

IMOBILIZAÇÃO DE FUNGOS LIGNINOLÍTICOS PARA BIODEGRADAÇÃO DE EFLUENTES TÊXTEIS: UMA REVISÃO SOBRE *Phanerochaete chrysosporium* E ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO

IMMOBILIZATION OF LIGNINOLYTIC FUNGI FOR TEXTILE EFFLUENT
BIODEGRADATION: A REVIEW ON *Phanerochaete chrysosporium* AND
OPTIMIZATION STRATEGIES

IMMOVILIZACIÓN DE HONGOS LIGNINOLÍTICOS PARA LA
BIODEGRADACIÓN DE EFLUENTES TEXTILES: UNA REVISIÓN SOBRE
Phanerochaete chrysosporium Y ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN

Lídia de Oliveria Holanda¹, Bárbara Valeria da Silva Lima², Ryan Barbosa de Andrade³, Evelyn
Heloiza Costa da Silva⁴, Ninive Bezerra Florêncio⁵, Erik Jonne Vieira de Melo⁶, Pérsio Alexandre
da Silva⁷, Mateus Ribeiro Costa⁸, Jackelly Felipe de Oliveira⁹, Rita de Cássia Mendonça de
Miranda¹⁰, Norma Buarque de Gusmão¹¹

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6975

Recibido: 07/08/2026 | Aceptado: 02/09/2026 | Publicación en línea: 09/09/2026.

RESUMO

A indústria têxtil está entre os setores de maior relevância econômica global. No Brasil, segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção (ABIT), em 2024, houve um faturamento de R\$ 221 bilhões. Entretanto, a indústria têxtil demanda um grande volume de água, além de gerar elevado impacto ambiental devido ao descarte de efluentes intensamente corados,

¹ Graduada em Bacharel em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: lidia.holanda@ufpe.br

² Graduanda em Bacharel em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: barbara.lima@ufpe.br

³ Graduando em Ciências Biológicas Ambientais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: ryan.rba@ufpe.br

⁴ Graduanda em Ciências Biológicas Ambientais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: evelyn.heloiza@ufpe.br

⁵ Doutoranda em Biotecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: ninive.florencio@ufpe.br

⁶ Doutor em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: erikjonne@gmail.com

⁷ Doutorando em Biotecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: persiosilva@gmail.com

⁸ Doutorando em Biotecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: mateus.rcosta@ufpe.br

⁹ Doutora em Bioquímica e Fisiologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: jackelly.felipe@ufpe.br

¹⁰ Doutora em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: rita.mmiranda@ufpe.br

¹¹ Doutora em Farmácia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: norma.gusmao@ufpe.br

quimicamente complexos e de difícil degradação. Diante da limitação dos métodos convencionais de tratamento físico-químico na remoção completa desses poluentes e no cumprimento das exigências da legislação ambiental vigente, a biotecnologia surge como uma alternativa sustentável e promissora. Destaca-se a biorremediação com fungos ligninolíticos, com especial ênfase para a espécie *Phanerochaete chrysosporium*, cuja capacidade de produzir enzimas não específicas auxilia na quebra de corantes sintéticos complexos. Para superar fragilidades operacionais do micélio livre, a aplicação de técnicas de imobilização celular tem se mostrado eficaz para aumentar a estabilidade, reutilização e eficiência operacional da biomassa. Esta revisão sintetiza o panorama da indústria têxtil pernambucana, corantes têxteis e sua persistência ambiental, caracterização de efluentes e legislação ambiental aplicável, e métodos convencionais e biológicos de tratamento com fungos ligninolíticos imobilizados.

Palavras-chave: Efluente Têxtil. Corantes Sintéticos. *Phanerochaete chrysosporium*. Imobilização Fúngica. Biodegradação. Biorremediação.

ABSTRACT

The textile industry is among the sectors of greatest global economic relevance. In Brazil, according to the Brazilian Textile and Apparel Industry Association (ABIT), revenue reached R\$ 221 billion in 2024. However, the textile industry demands a large volume of water, in addition to generating a high environmental impact due to the discharge of intensely colored, chemically complex, and non-biodegradable effluents. Given the limitations of conventional physicochemical treatment methods in completely removing these pollutants and complying with current environmental legislation, biotechnology emerges as a sustainable and promising alternative. Bioremediation using ligninolytic fungi stands out, with special emphasis on the species *Phanerochaete chrysosporium*, whose ability to produce non-specific enzymes assists in the breakdown of complex synthetic dyes. To overcome the operational drawbacks of free mycelium, the application of cell immobilization techniques has proven effective in increasing biomass stability, reusability, and operational efficiency. This review summarizes the overview of the textile industry in Pernambuco, textile dyes and their environmental persistence, effluent characterization, applicable environmental legislation, and conventional as well as biological treatment methods using immobilized ligninolytic fungi.

Keywords: Textile Effluent. Synthetic Dyes. *Phanerochaete chrysosporium*. Fungal Immobilization. Biodegradation. Bioremediation.

RESUMEN

La industria textil se encuentra entre los sectores de mayor relevancia económica global. En Brasil, según la Asociación Brasileña de la Industria Textil y de la Confección (ABIT), en 2024 la facturación alcanzó los R\$ 221 mil millones. Sin embargo, la industria textil demanda un gran volumen de agua, además de generar un alto impacto ambiental debido a la descarga de efluentes intensamente coloreados, químicamente complejos y de difícil degradación. Ante la limitación de los métodos convencionales de tratamiento físico-químico para la remoción completa de estos contaminantes y el cumplimiento de las exigencias de la legislación ambiental vigente, la biotecnología surge como una alternativa sostenible y prometedora. Se destaca la biorremediación con hongos ligninolíticos, con especial énfasis en la especie *Phanerochaete chrysosporium*, cuya capacidad de producir enzimas no específicas auxilia en la degradación de

colorantes sintéticos complexos. Para superar las fragilidades operativas del micelio libre, la aplicación de técnicas de inmovilización celular ha demostrado ser eficaz para aumentar la estabilidad, reutilización y eficiencia operativa de la biomasa. Esta revisión sintetiza el panorama de la industria textil en Pernambuco, los colorantes textiles y su persistencia ambiental, la caracterización de efluentes, la legislación ambiental aplicable y los métodos de tratamiento convencionales y biológicos con hongos ligninolíticos inmovilizados.

Palabras clave: Efluente Têxtil. Colorantes Sintéticos. *Phanerochaete chrysosporium*. Inmovilización Fúngica. Biodegradación. Biorremediación.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é reconhecida como um dos setores de maior expressão econômica mundial, com valor estimado em US\$ 961 bilhões no ano de 2019 e projeção de crescimento de 4,5% ao ano (ITC, 2021). Essa expansão está associada a uma demanda crescente por produtos têxteis, sobretudo em razão do aumento populacional (Dadi *et al.*, 2017), o que intensifica o consumo de matérias-primas e, conseqüentemente, a geração de resíduos resultantes do processamento têxtil. A destinação desses resíduos constitui problemática central para o setor, considerando os potenciais impactos ambientais e a dificuldade de gestão de recursos hídricos e sólidos (Holkar *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2023).

Etapas como tingimento, lavagem e branqueamento respondem por parte significativa da carga poluidora gerada, produzindo efluentes líquidos com alta complexidade química, decorrente da diversidade de corantes e compostos orgânicos e inorgânicos utilizados. Essa complexidade influencia diretamente a biodegradabilidade do resíduo, resistência que se mantém mesmo diante de tratamentos convencionais, cujos subprodutos de degradação incompleta podem originar moléculas nocivas, carcinogênicas ou mutagênicas (Gaylarde *et al.*, 2005; Ito *et al.*, 2016).

Nesse cenário, a degradação de corantes por métodos biológicos vem sendo empregada como alternativa econômica e ambientalmente eficaz para a descoloração de águas residuais de tingimento e lavagem, evitando o lançamento de efluentes com carga poluidora acima dos limites legalmente permitidos (Chaturvedi *et al.*, 2021). Fungos filamentosos, por meio de biossorção, bioacumulação ou degradação enzimática, são frequentemente utilizados nesse contexto devido

à sua adaptabilidade a diferentes condições ambientais, o que facilita sua aplicação em processos biotecnológicos de tratamento de efluentes.

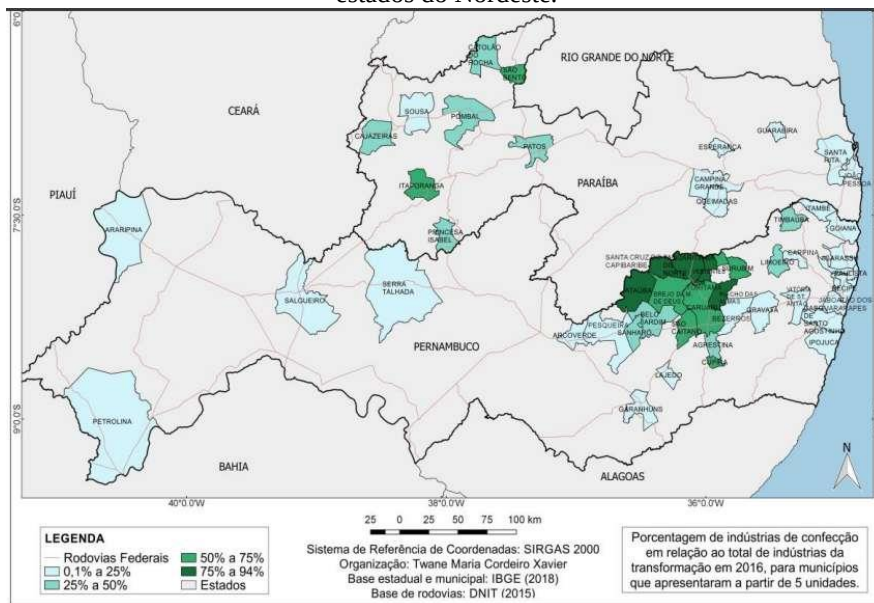
Diante desse panorama, esta revisão tem como objetivo reunir e sistematizar, a partir da literatura, os principais aspectos relacionados à indústria têxtil regional, à composição e legislação de efluentes têxteis, aos métodos convencionais e biológicos de tratamento e, principalmente, ao uso de fungos ligninolíticos, com ênfase em *Phanerochaete chrysosporium* imobilizado em suporte sintético, como estratégia biotecnológica de biorremediação, discutindo os fatores que influenciam sua eficiência e as abordagens propostas na literatura para sua otimização.

REFERENCIAL TEÓRICO

Indústria Têxtil em Pernambuco

O estado de Pernambuco possui uma industrialização histórica no setor têxtil e de confecções, relacionada principalmente à cultura do algodão, uma importante matéria-prima das indústrias locais, ainda que a atual produção de fibras sintéticas e artificiais configure uma parcela significativa neste segmento (Sudene, 2023). A influência desse setor na economia local é evidenciada pela formação de um polo industrial têxtil no agreste de Pernambuco, o qual concentra o percentual de até 94% de indústrias de confecção em relação ao total de indústrias de transformação da região, com expansão para outros municípios do estado, conforme é sintetizado na figura 1.

Figura 1. Mapa da porcentagem de indústrias de confecção em relação ao total de indústrias de transformação em estados do Nordeste.



Fonte: Xavier (2020).

Segundo dados fornecidos pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - Sudene (2023), uma prática integrativa comum de indústrias localizadas no polo têxtil, sobretudo no setor de fabricação de jeans, é a transferência de parte do trabalho de etapas de produção para outras empresas. No setor de fabricação de jeans isso é evidente em serviços de lavanderia e estonagem, processos especializados de tratamento de tecidos e peças que consomem grandes volumes de água e geram efluentes líquidos fortemente corados e quimicamente complexos.

A concentração de indústrias têxteis também constitui uma alta vazão de lançamentos de resíduos em aquíferos que cortam a região e boa parte do território de Pernambuco, como os rios Capibaribe e Ipojuca. Sendo rios importantes para a bacia hidrográfica do estado, relatórios mais recentes da Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) revelam resultados compatíveis com a classe 2 de águas doces da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357/2005, dados estes que expõem impactos sobre a qualidade da água e são determinantes para suas limitações de uso. (Pernambuco, 2024).

De acordo com Viana *et al.* (2018), efluentes de lavanderias de cidades associadas ao polo industrial têxtil do agreste são frequentemente dispensados nesses corpos hídricos, com comprometimento da qualidade da água para os seres vivos e do uso desse recurso, o que torna relevante a busca por métodos eficazes que contribuam para adequado tratamento e descoloração de efluentes têxteis de indústrias ao longo de seu território.

Corantes Têxteis

Na indústria têxtil, os corantes são compostos essenciais para etapas de tingimento de tecidos. Sua conformação molecular se dá por um grupo cromóforo, responsável por atribuir cor ao produto têxtil, e por um grupo funcional, que permite uma ligação com a fibra, possibilitando a permanência de uma coloração intensa mesmo após a lavagem dos tecidos (Waring e Hallas, 2013). De acordo com Gürses *et al.* (2016), para as indústrias têxteis, os corantes sintéticos têm sido amplamente usados em virtude da durabilidade, tonalidade consistente e diversificada, e intensidade persistente de sua cor.

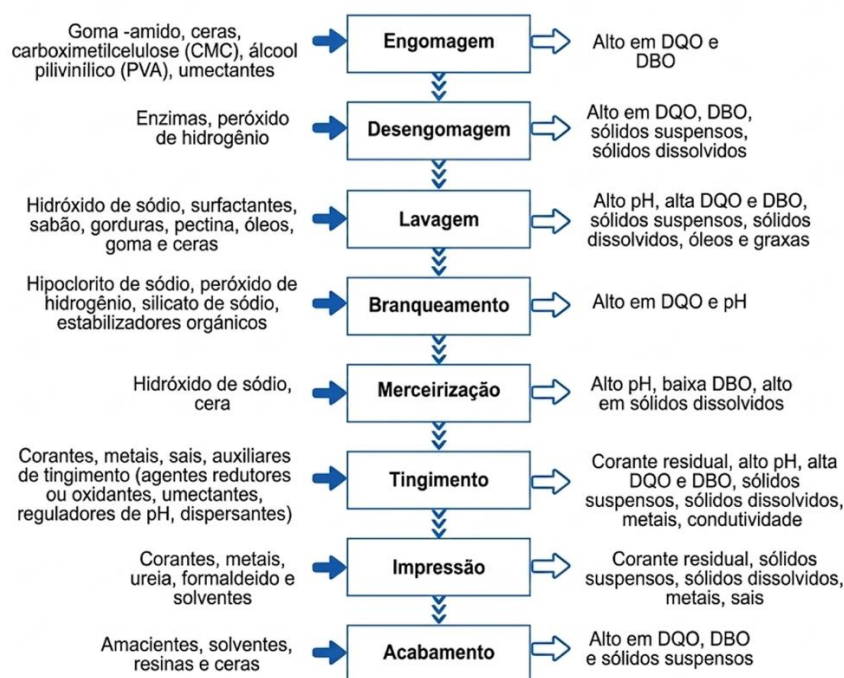
É preferível que os corantes sejam quimicamente estáveis, isto é, que sejam resistentes a alterações químicas e à degradação quando expostos a fatores ambientais. Isso é fundamental para manter a coloração e a aparência desejadas dos tecidos tingidos ao longo do tempo, seja devido à sua estrutura molecular, resistência química, ao calor, a exposição à luz ultravioleta, a umidade ou por uma estabilidade de pH (Alegbe e Uthman, 2024). Essa estabilidade se torna um problema no momento de seu descarte, devido a uma alta solubilidade em água e uma maior resistência à biodegradação, o que caracteriza os corantes como sendo os compostos mais problemáticos nos efluentes têxteis (Kumar *et al.* 2019; Balan e Monteiro, 2001; Toh *et al.*, 2003).

Tendo em vista que apenas 50% dos corantes são retidos no tecido, os resíduos do processo ainda possuem uma alta concentração e podem ser lançados em grandes volumes no ambiente, com parâmetros fora dos valores máximos permitidos (Roy *et al.*, 2018; Kousha, 2012; Işık e Sponza, 2007). Desse modo, quase toda carga de corantes que são lançados no meio ambiente advém de efluentes industriais têxteis (Revankar e Lele, 2007).

Caracterização de Efluentes de Indústrias Têxteis

Efluentes têxteis são conhecidos por apresentarem uma alta complexidade de composição, tendo em vista a variedade de substâncias utilizadas em diferentes etapas na fabricação têxtil (figura 2). Reddy e Osborne (2020) apontam que além do grande uso de corantes e substâncias auxiliares para conferência da coloração dos tecidos, mais de 8000 compostos químicos podem ser adicionados durante o processo, tais como ácidos, sais, metais, agentes oxidantes e redutores. O que dificulta a replicação fiel de características de efluentes têxteis reais em efluentes sintéticos.

Figura 2. – Principais poluentes liberados em cada etapa do processamento de resíduos líquidos das indústrias têxteis.



Fonte: Adaptado de Bidu *et al.* (2021), Holkar *et al.* (2016) e Yaseen e Scholz (2019).

Entre esses compostos estão várias substâncias potencialmente tóxicas, como detergentes, solventes, surfactantes, os próprios corantes e outras matérias orgânicas recalcitrantes, que, quando não tratadas, podem ser prejudiciais ao ecossistema natural, a organismos marinhos e terrestres, e com efeito prolongados na saúde humana (Li *et al.*, 2020; Hamidi *et al.*, 2014).

A depender da etapa em que o resíduo está sendo produzido, os efluentes têxteis geralmente são caracterizados por cores intensas, alta temperatura ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), pH elevado ($> 7,00$), alta salinidade, elevadas concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), sólidos suspensos totais (SST), baixos níveis de oxigênio dissolvido (OD), além de metais pesados e íons (Tafesse *et al.*, 2015; Uwidia *et al.*, 2013).

Essas características variam conforme os processos de produção empregados pela indústria têxtil, de modo que são geradas águas residuais de alta complexidade química, particulares de cada empresa, com composição mista e, muitas vezes, desconhecida de corantes. Dados de parâmetros físico-químicos estudados em resíduos têxteis foram reunidos por Ramos *et al.* (2020), esses resultados tornam explícita a variabilidade de composição dos efluentes entre as indústrias (tabela 1 e 2).

Tabela 1. Faixas de parâmetros e médias de dados de efluentes têxteis de indústrias e lavanderias em território nacional.

Parâmetros	Indústrias – Faixa	Indústrias – Média	Lavanderias – Faixa	Lavanderias – Média
pH	5,1 – 11,8	–	5,0 – 12,5	–
DBO5 (mg O ₂ .L-1)	22 – 2692	1004,1 ± 812,5	12 – 387	185,9 ± 137,0
DQO (mg O ₂ .L-1)	280,1 – 10488	3222,6 ± 3088,8	150 – 1636	527,8 ± 369,8
DQO/DBO5	2 – 59	8,9	1,4 – 12,5	4,7
Turbidez (NTU)	0,2 – 1600	467,5 ± 604,4	47,2 – 686,9	178,0 ± 182,5
ST (mg.L-1)	1187 – 15148	7921,4 ± 5558,9	179 – 4297,7	2167,0 ± 1661,6
Temperatura (°C)	–	–	19,6 – 35	26,0 ± 5,0

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2020).

Tabela 2. Faixas de parâmetros de efluentes têxteis de indústrias estrangeiras, segundo diferentes autores.

Parâmetros	Tufekci <i>et al.</i> (2007)	Ashfaq e Khatoon (2014)	Hussein (2013)	Ghaly <i>et al.</i> (2014)
pH	–	7,0 – 9,0	5,5 – 10,5	6,0 – 10,0
DBO5 (mg O ₂ .L-1)	280 – 1140	80 – 6000	100 – 4000	80 – 6000
DQO (mg O ₂ .L-1)	614 – 1960	150 – 12000	150 – 10000	150 – 12000
DQO/DBO5	1,6 – 2,6	–	–	–
ST (mg.L-1)	–	15 – 8000	–	–
Temperatura (°C)	–	–	33 – 45	35 – 45

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2020).

Legislação Ambiental

O artigo 8 da Instrução Normativa nº 003/2022 do CPRH (2022) estabelece que, para o descarte adequado de efluentes têxteis em corpo hídrico receptor, a empresa deve possuir sistema de tratamento de efluentes líquidos industriais que seja capaz de atender aos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental vigente (Resolução CONAMA nº 430/2011 e Norma Técnica CPRH no 2001) com o efluente tratado, bem como a remoção total da coloração conferida pelos corantes têxteis e de materiais flutuantes.

Os parâmetros indicados em tais legislações são baseados na classificação dos corpos de água que recebem a vazão de efluente tratado, com enquadramento de acordo nos níveis de qualidade que devem possuir para atender às necessidades da comunidade, tipificando os limites aceitáveis com base na destinação hídrica para os tipos de uso humano preponderantes do aquífero (Brasil, 2005). Para a classificação são consideradas as águas doces, salobras e salinas do território nacional, enquadradas em treze classes de qualidade (Brasil, 2005).

Em atualização à Resolução nº 357 do CONAMA, a Resolução nº 430 estabelece, entre as condições de lançamento de efluentes em corpos hídricos, limites de pH entre 5 a 9, temperatura inferior a 40°C, máximo de materiais sedimentáveis em 1mL/L, remoção mínima de 60% de DBO, além de valores máximos permitidos para parâmetros orgânicos e inorgânicos que informam sobre a carga poluidora das águas residuais (Brasil, 2011). De acordo com a tipologia

industrial, a Norma Técnica nº 2001 do CPRH estabelece requisitos para o controle de carga orgânica em efluentes líquidos e fixa o percentual aceitável de redução da DQO em 80% para a indústria têxtil (Pernambuco, 2003).

Quanto à coloração, no Brasil, não há uma legislação específica que delimite padrões de cor para efluentes, ainda que no CONAMA 430/2011 os Art.15-III e Art.16-I estabeleçam, na ausência de padrões definidos, que devem-se adotar os padrões disponíveis para a classe em que os corpos receptores estiverem enquadrados. Desta forma, para corpos hídricos de água doce classificados como Classes 2, a exemplo dos rios Capibaribe e Ipojuca, o parâmetro que analisa a coloração do resíduo líquido está estabelecido como cor verdadeira e corresponde a um valor limite de até 75 mg Pt/L (CONAMA, 2005).

A determinação de cor em amostras líquidas se baseia na metodologia proposta no Standard Methods (APHA, 2017), com a análise de cor espectrofotometricamente em um comprimento de onda que pode variar dentro de uma faixa entre 450 e 465nm, utilizando uma solução padrão de platina-cobalto (Pt- Co) para expressão de uma curva de calibração. Por essa metodologia é possível obter resultados de até duas formas de cor: Cor Aparente e Cor Verdadeira. A Cor Aparente é indicativa da cor total percebida visualmente na amostra, logo, considera não apenas presença de corantes como também a turbidez desta, sendo um indicador da qualidade geral da água. Já Cor verdadeira corresponde à cor natural de um corpo de água sem a interferência de materiais particulados que possam estar em suspensão, isto é, a cor após a amostra ser filtrada em material de porosidade de pelo menos 0,45 µm ou centrifugada, levando em consideração apenas a cor causada por substâncias dissolvidas.

Tratamento de Efluentes Industriais Têxteis

É preciso destacar que não há um método universalmente utilizado para o tratamento de efluentes têxteis corados, sobretudo devido à alta complexidade do resíduo e a resistência à degradação dos corantes, além da grande variedade de tipos e concentração dos compostos. Tendo em vista a variabilidade de composição dos efluentes têxteis, o conjunto de métodos adotado para tratamento dos resíduos também costuma ser específico da indústria aplicadora, com foco em atingir a adequação aos limites propostos pela legislação e em promover degradação e descoloração possível. Em geral, busca-se aplicar sistemas com metodologias de pré-tratamento, tratamento principal e/ou pós-tratamento que auxiliem na remoção da carga poluidora, sejam eles

métodos físicos, químicos ou biológicos (Rosa, 2018).

Dentre os tratamentos convencionais e comuns de efluente têxtil (quadro 1), métodos de coagulação-floculação são os mais utilizados em estações de tratamento para a descoloração de águas residuais têxteis e contribuir na redução da carga total de poluentes. Com princípio físico-químico, esses métodos podem atingir uma alta taxa de descoloração do resíduo, com a remoção de moléculas do corante através do uso de coagulantes inorgânicos como *Al*, *Ca*, *FeCl₃*, *FeSO₃*, *MgCl₂* e orgânicos, como polieletrólitos (Papic, 2004; Bidhendi, 2007). No entanto, durante o processo também são gerados subprodutos aromáticos, conferindo aspectos nocivos e tóxicos, o que torna necessária a implementação de métodos complementares de tratamento.

Métodos biológicos podem utilizar tratamentos aeróbios, como lagoas aeradas, filtros biológicos e lodos ativados (quadro 1), sendo comumente utilizados para reduzir valores de parâmetros como DBO, DQO, coloração e outros contaminantes. No entanto, a capacidade de remoção de corantes industriais é limitada devido à maior produção de lodo, o que, consequentemente, produz resíduos que demandam tratamento, devido à alta carga orgânica e corantes (Holkar *et al.*, 2016). Ramos *et al.* (2020) destaca o uso de pelo menos 3 métodos em processos de tratamento convencionais de efluentes têxteis, com empresas que chegam a utilizar até 10 métodos (tabela 3), o que aumenta o custo dos sistemas empregados.

Quadro 1. Fundamentos dos tratamentos convencionais empregados para efluentes têxteis.

Tratamento	Descrição
Gradeamento/Peneiramento	Remoção de sólidos grosseiros.
Desarenação	Remoção de partículas arenosas com densidade superior a 2 g.cm-3.
Equalização	Tanque aerado para homogeneizar o efluente a ser tratado.
Coagulação - Floculação	Desestabilização de coloides por agentes coagulantes e consequente formação de flocos.
Tanque de Aeração	Reator biológico para remoção de matéria orgânica dissolvida e parte dos corantes.
Lagoa de estabilização aeróbia	Lagoa contendo microrganismos para remoção de matéria orgânica biodegradável.
Sedimentação	Remoção por diferença de densidade de flocos, partículas sedimentáveis, lodo biológico.
Processamento do lodo	Prensas, filtros e secadores para redução da umidade do lodo, geralmente descartado em aterros industriais.
Incineração	Combustão do lodo seco.

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2020).

Tabela 3. Processos empregados por indústrias brasileiras no tratamento de efluentes têxteis.

Descrição	Localidade	Capacidade (m³/h)	Etapas do tratamento
Coteminas	Blumenau - SC	350	PN-TE-TA-D-CF-D-FP*-LS*-AI*
Ricciari Confecções Ltda	Morro da Fumaça - SC	–	D-PN-D-TE-CF-D-LS*-AI*
Mar Indústria Têxtil Ltda	Içara - SC	36	CA-PN-TE-CF-D-I*-LEA
Lavanderia Industrial	Campos dos Goytacazes - RJ	25	CA-TE-CF-D-FP*-F
Lavanderia Expressa	Passo Fundo - RS	–	GR-TE-CF-D-LS*
Lavanderia Industrial	Cianorte - PR	70	PN-CA-TE-CF-D-TA-D-AD*-FP*-AI*
Lavanderia Industrial	Teresina - PI	24	CF-D-LS*
Lavanderia Industrial	Maringá - PR	–	PN-D-TA-D-LS*-AI*

Legenda: GR = Gradeamento; PN = Peneiramento; CA = Caixa de areia; TE = Tanque de equalização; D = Decantador; TA = Tanque de aeração; AD = Adensador; FP = Filtro prensa; CF = Coagulação-floculação; LS = Leito de secagem; AI = Aterro Industrial; F = Filtração convencional; I = Incineração; LEA = Lagoa de aeração. *

Operações destinadas aos lodos.

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2020).

Castillo-Suárez *et al.* (2023) e Chojnacka (2010) destacam que alguns dos principais métodos recentemente utilizados são os tratamentos biológicos que utilizam microrganismos (bactérias, fungos e algas) ou plantas para biodegradar ou bioconverter corantes em processos de biorremediação, além de processos químicos que envolvem adsorção, filtração por membranas, eletrocoagulação e processos oxidativos avançados. Dentre esses métodos, a biodegradação e a bioadsorção são tidas como as melhores alternativas para a descoloração de corantes sintéticos de águas residuais em comparação com o tratamento físico e químico devido ao seu menor custo, reprodutibilidade, maior eficiência e baixa produção de poluição secundária (tabela 4) (Tan *et al.*, 2016).

Tabela 4. Relação de custos de diferentes processos de tratamento de efluentes.

Processo	Custo	Ano	Correção monetária p/ 2024	Conversão p/ o Real
Bioadsorção	0,13 US\$/m³	2023	0,13 US\$/m³	0,70 R\$/m³
Biodegradação	1,2 €/m³	2014	1,53 €/m³	8,86 R\$/m³
Adsorção	0,18 – 0,2 US\$/m³	2021	0,21 – 0,23 US\$/m³	1,13 – 1,24 R\$/m³
Filtração por membrana	1 – 6 US\$/m³	2014	1,33 – 7,96 US\$/m³	7,18 – 42,98 R\$/m³
Coagulação	0,17 €/m³	2024	–	0,98 R\$/m³
Eletrocoagulação	0,527 – 1,013 US\$/m³	2018	0,66 – 1,01 US\$/m³	3,56 – 5,45 R\$/m³
Processos Oxidativos Avançados	17 – 313,7 US\$/m³	2010	25 – 452 US\$/m³	92 – 2.505 R\$/m³

Fonte: Adaptado de Salgado (2024).

Fungos Ligninolíticos como Alternativa Biotecnológica

Mecanismos Enzimáticos e Potencial de *Phanerochaete chrysosporium*

Os fungos desempenham funções importantes como participantes dos ciclos biogeoquímicos, atuando na degradação, utilização e transformação de substratos orgânicos e inorgânicos (Cavalcante, 2023). Segundo Gadd (2004), o metabolismo fúngico envolvido nesses ciclos é amplamente estudado por seu potencial de aplicação em biotecnologia ambiental, a exemplo da degradação de poluentes orgânicos.

Basidiomicetos, sobretudo os fungos da podridão branca, são microrganismos cuja capacidade de degradação de compostos está associada principalmente à produção de enzimas extracelulares de baixa especificidade para o substrato, o que os torna adequados ao tratamento de resíduos de características variadas, como os das indústrias têxteis. Esses fungos demonstram potencial descolorante devido à produção de enzimas modificadoras de lignina, como lacase, manganês-peroxidase e lignina-peroxidase (Wesenberg *et al.*, 2003).

Phanerochaete chrysosporium é um basidiomiceto do grupo dos fungos de podridão branca, participante do ciclo biogeoquímico do carbono, caracterizado pela decomposição da madeira em razão de sua afinidade por substratos ricos em lignocelulose (Alexopoulos e Mims, 1996; Ricaczeki *et al.*, 2020). Esse fungo é investigado quanto ao seu potencial de degradação de corantes desde 1983 (Glenn e Gold, 1983), processo relacionado principalmente à produção de enzimas em seu metabolismo secundário. Devido a características como rápido crescimento e potencial de degradar ampla variedade de poluentes com base em seu conjunto enzimático, o *P. chrysosporium* é considerado um organismo modelo para estudos de biodegradação (Ansari *et al.*, 2017; Ricaczeki *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2014).

A remoção de corantes por *P. chrysosporium* pode ocorrer por biodegradação (uso de enzimas microbianas para quebrar a estrutura do corante e transformá-lo em subprodutos intermediários), bioacumulação (absorção ativa do corante pela membrana celular ou por ciclo metabólico) ou bioadsorção (adsorção passiva pela parede celular ou biomassa) (Singh, 2006; Rajhans *et al.*, 2021). A predominância de uma dessas vias depende das condições metabólicas em que o fungo se desenvolve, podendo o ambiente do meio influenciar diretamente a rota utilizada durante a descoloração de resíduos.

Imobilização de Biomassa Fúngica como Estratégia de Aplicação

Para tratamento de efluentes, os fungos podem ser utilizados na forma de células livres ou em sistemas com biomassa imobilizada. Métodos que utilizam imobilização se destacam por proporcionar um ambiente adequado ao crescimento microbiano, reduzindo o estresse do ambiente natural e promovendo maior estabilidade em comparação a sistemas de células livres (Zhang *et al.*, 2020).

Essa técnica busca confinar células microbianas viáveis na forma de biofilmes em uma matriz ou suporte (natural ou sintético), cujas propriedades hidrodinâmicas diferem das do ambiente de inserção, restringindo a livre circulação das células fúngicas e mantendo atividades enzimáticas constantes (Martins *et al.*, 2013). Isso aumenta a taxa de reprodução e sobrevivência celular, reduz a competição com outros organismos e amplia a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de adaptação do microrganismo ao novo ambiente (Zhang *et al.*, 2020). De acordo com Dixit *et al.* (2021), a vantagem prática da biomassa imobilizada está no aumento do rendimento e da eficiência de processos biotecnológicos a baixo custo operacional.

Entre os suportes sintéticos empregados, a espuma de poliuretano se destaca por sua alta porosidade e organização irregular de fibras finas e resistentes, características evidenciadas por microscopia eletrônica de varredura, que favorecem a aderência de hifas tanto internamente quanto na superfície do suporte (Rosa, 2018). Essa conformação amplia o potencial de imobilização do micélio fúngico. Além disso, a resistência e a maleabilidade da matriz permitem a reutilização da biomassa imobilizada ao longo de múltiplos ciclos, como descrito por Ansari *et al.* (2017), onde em processo de aclimação de *P. chrysosporium* a um efluente com corantes azo reativos, utilizaram o mesmo suporte por cinco ciclos consecutivos, atribuindo ao poliuretano alta estabilidade celular e maior capacidade biossintética, fatores que favorecem o desempenho do fungo em aplicações biotecnológicas.

Fatores que Influenciam a Eficiência da Biodegradação e Estratégias de Otimização

A eficiência da biodegradação e descoloração fúngica de efluentes têxteis está sujeita a múltiplas variáveis, cujo entendimento é essencial para o aprimoramento de processos biotecnológicos aplicados. A relação entre demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de um efluente é um indicador relevante de sua

biodegradabilidade, assim, quanto maior a razão DQO/DBO, menos biodegradável tende a ser a amostra (Papadopoulos *et al.*, 2001; Rudaru *et al.*, 2022). Nesse contexto, a redução da DQO durante processos de biodegradação fúngica tem sido associada a uma possível diminuição da toxicidade do efluente tratado, dada a relação positiva observada entre esses dois parâmetros em estudos de biodegradação de efluentes têxteis corados (Rajhans *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2018).

A estrutura química do corante também determina a eficiência de sua remoção. Por exemplo, as diferenças nas taxas de descoloração entre corantes distintos, mesmo sob ação do mesmo fungo, são atribuídas à distribuição singular de elétrons, densidade de carga e fatores estéricos das moléculas, que influenciam a ação enzimática durante o tratamento biológico (Chagas e Durrant, 2001). Radha *et al.* (2005) verificaram diferentes taxas de descoloração de corantes dos grupos azo, trifenilmetano, antraquinona, tiazina, cuba e diazo por *P. chrysosporium*, reforçando esse efeito.

Ainda, a concentração e a toxicidade do corante também afetam o desempenho fúngico. Sendo assim, recomendada etapas de aclimação serial do microrganismo, com o objetivo de reduzir a etapa de partida para o crescimento e alcançar a estabilização de sistemas microbianos de tratamento (Silva *et al.*, 2017; Simões, 2017). Do contrario, pode ocorrer o comprometimento da eficiência do processo, como relatado por Aksu e Dönmez (2005), em estudo sobre bioacumulação dos corantes reativos Remazol Blue, Reactive Black e Reactive Red pela levedura *Candida tropicalis*, onde observaram que o aumento da concentração de corante inibiu e retardou o crescimento do microrganismo, fenômeno relacionado ao tempo necessário para a superação da fase *lag* ao serem introduzidos em condições distintas das habituais (Madigan *et al.*, 2016).

Outro fator determinante é a disponibilidade de nutrientes no meio, pois concentrações elevadas de substâncias podem mudar ou comprometer vias metabólicas. Como evidenciados por Cripps *et al.* (1990) que atribuíram à presença de nitrogênio no meio a ocorrência de descoloração mais lenta e maior adsorção, em vez de degradação, pelo *P. chrysosporium* dos corantes Orange II, Tropaeolin O, Congo Red e Azure B, associada à inibição da enzima lignina peroxidase.

Esse achado reforça a importância de monitorar as concentrações de nitrogênio em efluentes têxteis reais ao aplicar métodos de biodegradação fúngica, tendo em vista sua possível influência sobre as vias metabólicas utilizadas pelo fungo. De modo complementar, Zeng *et al.* (2015) associam a inibição ou redução da taxa de descoloração ao longo do tempo de exposição à diminuição da biomassa fúngica por deficiências nutricionais ou ao acúmulo de metabólitos tóxicos no meio.

Estratégias de otimização com aditivos químicos têm demonstrado potencial relevante para intensificar a biodegradação fúngica de corantes. Harazono e Nakamura (2005) obtiveram taxas de degradação de apenas 31% para uma mistura de corantes azo e antraquinona por *Phanerochaete sordida*, elevando esse percentual para 85% com a simples adição do surfactante Tween 80. De forma semelhante, Wang *et al.* (2022) relataram a elevação da taxa de descoloração do corante índigo carmim, por esporos de *Bacillus safensis*, em efluente sintético, de 37% para 97% com o uso de acetosiringona como mediador redox.

Esses resultados indicam que a associação entre biomassa imobilizada e aditivos químicos (surfactantes e mediadores redox) representa uma fronteira promissora para otimização de processos de biorremediação fúngica, com potencial de reduzir o tempo de tratamento e aumentar a eficiência sem elevar substancialmente os custos operacionais. Por fim, Yaseen e Scholz (2019) destacam que a avaliação da eficiência de remoção de corantes têxteis não deve se restringir a corantes isolados, sendo fundamental compreender também a descoloração em misturas, uma vez que efluentes reais apresentam composição variada e complexa.

CONCLUSÃO

A revisão da literatura evidencia que a indústria têxtil, sobretudo em polos regionais como o de Pernambuco, permanece como importante fonte de efluentes de alta complexidade química, cuja coloração intensa e resistência à degradação impõem desafios aos sistemas convencionais de tratamento. Nesse contexto, fungos ligninolíticos, com destaque para *Phanerochaete chrysosporium*, apresentam características vantajosas para aplicação em biorremediação, sobretudo quando imobilizados em suportes sintéticos como a espuma de poliuretano: baixo custo, estabilidade operacional, possibilidade de reuso da biomassa e ação enzimática de baixa especificidade frente a corantes estruturalmente diversos.

Contudo, a eficiência desses processos depende de variáveis ainda pouco padronizadas na literatura, como a estrutura química do corante, a disponibilidade de nutrientes, o tempo de exposição e a presença de mediadores redox ou surfactantes. Estudos que associam biomassa imobilizada a esses aditivos indicam ganhos expressivos de eficiência, apontando um caminho promissor para otimização de processos biotecnológicos de tratamento de efluentes têxteis.

Conclui-se, portanto, que a imobilização de fungos ligninolíticos é uma estratégia biotecnológica viável e de baixo custo para a biodegradação de efluentes têxteis, mas que ainda

demanda investigações adicionais voltadas à padronização de protocolos, à validação em efluentes reais e à avaliação de toxicidade como métrica complementar à descoloração, de modo a viabilizar sua aplicação em maior escala.

REFERÊNCIAS

AKSU, Z.; DÖNMEZ, G. Combined effects of molasses sucrose and reactive dye on the growth and dye bioaccumulation properties of *Candida tropicalis*. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 7, p. 2443-2454, 2005.

ALEGBE, E. O.; UTHMAN, T. O. A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes. **Heliyon**, v. 10, n. 13, 2024.

ALEXOPOULOS, C. J.; MIMS, C. W. **Introductory Mycology**. New York: John Wiley & Sons, p. 61-63, 1996.

ANSARI, Z. *et al.* Glucose oxidase effect on treatment of textile effluent containing reactive azo dyes by *Phanerochaete chrysosporium*. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 2017.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ASHFAQ, A.; KHATOON, A. Waste management of textiles: A solution to the environmental pollution. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 3, 780, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do setor**. São Paulo: ABIT, 2024. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 26 ago. 2026.

BALAN, D. S. L.; MONTEIRO, R. T. R. Decolorization of textile indigo dye by ligninolytic fungi. **Journal of Biotechnology**, v. 89, n. 2-3, p. 141-145, 2001.

BIDHENDI, G. R. N. *et al.* Evaluation of industrial dyeing wastewater treatment with coagulants and polyelectrolyte as a coagulant aid. **Iran J Environ Health Sci Eng**, p. 29-36, 2007.

BIDU, J. M. *et al.* Current status of textile wastewater management practices and effluent characteristics in Tanzania. **Water Science and Technology**, v. 83, n. 10, p. 2363-2376, 2021.

BRASIL. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF, 2005.

BRASIL. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF, 2011.

CASTILLO-SUÁREZ, L. A. *et al.* A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. **International Journal of Environmental Science**

and Technology, v. 20, n. 9, p. 10553-10590, 2023.

CAVALCANTE, F. G. *et al.* Grupos funcionais do solo: papel das comunidades microbianas especializadas na ciclagem de nutrientes e sensores de distúrbios ambientais. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 15, n. 9, p. 8676-8698, 2023.

CHAGAS, E. P.; DURRANT, L. R. Decolorization of azo dyes by *Phanerochaete chrysosporium* and *Pleurotus sajor-caju*. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 29, p. 473-477, 2001.

CHATURVEDI, A. *et al.* A computational approach to incorporate metabolite inhibition in the growth kinetics of *Bacillus subtilis* in the treatment of wastewater containing Congo red dye. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 193, n. 7, p. 2128-2144, 2021.

CHOJNACKA, K. Biosorption and bioaccumulation – the prospects for practical applications. **Environment International**, v. 36, n. 3, p. 299-307, 2010.

CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, DF, 2005.

CRIPPS, C.; BUMPUS, J. A.; AUST, S. D. Biodegradation of azo and heterocyclic dyes by *Phanerochaete chrysosporium*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 4, p. 1114-1118, 1990.

DADI, D. *et al.* Environmental and health impacts of effluents from textile industries in Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 1, 2017.

DIXIT, M. *et al.* Enhanced bioremediation of pulp effluents through improved enzymatic treatment strategies: a greener approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, 2021.

GADD, G. M. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation. **Geoderma**, 2004.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 36-43, 2005.

GHALY, A. E.; ANANTHASHANKAR, R.; ALHATTAB, M.; RAMAKRISHNAN, V. V. Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. **Journal of Chemical Engineering & Process Technology**, 1, 1, 2014.

GLENN, J. K.; GOLD, M. H. Decolorization of several polymeric dyes by the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. **Applied and Environmental Microbiology**, 1983.

GUO, X.-L.; ZHU, Z.-W.; LI, H.-L. Biodegradation of sulfamethoxazole by *Phanerochaete chrysosporium*. **Journal of Molecular Liquids**, v. 198, p. 169-172, 2014.

GÜRSSES, A. *et al.* Classification of dye and pigments. In: *Dyes and Pigments*. **Cham: Springer International Publishing**, 2016. p. 31-45.

HAMIDI, M. R.; JOVANOVA, B.; PANOVSKA, T. K. Toxicological evaluation of the plant products using Brine Shrimp (*Artemia salina* L.) model. **Macedonian Pharmaceutical Bulletin**, v. 60, n. 1, 2014.

HARAZONO, K.; NAKAMURA, K. Decolorization of mixtures of different reactive textile dyes by the white-rot basidiomycete *Phanerochaete sordida*. **Chemosphere**, v. 59, n. 1, p. 63-68, 2005.

HOLKAR, C. R. *et al.* A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351-366, 2016.

HUSSEIN, F. H. Chemical properties of treated textile dyeing wastewater. **Asian Journal of Chemistry**, 25, 9393, 2013.

IŞIK, M.; SPONZA, D. T. Fate and toxicity of azo dye metabolites under batch long-term anaerobic incubations. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, n. 4, p. 934-939, 2007.

ITC - INTERNATIONAL TRADE CENTRE. **Trade Map - Trade statistics for international business development**. Disponível em: <https://www.trademap.org/Index.aspx>. Acesso em: 18 out. 2025.

KOUSHA, M. *et al.* Box–Behnken design optimization of Acid Black 1 dye biosorption by different brown macroalgae. **Chemical Engineering Journal**, v. 179, p. 158-168, 2012.

KUMAR, S. S. *et al.* Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. **Fuel**, v. 254, 2019.

LI, M. *et al.* Feasibility of concentrating textile wastewater using a hybrid forward osmosis-membrane distillation (FO-MD) process. **Water Research**, v. 172, 2020.

LIANG, J. *et al.* Toxicity evaluation of textile dyeing effluent and its possible relationship with chemical oxygen demand. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 166, p. 56-62, 2018.

MADIGAN, M. T. *et al.* **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

MARTINS, S. C. S. *et al.* Immobilization of microbial cells: a promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater. **African Journal of Biotechnology**, v. 12, n. 28, 2013.

PAPADOPOULOS, A. *et al.* Variations of COD/BOD5 ratio at different units of a wastewater stabilization pond pilot treatment facility. **In: 7th International Conference on Environmental Science and Technology, Ermoupolis**, 2001. p. 16-19.

PAPIC, S. *et al.* Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process. **Dyes and Pigments**, p. 291-298, 2004.

PERNAMBUCO. **Instrução Normativa nº 003/2022. Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH)**. Recife, 2022.

PERNAMBUCO. **Norma Técnica CPRH nº 2.001: Controle de Carga Orgânica em Efluentes Líquidos Industriais**. Recife, 2003.

PERNAMBUCO. **Relatório de monitoramento de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco 2020-2022**. Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH). Recife, 2024.

RADHA, K. V. *et al.* Decolorization studies of synthetic dyes using *Phanerochaete chrysosporium* and their kinetics. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 10, p. 3337-3345, 2005.

RAJHANS, G. *et al.* Mycoremediation and toxicity assessment of textile effluent pertaining to its possible correlation with COD. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

RAJHANS, Geetanjali *et al.* Degradation of dyes by fungi: an insight into mycoremediation. **Biotechnologia**, v. 102, n. 4, p. 445, 2021.

RAMOS, M. D. N. *et al.* Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, p. 913-929, 2020.

REDDY, C.; OSBORNE, J. W. Biological treatment of textile dye wastewater. **Journal of Environmental Science and Technology**, 2020.

REVANKAR, M. S.; LELE, S. S. Synthetic dye decolorization by *Ganoderma* sp. WR-1. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 775-780, 2007.

RICACZESKI, C. C. *et al.* *Produção de enzimas ligninolíticas a partir de um processo fermentativo em efluente têxtil por Phanerochaete chrysosporium*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

ROSA, A. F. da S. *Imobilização de fungos filamentosos para o tratamento de efluente têxtil*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ROY, U. *et al.* Assessment on the decolourization of textile dye (Reactive Yellow) using *Pseudomonas* sp. immobilized on fly ash. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 185-195, 2018.

RUDARU, D.-G.; LUCACIU, I. E.; FULGHECI, A. M. Correlation between BOD5 and COD – biodegradability indicator of wastewater. **Romanian Journal of Ecology & Environmental Chemistry**, v. 4, n. 2, p. 80-86, 2022.

SALGADO, A. T. de S. *Avaliação de processos de tratamento para remoção de corante índigo de efluentes industriais têxteis*. TCC (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

SILVA, J. A.; SILVA, G. H. R.; SARTI, A. Tratamento de esgoto sanitário de baixa carga utilizando reator compartimentado anaeróbio/aeróbio em escala piloto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 539-549, 2017.

SIMÕES, A. L. G. *Estudo da aclimação de lodos anaeróbios como estratégia de inoculação para partida de biometanizadores alimentados com fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SINGH, Harit. **Mycoremediation: fungal bioremediation**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 592 p. DOI: 10.1002/0470050594.

SUDENE. Dados sobre o setor têxtil no Nordeste. Recife, 2023.

TAFESSE, T.; YETEMEGNE, A.; KUMAR, S. B. The physico-chemical studies of wastewater in Hawassa textile industry. **Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 2, n. 4, 2015.

TAN, L. *et al.* Aerobic decolorization, degradation and detoxification of azo dyes by a newly isolated salt-tolerant yeast *Scheffersomyces spartinae* TLHS-SF1. **Bioresource Technology**, v. 203, p. 287-294, 2016.

TOH, Y.-C. *et al.* Decolourisation of azo dyes by white-rot fungi (WRF) isolated in Singapore. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 33, n. 5, p. 569-575, 2003.

TÜFEKCI, N.; SIVRI, N.; TOROZ, I. Pollutants of textile industry wastewater and assessment of its discharge limits by water quality standards. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, 7, 97, 2007.

UWIDIA, I. E.; EJEOMO, C. Characterization of textile wastewater discharges in Nigeria and its pollution implications. **Global Journal of Research in Engineering**, v. 13, n. 4, p. 1-4, 2013.

VIANA, M. A. *et al.* Pegada hídrica em indústria de beneficiamento de jeans no Agreste Pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 61-68, 2018.

WANG, Xiaoting *et al.* Characterization of a novel laccase from *Bacillus safensis* and its application in synthetic dye decolorization using redox mediators. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], v. 209, p. 1120-1130, 2022.

WARING, David R.; HALLAS, Geoffrey (Ed.). **The chemistry and application of dyes**. Springer Science & Business Media, 2013.

WESENBERG, D.; KYRIAKIDS, I.; AGHATOS, S. N. White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. **Biotechnology Advances**, p. 161-187, 2003.

XAVIER, T. M. C. Polo de confecções do agreste de Pernambuco: formação de aglomerado produtivo e suas dinâmicas espaciais. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 429-444, 2020.

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 2, p. 1193-1226, 2019.

ZENG, G. *et al.* Study of the degradation of methylene blue by semi-solid-state fermentation of agricultural residues with *Phanerochaete chrysosporium* and reutilization of fermented residues. **Waste Management**, v. 38, p. 424-430, 2015.

ZHANG, B. *et al.* Bead-immobilized *Pseudomonas stutzeri* Y2 prolongs functions to degrade s-triazine herbicides in industrial wastewater and maize fields. **Science of the Total Environment**, v. 731, 2020.