



Ciências Biológicas

Scientia Amazonia, v. 11, n. 1, CB1-CB13, 2022

Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7072328> - ISSN:2238.1910

Atividade ligninolítica e descoloração de corantes industriais por fungos de podridão branca isolados no campus da UFAM

*Marcela Amazonas do Carmo¹, Aleksander Westphal Muniz²,
José Renato Pereira Cavallazzi³*

RESUMO

Fungos de podridão branca são os únicos organismos capazes de mineralizar a lignina. Isto é possível graças à inespecificidade de suas enzimas ligninolíticas, que possuem uma ampla gama de substratos. Estas enzimas possuem várias aplicações como a biorremediação de ambientes contaminados com corantes têxteis. O objetivo desta investigação foi o de determinar a atividade de lacases e a capacidade de descolorir corantes têxteis (Acid Red 1, AR1; Remazol Brilliant Blue R, RBBR; Acid Blue 129, AB129; Reactive Blue 4, RB4 e Reactive Black 5, RB5) de dois fungos de podridão branca isolados a partir de toras em decomposição no campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Os isolados foram cultivados em caldo batata dextrose (caldo BD) e após 18 dias de cultivo o micélio foi separado do extrato para a determinação da massa seca micelial e da atividade de lacases. Posteriormente, os isolados foram cultivados no mesmo meio com a adição de cada um dos corantes (50mg/L) separadamente. Ao final de 18 dias os isolados 15 e 18 apresentaram atividade (UI/L) de lacase de 70,2 e 73,2, respectivamente, e atividade de fenoloxidasas totais de 40,4 e 87,9, respectivamente. Ambos os isolados foram capazes de descolorir todos os corantes, sendo o RB5 o que sofreu maior descoloração (isolado 15, 93,2% e isolado 18, 95,5%) e o AR1 o que foi menos descolorido (isolado 15, 20,0% e isolado 18, 21,3%). Os fungos utilizados nesta investigação demonstraram potencial para utilização em sistemas de biorremediação.

Palavras chaves: Fungos degradadores de madeira, compostos tóxicos, biorremediação.

Laccases and total peroxidases activities and decoloration of azo and atrquinona industrial dyes by white rot fungi isolated at the UFAM campus. White rot fungi are the only organisms capable of mineralizing lignin. This is possible thanks to the unspecificity of the ligninolytic enzymes which are able to oxidize a wide range of substrates. These enzymes have several applications like biorremediation of environments contaminated with textile dyes. The aim of this investigation was to determine laccases and total peroxidases activities and the capacity of the extract to decolorize textile dyes (Acid Red 1, AR1; Remazol Brilliant Blue R, RBBR; Acid Blue 129, AB129;

¹ Tecnologista Pleno, Laboratório de Celulose e Papel / Carvão Vegetal / COTEI – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, mac@inpa.gov.br

² Pesquisador da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, aleksander.muniz@embrapa.br

³ Professor Associado III, Laboratório de Microbiologia Ambiental, Departamento de Parasitologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Amazonas, cavallazzi@ufam.edu.br



Reactive Blue 4, RB4 e Reactive Black 5, RB5) of two white rot fungi isolated from rotten logs on the campus of the Federal University of the Amazonas State (UFAM). The isolates were cultivated in broth PD (potato dextrose) and after 18 days cultivation the micelium was separated from the extract in order to determine micelial dry weight and enzyme activity. Posteriorly the isolates were cultivated in the same medium with each one of the dyes added separately (50mg/L). After 18 days cultivation isolates 15 and 18 presented laccase activity (UI/L) of 70,2 and 73,2 respectively, and total peroxidase activity of 40,4 and 87,9 respectively. Both isolates were able to decolorate all dyes and the highest decoloration was observed on RB5 (isolate 15, 93,2% and isolate 18, 95,5%) while the lowest was observed on AR1 (isolate 15, 20,0% and isolate 18, 21,3%). The fungi used on this investigation showed potential to be used in biorremediation systems.

Keywords: Wood rot fungi, toxic compounds, biorremediation.

1. Introdução

A utilização de corantes sintéticos em diferentes indústrias representa uma perigosa ameaça ao meio ambiente. Ogugbue e Sawidis (2011) estimaram a produção anual desses compostos em mais de 700 mil toneladas. Aqueles utilizados na indústria têxtil, como os tipos azo, índigo, antraquinona e trifenilmetano, podem causar sérios problemas ambientais por ocasião do seu descarte (Kunammeni et al., 2008) na medida em que cerca de 15% são liberados na natureza como efluentes após serem utilizados em processos industriais (Vikrant et al., 2018). Uma vez em contato com seres vivos, alguns desses compostos podem causar efeitos mutagênicos e carcinogênicos (Gopinathan et al., 2015), bem como, devido à sua recalcitrância, quando presente em cursos d'água podem causar redução na solubilidade de gases e interferir na fotossíntese (Banat et al., 1996; Nigam et al., 2000), afetando negativamente todos os organismos desses ecossistemas. De modo a eliminar estas substâncias do ambiente, pode-se lançar mão de

métodos físicos, físico-químicos ou químicos, como ozonização, osmose reversa, ultrafiltração e coagulação-floculação, entre outros, os quais, no entanto, geralmente se mostram inefetivos e/ou onerosos (Yi et al., 2018), além do risco de serem gerados subprodutos ainda mais tóxicos que o composto original (Anjaneyulu et al., 2005).

Sob esta perspectiva, a utilização de basidiomicetos de podridão branca se apresenta como uma alternativa promissora. Estes fungos sintetizam uma série de enzimas extracelulares, principalmente lacases, manganês peroxidases e lignina peroxidases (Schmidt-Dannert, 2016; Singh et al., 2015), que atuam de modo a mineralizar a lignina, um composto recalcitrante existente nas fibras vegetais. Este sistema enzimático ligninolítico torna este o único grupo de micro-organismos capazes de degradar totalmente essa substância (Martinez, 2002). A habilidade desses organismos de degradar este composto deve-se ao caráter não específico de suas enzimas ligninolíticas, capazes de oxidar uma vasta gama de



diferentes substratos (Wesemberg et al., 2003). Posteriormente, pesquisas revelaram que estes catalisadores biológicos também poderiam ser aplicados na degradação de corantes sintéticos e outras substâncias tóxicas, alcançando resultados satisfatórios na biorremediação desses poluentes (Araújo et al., 2019; Araújo et al., 2021; Jaramillo et al., 2014).

No processo de degradação dessas substâncias, as lacases (EC 1.10.3.2) desempenham um papel importante. Estas cupro-proteínas reduzem oxigênio molecular até água com a concomitante oxidação de vários substratos (Bibi et al., 2011), como difenóis, monofenóis e aminas aromáticas (Xu, 1996). As enzimas são encontradas em micro-organismos, plantas e animais (Couto e Herrera, 2006), mas são os basidiomicetos de podridão branca os maiores produtores destas oxidases. Ademais, as lacases sintetizadas por estes fungos apresentam maior estabilidade em diferentes temperaturas e níveis de pH, e a quantidade de substratos pode ainda ser maior caso mediadores sejam adicionados à mistura de reação (Khlifi et al., 2010; Rodriguez et al., 2005), o que as torna uma alternativa importante em processos biotecnológicos visando sua utilização em sistemas de biorremediação.

Fungos de podridão branca são capazes de degradar corantes têxteis tanto em fermentação submersa (Chao e Lee, 1994) quanto em fermentação em estado sólido (Nigam et al., 2000). Em particular, as lacases sintetizadas por determinadas espécies deste grupo podem apresentar maior potencial redox (Call e Mucke, 1997), o que se reflete em uma maior atividade. Estas características tornam as lacases

sintetizadas por este grupo de micro-organismos especialmente interessantes para aplicações industriais. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi determinar a atividade de lacase e a capacidade de descoloração de corantes industriais em meio líquido de dois fungos de podridão branca isolados em Manaus – AM.

2. Material e métodos

Obtenção dos isolados

Os fungos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de cogumelos coletados na mata do campus da Universidade Federal do Amazonas (-3,10097°, -59,97248°) e denominados isolado 15 e isolado 18 (Figura 1). O acesso ao material biológico foi registrado no SISGEN (Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado) sob número A59F87A. Basidiocarpos foram retirados de madeira em decomposição, depositados em sacos de papel e levados para o isolamento no Laboratório de Microbiologia Ambiental do Instituto de Ciências Biológicas. De forma asséptica e utilizando-se um bisturi, foram obtidos pequenos fragmentos (5 x 5mm) de cada um dos basidiocarpos coletados, que, por sua vez, foram submetidos a um processo de desinfecção superficial com o objetivo de diminuir as chances de contaminação. Para este fim, os fragmentos foram imersos em solução de álcool 70% por 30 segundos, seguido por imersão em solução de hipoclorito de sódio 2% por um minuto e novamente na solução de álcool por 30 segundos, após o que foram lavados por duas vezes em água esterilizada. Os fragmentos desinfetados foram

transferidos para placas de petri contendo meio batata dextrose ágar (BDA) acrescido de tetraciclina (50 mg/L) e então as culturas foram incubadas em temperatura ambiente. Quando foi detectado

crescimento micelial sem contaminações uma nova repicagem foi realizada para uma outra placa contendo BDA. As culturas foram mantidas em refrigerador a 5 °C e repicadas sempre que necessário.



Figura 1. Basidiocarpos de fungos degradadores de madeira crescendo em toras em decomposição. Esquerda: Isolado 15; Direita: Isolado 18.

Indicadores e corantes

Foram utilizados dois indicadores de atividade ligninolítica: ácido tânico (Vetec) e guaiacol (Sigma). Diferentes compostos pertencentes a duas classes de corantes foram utilizados. Corantes da classe das antraquinonas: Remazol Brilliant Blue R (RBRR, Sigma), Acid Blue 129 (AB129, Sigma-Aldrich) e Reactive Blue 4 (RB4, Sigma-Aldrich). Corantes da classe azo: Reactive Black 5 (RB5, Sigma-Aldrich) e Acid Red 1 (AR1, Aldrich).

Investigação qualitativa de atividade de lacases

Os isolados foram repicados para placas de petri contendo meio BDA acrescido ácido tânico (5g/L) ou guaiacol (500ppm) e incubados em temperatura ambiente. O aparecimento de um halo marrom nas placas contendo ácido tânico ou de um halo vermelho nas placas com guaiacol foram consideradas positivas para produção de lacases.

Cultivo em meio líquido

Os fungos isolados foram cultivados em meio líquido visando à obtenção do extrato para a determinação da atividade de lacases e fenoloxidasas totais. Os isolados foram repicados para placas de petri contendo meio BDA. Após 10 dias de incubação em temperatura ambiente, discos de meio de cultura contendo micélio dos isolados foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 150mL contendo 50mL de meio batata dextrose (BD) adicionado de $MnSO_4$ (0,5g/L) e $CuSO_4$ (250ppm), pH 4,9. Cada frasco recebeu um disco de 8mm com três replicatas para cada isolado. As culturas foram incubadas por 18 dias em temperatura ambiente e ao final deste período o micélio foi recolhido para a determinação da massa seca micelial e o extrato foi utilizado para a determinação das atividades enzimáticas.



Determinação da massa micelial seca

Após 18 dias de cultivo os micélios foram retirados para a determinação da massa micelial seca. Os micélios foram depositados em círculos e papel filtro previamente secados e pesados. Posteriormente, os discos de papel contendo micélios frescos foram depositados em uma estufa de secagem, na qual permaneceram por 24h a 105 °C. Após esse período, os discos, juntamente com o micélio seco foram pesados e da massa total foi subtraída a massa dos discos para então obter a massa micelial.

Atividade de lacases e peroxidases

A atividade de fenoloxidasas do tipo lacase (F_{LAC}) foi determinada pela oxidação de 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazoline-6-sulfonato, ABTS) de acordo com Buswell *et al.* (1995). A mistura de reação (1 mL) continha 600 μ L de extrato enzimático, 300 μ L de tampão acetato de sódio (pH 5,0; 0,1 M) e 100 μ L de solução de ABTS (1 mM). A oxidação foi determinada pelo aumento na absorvância a 420 nm ($\epsilon_{420} = 36000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). A atividade total de fenoloxidasas (F_{TOT}) foi determinada utilizando esta mesma metodologia, com a diferença de que neste caso foram utilizados 250 μ L de tampão e 50 μ L de solução 2 mM de H_2O_2 . A atividade de peroxidases (F_{PER}) foi determinada pela diferença entre F_{TOT} e F_{LAC} . Uma unidade de atividade enzimática será definida como a quantidade de enzima capaz de oxidar 1 μ mol de ABTS por minuto.

Ensaio de descoloração

Os isolados foram cultivados em temperatura ambiente por 18 dias em frascos Erlenmeyer de

150mL contendo 50mL de meio BDA adicionado de MnSO_4 (0,5g/L) e CuSO_4 (250ppm), pH 4,9 e 50mg/L de cada um dos corantes separadamente, com três replicatas. Após este período, o micélio foi coletado para a determinação da massa seca (conforme descrito no item 2.5) e o extrato foi utilizado para a determinação da descoloração. A porcentagem de descoloração produzida por cada isolado em cada um dos meios com os diferentes corantes foi determinada em espectrofotômetro. Primeiramente procedeu-se a leitura da amostra original (antes do cultivo) e depois a amostra de cada um dos meios após 18 dias de cultivo nos respectivos comprimentos de onda (nm): RBBR, 592; AB129, 629; RB4, 595; RB5, 597 e AR1, 506. A porcentagem de descoloração foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Descoloração (\%)} \\ = 100 - \left(\frac{100 * ABS_f}{ABS_i} \right) \end{aligned}$$

Em que:

ABS_i = absorvância inicial

ABS_f = absorvância final

3. Resultados e discussão

Após dois dias de crescimento em placas de petri com meio BDA, ambos os isolados produziram halos tanto no meio contendo ácido tânico quanto naquele contendo guaiacol. A utilização de indicadores é um método simples e rápido para a determinação qualitativa de atividade de lacases na medida em que demanda pouca manipulação e nenhuma aparelhagem sofisticada é requerida. Devido à inespecificidade das lacases, diversas substâncias são oxidadas por estas enzimas, podendo, dessa forma, indicar



sua síntese por um organismo qualquer. Além dos utilizados neste estudo, compostos como ácido gálico (Harkin e Obst, 1973), siringaldazina (De Jong et al., 1988) e diferentes corantes industriais (Raghukumar et al., 1999) são oxidados na presença de lacases e podem ser utilizados em meios de cultura para sua detecção.

A utilização de mais de um indicador em investigações qualitativas de lacase é importante pelo fato que de diferentes substâncias indicadoras apresentam diferentes características e podem apresentar falsos negativos. Kiiskinen et al. (2004) relataram que ácido tânico utilizado em meio ágar extrato de malte (AEM) falhou em indicar atividade de lacases em dez fungos de um total de 21 isolados, enquanto o

guaiacol demonstrou maior sensibilidade em detectar atividade desta enzima. No presente estudo foram utilizados estes dois indicadores e ambos retornaram resultados positivos para atividade de lacases nos isolados testados nesta investigação. Posteriormente, como se verá ao longo deste artigo, ensaios enzimáticos confirmaram a presença desta enzima nos extratos brutos.

Após 18 dias de crescimento em meio caldo BD acrescido de manganês e cobre, o experimento foi interrompido e o micélio foi separado do caldo enzimático. As médias de massa seca micelial por litro de meio de cultura (Figura 2) produzida pelos isolados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

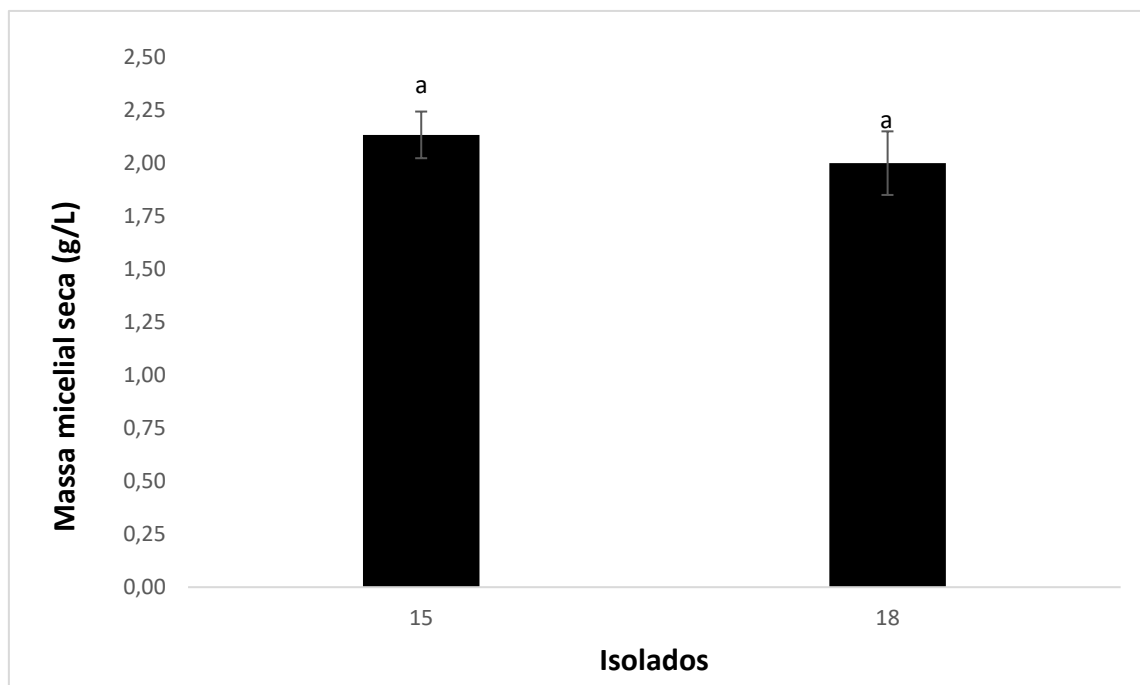


Figura 2. Peso seco micelial de dois isolados de fungos de podridão branca cultivados em meio caldo BD por 18 dias.



Ao final do período de cultivo foi detectada atividade de lacase em ambos os isolados (Figura 3) sem diferenças estatisticamente significativas. O isolado 15 apresentou 70,2 UI/L de atividade, enquanto no extrato enzimático do isolado 18 foi detectada uma atividade de 73,2 UI/L. Em relação às fenoloxidasas totais, os isolados 15 e 18 atingiram atividades de 40,4 e 87,9 UI/L (Figura 3), respectivamente. Vários fatores podem influenciar na produção de lacases por um fungo, como por exemplo a fonte e concentração de nitrogênio e carbono, bem como a

presença de indutores (Majeau et al., 2010).

Os ensaios enzimáticos corroboraram os resultados dos indicadores em meio sólido, que demonstravam a atividade de lacases. Caso estes fungos sintetizassem lacases com única enzima ligninolítica, a correlação seria direta. Neste caso, no entanto, os isolados também produzem peroxidases, então poderia haver um falso positivo, tendo em vista que, ocasionalmente, outras enzimas podem oxidar estas substâncias (Ryu et al., 2003).

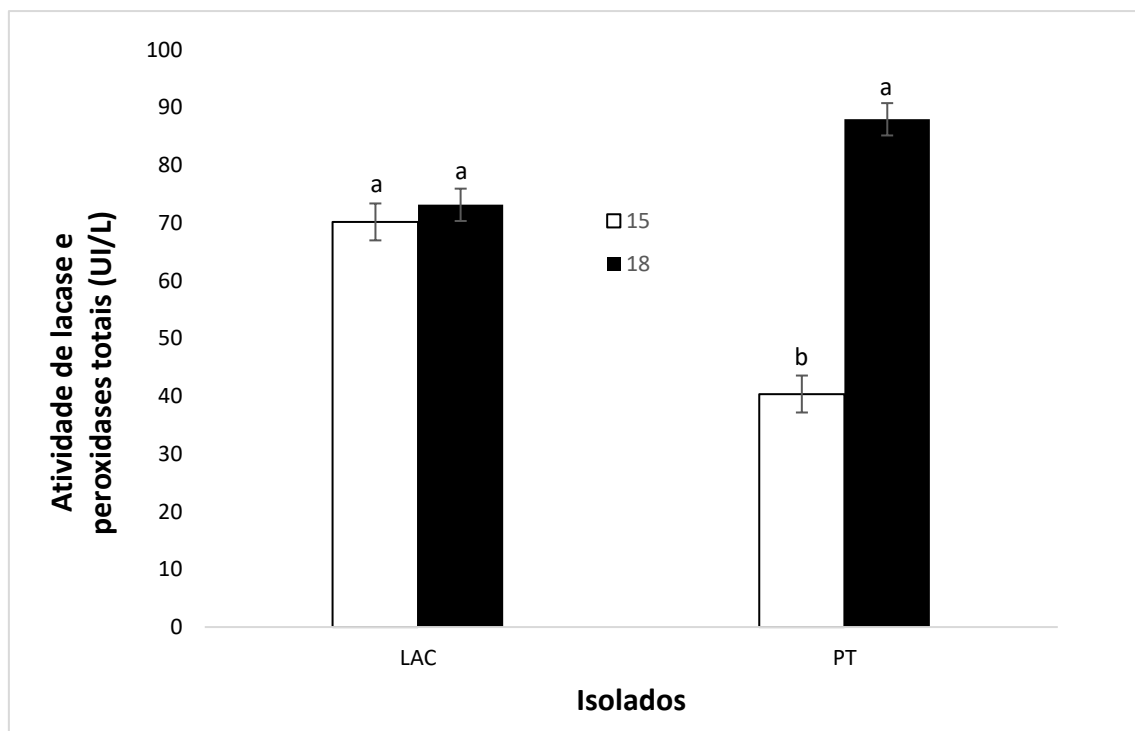


Figura 3. Atividade de lacases (LAC) e peroxidases totais (PT) em extrato enzimático de dois isolados de fungos de podridão branca cultivados em meio caldo BD por 18 dias.

Depois de 18 dias de incubação foi observado que ambos os isolados utilizados neste estudo foram capazes de crescer nos meios de cultura contendo diferentes corantes industriais (Figura 4). O efeito

tóxico dos compostos exerceu um efeito direto na média de massa seca produzida pelos isolados. O corante RB5 exerceu um forte efeito inibidor no crescimento do isolado 15, enquanto o isolado 18 cresceu

menos no meio contendo o corante RB4 (Figura 4). Por outro lado, ambos os isolados apresentaram maior valor de massa seca nos corantes AB129 e RBBR. Em valores absolutos

o isolado 18 produziu mais massa seca micelial em todos os tratamentos, com exceção daquele com o corante RB4.

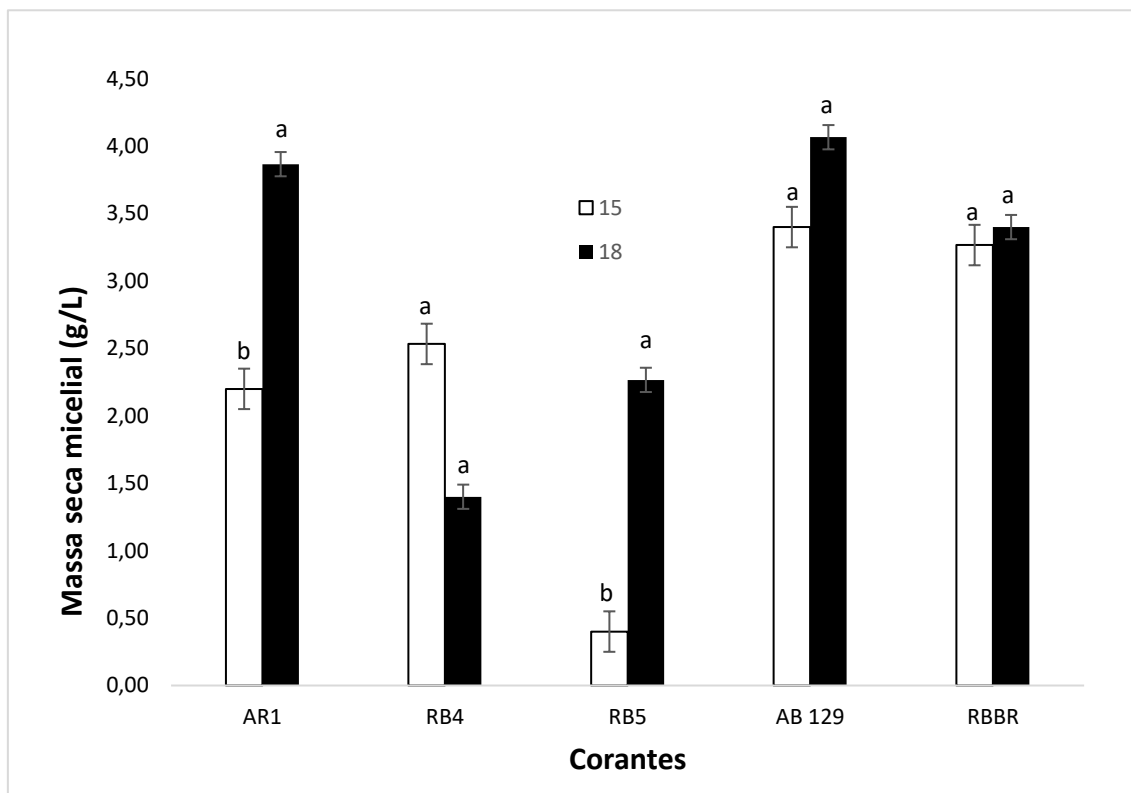


Figura 4. Massa micelial seca de dois isolados de fungos de podridão branca cultivados em meio contendo corantes industriais por 18 dias.

Ao final do cultivo em meio líquido contendo corantes industriais, o padrão de descoloração não variou significativamente entre os isolados (Figura 6). Ambos os fungos descoloriram as substâncias de forma similar. O corante RB5 foi o mais degradado, superando os 90%, enquanto o AR1 foi o que menos sofreu degradação, com valores em torno de 20%.

Corantes da classe das antraquinonas, como alguns dos utilizados neste estudo (AB129, RB4 e RBBR), são mais eficientemente descoloridos por lacases do que corantes de

outros grupos químicos (Champagne e Ramsay, 2005). Diferenças na eficiência de um isolado em degradar um corante estão diretamente ligadas à estrutura química do composto em questão. Outro fator que pode dificultar a descoloração de uma substância por fungos é a sua concentração em solução, uma vez que pode exercer um efeito inibitório devido à sua toxicidade. Zeng et al. (2011) observaram redução no crescimento e na descoloração de RBBR por *Trametes troglia* em concentrações iguais ou superiores a 300mg/L.

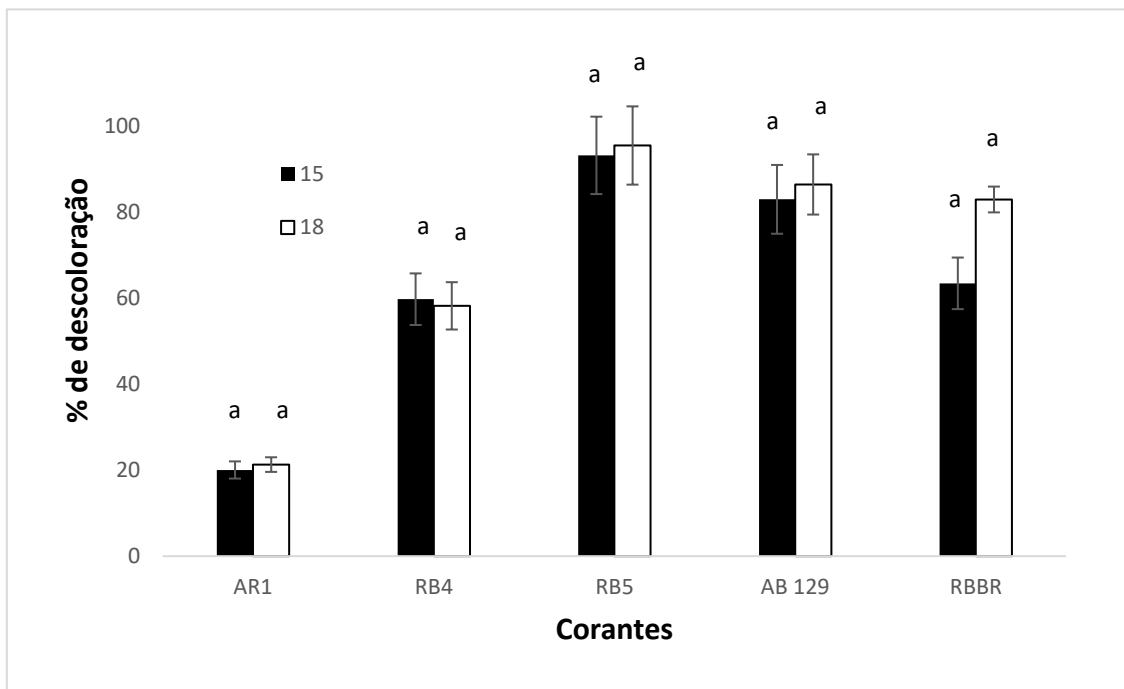


Figura 6. Descoloração de cinco corantes industriais por dois isolados de fungos degradadores de madeira após 18 dias de cultivo em meio líquido.

Em um estudo com os mesmos corantes utilizados neste trabalho, Zeng et al. (2011) observaram descoloração dos compostos da classe das antraquinonas utilizando apenas lacase, enquanto os corantes da classe azo (AR1 e RB5) foram descoloridos apenas após a adição de um mediador redox à mistura de reação. É sabido que a presença de mediadores redox na mistura de reação pode aumentar o espectro de substratos oxidados por lacases (Call e Mücke, 1997). Na presente investigação os corantes azo foram degradados sem a adição de mediadores à mistura de reação, mas é sabido que mediadores naturais podem existir no extrato bruto (Levin et al., 2016), o que facilitaria a descoloração. Para além disso, o extrato enzimático não continha apenas lacases, mas também peroxidases (Figura 3), as quais provavelmente

também tiveram um papel ativo na degradação dos compostos.

Kiiskinem et al. (2004) observaram que alguns isolados foram eficientes na descoloração de compostos, mas não produziram lacases em meio líquido, o que pode ser explicado pela presença de outras enzimas como manganês peroxidase e lignina peroxidase. Similarmente, Zhuo et al. (2019) observaram que o extrato bruto foi mais eficiente na degradação de corantes do que lacases purificadas, indicando um efeito sinérgico entre lacases e outras enzimas ligninolíticas, como manganês peroxidase e lignina peroxidase. Os autores ressaltam, porém, que as lacases exerceram um papel dominante na descoloração de tais substâncias.

Por outro lado, diferentes isoformas de lacases apresentam diferentes habilidades de descoloração,



sendo umas mais eficientes que outras em descolorir compostos em geral (Othman et al., 2018), bem como há graus de especialização de substratos, com algumas isoformas sendo mais eficientes em degradar tipos específicos de corantes, como trifenilmetano e índigo, enquanto outras apresentam maior habilidade em degradar corantes azo e antraquinona (Li et al., 2014). No presente estudo não foram observadas importantes diferenças nas habilidades específicas das enzimas dos isolados em degradar os corantes. Ambos os extratos apresentaram padrões semelhantes de descoloração em todos os corantes utilizados (Figura 6). Sob um ponto de vista prático visando à sua utilização em sistemas de biorremediação, lacases inespecíficas, ou seja, que fossem capazes de oxidar uma ampla gama de substratos, seriam mais interessantes do que outras eficientes em degradar apenas determinados grupos de compostos.

4. Conclusão

Ambos os isolados de fungos de podridão branca se mostraram capazes de sintetizar lacases e peroxidases nas condições dos experimentos realizados. Paralelamente, os extratos brutos dos fungos propiciaram a degradação de todos os corantes utilizados nesta pesquisa. Levando em consideração a afinidade das lacases pelos corantes utilizados é justo supor que estas enzimas provavelmente foram as maiores responsáveis pela descoloração. Por outro lado, haja vista a produção de fenoloxidasas por estes micro-organismos, é possível que estas também tenham exercido efeito na degradação de tais substâncias. A

utilização de extratos brutos para a degradação de compostos tóxicos tem vantagens sobre as enzimas purificadas, pois podem conter uma mistura de diferentes enzimas e também mediadores naturais que ampliam ainda mais o espectro de compostos oxidáveis. Os fungos utilizados nesta investigação, portanto, demonstraram potencial para utilização em sistemas de biorremediação visto que descoloriram corantes de duas classes distintas, mostrando versatilidade e inespecificidade, características desejáveis para seu emprego neste campo. A contínua prospecção de espécies de micro-organismos amazônicos bem como a investigação de suas capacidades faz-se necessária a fim de se obter isolados com potenciais aplicações nas diferentes áreas da biotecnologia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFAM, ao INPA e à EMBRAPA.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. Os autores e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

ANJANEYULU, Y.; CHARY, N. S.; RAJ, D. S. S. Decolourization of industrial effluents-available methods and emerging technologies - a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 4, p. 245–273, 2005.



- ARAÚJO, I. F.; NÓBREGA, J. P.; CAVALLAZZI, J. R. P.; MUNIZ, A. W.; VARGAS-ISLA, R.; ISHIKAWA, N. K. Efeito do pH na atividade de lacase e na descoloração de corantes industriais por extrato enzimático de *Panus lecomtei*. **Scientia Amazonia**, v. 8, n.3, p. CB6-CB15, 2019.
- ARAÚJO, I. F.; VARGAS-ISLA, R.; ISHIKAWA, N. K.; CAVALLAZZI, J. R. P. Efeito do cobre na atividade de lacase e na descoloração de Remazol Brilliant Blue R por extrato de *Panus strigellus* cultivado em meios com frutos amazônicos. **Scientia Amazonia**, v. 10, n.1, p. CB33-CB43, 2021.
- BANAT, I. M.; NIGAM, P.; SINGH, D.; MARCHANT, R. Microbial decolorization of textile dye-containing effluents: a review. **Bioresource Technology**, v. 58, p. 217–227, 1996.
- BIBI, I.; BHATTI, H. N.; ASGHER, M. 2011. Comparative study of natural and synthetic phenolic compounds as efficient laccase mediators for the transformation of cationic dye. **Biochemical Engineering Journal**, v. 56, p. 225–231, 2001.
- BUSWELL, J. A.; CAI, Y. J.; CHANG, S.-T. Fungal and substrate-associated factors affecting the ability of individual mushroom species to utilize different lignocellulosic growth substrates. In: Chang, S.-T.; Buswell, J. A.; Chiu, S. W. (eds.). **Mushroom Biology and Mushroom Products**, Chinese University Press, 1993.
- CALL, H. P.; MÜCKE, I. History, overview and applications of mediated lignolytic systems, especially laccase-mediator-systems (Lignozym process). **Journal of Biotechnology**, v. 53, p. 163–172, 1997.
- CALL, H.P.; MUCKE, I. History, overview and applications of mediated lignolytic systems, especially laccase-mediator-systems (Lignozym process). **Journal of Biotechnology**, v. 53, p. 163–202, 1997.
- CHAMPAGNE, P. P.; RAMSAY, J. A. Contribution of manganese peroxidase and laccase to dye decoloration by *Trametes versicolor*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 69, p. 276–285, 2005.
- CHAO, W. L.; LEE, S. L. Decolouration of azo dyes by three white-rot fungi: influence of carbon source. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 10, p. 556–559, 1994.
- CHMELOVÁ, D.; ONDREJOVIČ, M. Effect of metal ions on triphenylmethane dye decolorization by laccase from *Trametes versicolor*. **Nova Biotechnologica et Chimica**, v. 14, p. 191–200, 2015.
- CHMELOVÁ, D.; ONDREJOVIČ, M. Purification and characterization of extracellular laccase produced by *Ceriporiopsis subvermispota* and decolorization of triphenylmethane dyes. **Journal of Basic Microbiology**, v. 56, p. 1173–1182, 2016.
- COUTO, S. R.; HERRERA, J. L. T. Industrial and biotechnological applications of laccases: a review. **Biotechnological Advances**, v. 24, p. 500–513, 2006.
- DE JONG, E.; DE VRIES, F. P.; FIELD, J. A.; VAN DER ZWAN, R. P. DE BONT, J. A. M. Isolation and screening of basidiomycetes with high peroxidative activity. **Mycological Research**, v. 12, p. 1098–1104, 1992.
- GOPINATHAN, R.; KANHERE, J. BANERJEE, J. Effect of malachite green toxicity on non target soil organisms. **Chemosphere**, v. 120, p. 637–644, 2015.
- HARKIN, J. M.; OBST, J. R. Syringaldazine, an effective reagent for detecting laccase and peroxidase in fungi. **Experientia**, v. 29, p. 381–387, 1973.
- JARAMILLO, A.; JIMÉNEZ, S.; MERINO, A.; HORMAZA, A. Obtención de un inóculo fúngico para la degradación de un colorante azo por fermentación en estado sólido. **Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica**, p. 17, v. 577–586, 2014.
- KHLIFI, R.; BELBAHRI, L.; WOODWARD, S.; ELLOUZ, M.; DHOUIB, A.; SAYADI, S.; MECHICHI, T. Decolourization and detoxification of textile industry wastewater by the laccase-mediator system. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, p. 802–808, 2010.
- KIISKINEM, L.-L.; RÄTTÖ, M.; KRJUS, K. Screening for novel laccase-producing



- microbes. **Journal of Applied Microbiology**, v. 94, p. 640-646, 2004.
- KUNAMNENI, A.; GHAZI, I.; CAMARERO, S.; BALLESTEROS, A.; PLOU, F. J.; ALCALDE, M. Decolorization of synthetic dyes by laccase immobilized on epoxy-activated carriers. **Process Biochemistry**, v. 43, p. 169-178, 2008.
- LEVIN, L.; CARABAJAL, M.; HOFRICHTER, M.; ULLRICH, R. Degradation of 4-nitrophenol by the white-rot polypore *Trametes versicolor*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 107, p. 174-179, 2016.
- LI, Q.; GE, L.; CAI, J.; PEI, J.; XIE, J.; ZHAO, L. Comparison of two laccases from *Trametes versicolor* for application in the decolorization of dyes. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, p. 545-555, 2014.
- MAJEAU, J. A.; BRAR, S. K.; TYAGI, R. D. Laccases for removal of recalcitrant and emerging pollutants. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 2331-2235, 2010.
- MARTINEZ, A. T. Molecular biology and structure function of lignin degrading heme peroxidases. **Enzyme Microbiology and Technology**, v. 30, p. 425-444, 2002.
- NIGAM, P.; ARMOUR, G.; BANAT, I. M.; SINGH, D.; MARCHANT, R. Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues. **Bioresource Technology**, v. 72, p. 219-226, 2000.
- OGUGBUE, C. J.; SAWIDIS, T. Bioremediation and detoxification of synthetic wastewater containing triarylmethane dyes by *Aeromonas hydrophila* isolated from industrial effluent. **Biotechnology Research International**, p. 1-11, 2011.
- OTHMAN, A. M.; ELSAYED, M. A.; ELSHAFEI, A. M.; HASSAN M. M. Purification and biochemical characterization of two isolated laccase isoforms from *Agaricus bisporus* CU13 and their potency in dye decolorization International. **Journal of Biological Macromolecules**, v. 113, p. 1142-1148, 2018.
- RAGHUKUMAR, C.; D'SOUZA, T. M.; THORN, R. G.; REDDY, C. A. Lignin-modifying enzymes of *Flavodon flavus*, a basidiomycete isolated from a coastal marine environment. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 65, p. 2103-2111, 1999.
- RODRIGUEZ, C. S.; SANROMÁN, M.; GÜBITZ, G. M. Influence of redox mediators and metal ions on synthetic acid dye decolorization by crude laccase from *Trametes hirsute*. **Chemosphere**, v. 58, p. 417-422, 2005.
- RYU, W. Y.; JANG, M. Y.; CHO, M. H. The selective visualization of lignin peroxidase, manganese peroxidase and laccase, produced by white rot fungi on solid media. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 8, p. 130-134, 2003.
- SCHMIDT-DANNERT, C. Biocatalytic portfolio of Basidiomycota. **Current Opinion in Current Biology**, v. 31, p. 40-49, 2016.
- SINGH, R. L. SINGH, P. K.; SINGH, R. P. Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes - a review. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 4, p. 21-31, 2015.
- VIKRANT, K.; GIRI, B. S.; RAZA, N.; ROY, K. KIM, K. H.; RAI, B. N.; SINGH, R.S. Recent advancements in bioremediation of dye: current status and challenges. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 355-367 2018.
- WESENBERG, D.; KYRIAKIDES, I.; AGATHOS, S.N. White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. **Biotechnology Advances**, v. 22, p. 161-187, 2003.
- Xu, F. Oxidation of phenols, anilines, and benzenethiols by fungal laccases: correlation between activity and redox potentials as well as halide inhibition. **Biochemistry**, v. 35, p. 7608-7614, 1996.
- 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**, v. 239, p. 408-424, 2018.
- ZENG, X.; CAI, Y.; LIAO, X.; ZENG, X.; LI, W.; ZHANG, D. Decolorization of synthetic dyes by crude lacase from a new isolated



Ciências Biológicas

Scientia Amazonia, v. 11, n. 1, CB1-CB13, 2022

Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7072328> - ISSN:2238.1910

Trametes trogii strain cultivated on solid agroindustrial residue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 187, p. 517-525, 2011.

ZHUO, R.; ZHANG, J.; YU, H; MA, F;
ZHANG, X. The roles of *Pleurotus ostreatus*

HAUCC 162 laccase isoenzymes in decolorization of synthetic dyes and the transformation pathways **Chemosphere**, v. 234, p. 733-745, 2019.