroxidase. Esses resultados são semelhantes aos obtidos com o isolado de *Pycnoporus* sp. neste estudo.

A degradação do VC ocorre de diversas maneiras, o uso de fungos constitui uma alternativa de tratamento aeróbio muito eficaz, devido aos resultados encontrados em diversos trabalhos (Wanderley, 2007), verificando-se na literatura a existência de dois mecanismos de atuação: a adsorção de corante pelo micélio do fungo e a degradação oxidativa da molécula do corante pelo microrganismo.

O VC é um corante aniônico com estrutura complexa, contendo anéis aromáticos e grupos azo estáveis (-N=N-), o que dificulta sua degradação. Sua fórmula molecular é $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$, com massa molar de 696,66 g/mol (Arim, A. L., 2014).

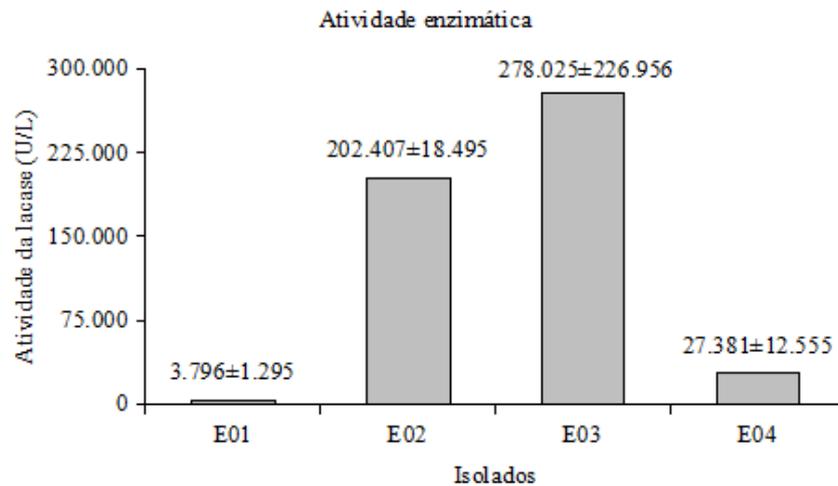
Chatterjee *et al.* (2020) observaram que *Aspergillus flavus* apresentou redução na degradação do corante Vermelho Congo com o aumento da sua concentração, indicando possível inibição do crescimento do fungo. De forma semelhante, *P. oryzae* também mostrou desempenho inferior em concentrações elevadas do corante. Conclui-se que *P. oryzae* é mais eficiente na descoloração de azocorantes em baixas concentrações, mas enfrenta dificuldades em concentrações mais altas, o que pode limitar sua eficácia na biorremediação em larga escala.

Foi observado que a enzima lacase dos fungos testados possui a capacidade de oxidar e degradar o corante VC em concentrações baixas. Mesmo não fazendo análises robustas. Dado que alguns gêneros de fungo, como *Fomitopsis*, é pouco explorado na literatura, é de extrema importância o desenvolvimento de estudos adicionais para avaliar o potencial da lacase, bem como de outras enzimas fúngicas, como protease, lipase, celulase, entre outras. Tais investigações podem permitir a aplicação dessas enzimas na biodegradação de corantes sintéticos do tipo azo, tanto em escalas reduzidas quanto em larga escala.

3.3 Atividade da lacase

A atividade de lacase dos isolados apresentou variações significativas, em fermentação líquida. O isolado *Polyporus* sp. (E03) exibiu a maior atividade enzimática, com 278.025,00 U/L, seguido pelo isolado *Trametes* sp. (E02), com 202.407,00 U/L. O isolado *Pycnoporus* sp. (E04) apresentou uma atividade de 27.381,00 U/L, enquanto o isolado *Fomitopsis* sp. (E01) registrou a menor atividade, com 3.796,00 U/L.

Figura 4 – Atividade da lacase em meio líquido, em pH variando de 4,5 a 5, pelos Agaricomycetes *Fomitopsis* sp. (E01), *Trametes* sp. (E02), *Polyporus* sp. (E03) e *Pycnoporus* sp. (E04), ao longo de 21 dias.



Fonte: Autores, 2025.

A produção de lacase em cultivos fúngicos é um processo influenciado por diversos fatores, como a fonte e concentração de nutrientes, pH do meio de cultivo, e a presença de indutores específicos. O estudo de Oliveira Filho (2024) extrato enzimático de *Leiotrametes menziesii* com demonstra que, ao longo de um período de 14 dias, meio líquido com pH 2,5, alcançando 762,92 U/L, indicando que o fungo teve atividade enzimática considerável sob essas condições, dado que difere das condições aplicada neste trabalho.

Alguns estudos já utilizaram os gêneros *Polyporus* sp., *Trametes* sp., *Pycnoporus* sp. e *Fomitopsis* sp. em processos de biodegradação e avaliando atividade enzimática da lacase na descoloração de corantes. Esses gêneros têm sido reconhecidos por sua capacidade de produzir enzimas como a lacase, que desempenham um papel crucial na degradação de compostos orgânicos, incluindo corantes sintéticos (Ardila-Leal, *et al.*, 2021). O uso de fungos para a produção de lacase e nos seus potenciais biotecnológicos vêm despertando cada vez mais interesse para a comunidade científica.

A lacase tem sido estudada a bom tempo, especialmente para os gêneros da podridão Branca, a lacase produzida por *Pycnoporus* sp. foi relatada a produção em fermentação submersa para a biodegradação de vinhaça (Ahmed *et al.*, 2024). Espécies do gênero *Fomitopsis* sp. foi encontrado produzindo lacase no 1 ao 3 dia de cultivo, com produção máxima em 9 dias em fermentação sólida (Csarman *et al.*, 2021). Lacase produzida por *Polyporus* sp. em fermentação sólida contendo casca de amendoim, apresentou alta atividade enzimática e estabilidade em condições extremas (Kallel *et al.*, 2024). E em espécies do gênero *Trametes* sp. tem produzido lacase a partir de

resíduos de chá, onde a lacase teve uma ótima atividade, sendo uma solução econômica para tratamento de resíduos industriais (Xu *et al.*, 2020).

Em suma, a lacase produzida por fungos é de grande relevância para os estudos biotecnológicos, oferecendo estratégias sustentáveis para degradar poluentes, corantes e tratamento de efluentes. A sua produção a partir de resíduos agroindustriais e meio de cultura alternativos são fontes econômicas e ecológicas para aumentar e otimizar o potencial biotecnológico desses fungos.

3.4 Citotoxicidade

A completa despigmentação visual do corante foi observada apenas quando utilizado o isolado 03 (*Polyporus* sp.) inoculado no meio contendo corante RBBR a 50 mg/L. Neste estudo, para a análise de toxicidade, foi realizado um teste de fitotoxicidade usando berinjela (*Solanum melongena*) como indicador biológico, depois do tratamento do corante RBBR. Conforme descrito por Nouren *et al.* (2015), valores de índice de germinação abaixo de 50% indicam alta fitotoxicidade; entre 50% e 80%, fitotoxicidade moderada; e acima de 80%, baixa ou ausência de fitotoxicidade.

O resultado obtido para o isolado 03 foi inesperado: embora tenha apresentado uma taxa 100% de germinação, as plântulas não se desenvolveram adequadamente, exibindo alterações anatômicas marcantes em comparação com o controle. Isso sugere que os sub-compostos presentes no meio após a biotransformação do RBBR estão em concentrações suficientemente altas para prejudicar o desenvolvimento das sementes testadas, possivelmente devido à presença de substâncias tóxicas.

A toxicidade dos corantes tratados pode ser avaliada por meio de testes de fitotoxicidade, citotoxicidade, genotoxicidade e toxicidade microbiana. Dentre esses, o teste de fitotoxicidade é o mais utilizado, pois é considerado simples, acessível e sensível para avaliar diferentes tipos de contaminantes em variadas concentrações (Gerber *et al.*, 2017; Lyu *et al.*, 2018)

De Almeida *et al.* (2021) destacam que a ausência de cor não indica necessariamente a ausência de toxicidade, sendo fundamental determinar a toxicidade de resíduos que passaram por processos de descoloração antes de seu descarte no ambiente. Contudo, não foram realizados testes adicionais para identificar a origem da cor observada no isolado.

4 CONCLUSÃO

Este estudo revelou, de forma parcial, o potencial de diferentes isolados fúngicos na biodegradação de corantes, evidenciando a importância da produção de enzimas, como a lacase, para a eficácia do processo de descoloração. Os resultados indicaram que a escolha do meio de cultivo e as condições experimentais influenciam a capacidade de cada fungo na degradação de corantes. Enquanto alguns gêneros apresentaram desempenho mais notório, outros foram menos expressivos nas análises. Dentre os isolados avaliados, *Polyporus* sp. foi o mais eficaz na biodegradação de corantes, destacando-se pela produção de lacase e crescimento micelial. Por outro lado, o

Fomitopsis sp. apresentou o menor desempenho. Os achados reforçam a necessidade de estudos adicionais com esses fungos, aliados à otimização das condições experimentais, para proporcionar resultados com mais confiabilidade e robustez. Esses avanços poderão aumentar o entendimento do potencial enzimático de cada gênero fúngico.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação de Biologia de Fungos, Departamento de Micologia, UFPE, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (PQ 303913/2023-1), à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (APQ 0901-2.12/24) pelo financiamento da pesquisa.

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes e concordam com a submissão do presente artigo.

Contribuições dos autores

Maria Alice Ribeiro Alves: Contribuiu com análise e coleta dos dados, execução dos experimentos, escrita e revisão do manuscrito.

Mário Jeová dos Santos: Contribuiu com análise e coleta dos dados, execução dos experimentos, escrita e revisão do manuscrito.

Kivia dos Santos Machado: Contribuiu com análise e coleta dos dados, execução dos experimentos, escrita e revisão do manuscrito.

Joana Cavalcante de Moura: Contribuiu com análise e coleta dos dados, execução dos experimentos, escrita e revisão do manuscrito.

Renato Lúcio Mendes Alvarenga: Contribuiu na idealização do estudo, na orientação como professor, na análise e coleta dos dados, bem como na escrita e revisão crítica do manuscrito.

REFERÊNCIAS

Afena, A. S., Boateng, D. K., Darkwah, L., & Adjaottor, A. A. (2021). Decolourisation of textile wastewater by dye degrading microorganisms isolated from textile effluent. *Journal of Environmental Protection*, 12, 767–783. Doi: [10.4236/jep.2021.1210046](https://doi.org/10.4236/jep.2021.1210046).

Ahmed, P. M., *et al.* (2024). Boldly going green: Utilizing *Pycnoporus* sp. for laccase production and sustainable vinasse treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(4), 3927–3942. Doi: [10.1007/s13762-023-05257-1](https://doi.org/10.1007/s13762-023-05257-1).

Anugraha, T. S. S., *et al.* (2016). Enzymes in platform chemical biorefinery. In *Platform Chemical Biorefinery* (pp. 451–469). Elsevier. Doi: [10.1016/B978-0-12-802980-0.00024-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802980-0.00024-9).

- Araújo, N. L., *et al.* (2021). Produção de biomassa micelial e enzimas lignocelulolíticas de *Pleurotus* spp. em meio de cultivo líquido. *Research, Society and Development*, 10(1), e6810111406. Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11406>.
- Ardila-Leal, L. D., *et al.* (2021). A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Molecules*, 26(13), 3813. Doi: <https://doi.org/10.3390/molecules26133813>.
- Arim, A. L. (2014). *Análise da secagem de sementes de mamão formosa (Carica papaya L.) utilizadas na adsorção do corante vermelho do congo* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé). Bagé.
- Belletini, M. B., *et al.* (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>.
- Buswell, J. A., Cai, Y. J., & Chang, S.-T. (1993). Fungal and substrate-associated factors affecting the ability of individual mushroom species to utilize different lignocellulosic growth substrates. In S.-T. Chang, J. A. Buswell, & S. W. Chiu (Eds.), *Mushroom biology and mushroom products*, 141-150. Chinese University Press.
- Chatterjee, S., Dey, S., Sarma, M., Chaudhuri, P., & Das, S. (2020). Biodegradation of Congo Red by manglicolous filamentous fungus *Aspergillus flavus* JKSC-7 isolated from Indian Sundabaran mangrove ecosystem. *Applied Biochemistry & Microbiology*, 56(6), 708. Doi: <https://doi.org/10.1134/S0003683820060046>.
- Csarman, F., *et al.* (2021). Functional expression and characterization of two laccases from the brown rot *Fomitopsis pinicola*. *Enzyme and Microbial Technology*, 148, 109801. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2021.109801>.
- De Almeida, A. P., *et al.* (2021). Descoloração e desintoxicação de diferentes corantes azo por *Phanerochaete chrysosporium* ME-446 sob fermentação submersa. *Revista Brasileira de Microbiologia*, 52, 727–738. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00458-7>.
- De Almeida, D. G., *et al.* (2012). Descoloração do corante Índigo Carmim e produção de lacase por fungos filamentosos. *Scientia Plena*, 8(5). Doi: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/502>.
- Do Carmo, M. A., Muniz, A. W., & Cavallazzi, J. R. P. (2022). Atividade ligninolítica e descoloração de corantes industriais por fungos de podridão branca isolados no campus da UFAM
- Doi, S. M. O., Otaguiri, E. S., & De Souza, A. F. (2021). Biodegradação de corantes e efluente da indústria têxtil por *Pleurotus ostreatus* e *Pycnoporus* spp. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(3), 3226–3233. Doi: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-034>.
- Ferreira-Silva, V., *et al.* (2022). *Trametes lactinea* and *T. villosa* collected in Brazil are able to discolor indigo carmine. *Acta Botanica Brasílica*, 36, e2021abb0356. Doi: <https://doi.org/10.1590/0102-33062021abb0356>
- Gerber, M. D., *et al.* (2017). Phytotoxicity of effluents from swine slaughterhouses using lettuce and cucumber seeds as bioindicators. *Science of the Total Environment*, 592, 86–90. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.075>.
- Kallel, F., *et al.* (2024). Degradation of textile polyazodyes by *Polyporus ciliatus* laccase produced in peanut shell solid medium: Purification and characterization. *Earthline Journal of Chemical Sciences*, 11(2), 249–265. Doi: <https://doi.org/10.34198/ejcs.11224.249265>.
- Lyu, J., *et al.* (2018). Testing the toxicity of metals, phenol, effluents, and receiving waters by root elongation in *Lactuca sativa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 149, 225–232. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.006>.

Nouren, S., & Bhatti, H. N. (2015). Mechanistic study of degradation of basic violet 3 by *Citrus limon* peroxidase and phytotoxicity assessment of its degradation products. *Biochemical Engineering Journal*, 95, 9–19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.11.021>.

Oliveira Filho, D. C. (2024). Atividade de lacase e descoloração de corantes industriais por extrato enzimático de *Leiotrametes menziesii* (Berk.) *Welti & Courtec.* cultivado em meio líquido e em casca de tucumã. [

Oliveira, J. B. (2023). Desenvolvimento de bioprocesso utilizando fungos filamentosos amazônicos, visando aplicação no pré-tratamento biológico de biomassas vegetais. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas).

Oliveira, L. A., *et al.* (2017). Produção de lacase por uma cepa de *Trametes elegans* coletada no município de Alvarães-Amazonas. In *Diversidade Microbiana da Amazônia* (Vol. 2, pp. 98–341). Editora INPA.

Oliveira, L. A., *et al.* (2019). Descoloração *in vitro* e *in silico* de corante reativo pela lacase de fungo de basidiomiceto. *Fungos*, 107.

Ollikka, P., Alhonmaki, K., Leppanen, V. M., Glumoff, T., Rajjola, T., & Suominen, I. (1993). Decolorization of azo, triphenyl methane, heterocyclic, and polymeric dyes by lignin peroxidase isoenzymes from *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(12), 4010–4016.

Pereira, A. R. B., Bueno, F. L., Santos, S. C., Lima, C. A. A., & Dias, A. L. T. (2010). BIODEGRADAÇÃO DE CORANTES E EFLUENTES TÊXTEIS POR FUNGOS. *Holos Environment*, 10(2), 165–179. <https://doi.org/10.14295/holos.v10i2.2156>.

Ravindran, R., *et al.* (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5, 93. Doi: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>.

Santana, V. F. S. C. (2022). Descoloração do corante índigo carmim por agaricomycetes coletados no norte e nordeste do Brasil. (Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco).

Santos, R. L. S. (2024). Avaliação *in silico* do potencial de degradação do 4-nonilfenol e de seus intermediários pela lacase proveniente de *Trametes villosa* (Sw.) *Kreisel* e *Trametes lactinea* (Berk.) *Sacc.* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).

Tatarko, M., & Bumpus, J. A. (1998). Biodegradation of congo red by *Phanerochaete chrysosporium*. *Water research*, 32(5), 1713–1717.

Tavares, M. F., *et al.* (2020). Decolorization of azo and anthraquinone dyes by crude laccase produced by *Lentinus crinitus* in solid state cultivation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51, 99–106. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00189-w>

Varga, B., *et al.* (2023). Design and optimization of laccase immobilization in cellulose acetate microfiltration membrane for micropollutant remediation. *Catalysts*, 13(2), 222. Doi: <https://doi.org/10.3390/catal13020222>.

Wanderley, C. R. (2007). *Aspergillus niger* AN 400 como inóculo de reatores em batelada para remoção do corante vermelho de congo em meio aquoso sintético (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Xu, L., *et al.* (2020). Laccase production by *Trametes versicolor* in solid-state fermentation using tea residues as substrate and its application in dye decolorization. *Journal of Environmental Management*, 270, 110904. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110904>.

Yadav, P., *et al.* (2023). Recombinant laccase: A promising tool for industrial effluent bioremediation. *Journal of Earth & Environmental Waste Management*, 1(1), 1–6. Doi: <https://doi.org/10.11648/j.reports.20230302.12>.

Yi, H., Huang, D., Qin, L., Zeng, G., Lai, C., Cheng, M., Ye, S., Song, B., Ren, X., & Guo, X. (2018). Selective prepared carbon nanomaterials for advanced photocatalytic application in environmental pollutant treatment and hydrogen production. *Applied Catalysis B: Environmental*, 239, 408–424. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.07.068>

