

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DAIANE MENEGUZZI

**BIORREMEDIAÇÃO DE UM EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE LAMINADOS DE
MADEIRA PELO FUNGO *Trichoderma koningiopsis***

PATO BRANCO

2024

DAIANE MENEGUZZI

**BIORREMEDIAÇÃO DE UM EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE LAMINADOS DE
MADEIRA PELO FUNGO *Trichoderma koningiopsis***

**BIOREMEDIATION OF EFFLUENT FROM THE WOOD LAMINATE INDUSTRY BY
THE FUNGUS *Trichoderma koningiopsis***

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Química da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Mário Antônio Alves da Cunha.

PATO BRANCO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Pato Branco

Departamento Acadêmico de Química
Bacharelado em Química



BIORREMEDIAÇÃO DE UM EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE LAMINADOS DE
MADEIRA PELO FUNGO *Trichoderma koningiopsis*

por

DAIANE MENEGUZZI

Este Trabalho de Conclusão de Curso TCC foi apresentado em 20 de Junho de 2024 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Mário Antônio Alves da Cunha
Prof.(a) Orientador(a)

Raquel Dalla Costa da Rocha
Membro titular

Marcio Barreto Rodrigues
Membro titular

Nota: O Documento original e assinado pela Banca Examinadora encontra-se no SEI processo 23064.025033/2024-07 e documento 4232051

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a toda minha família por todo o apoio e auxílio durante toda a minha graduação, especialmente ao meu pai Silvar Meneguzzi, minha mãe Rosane Finantes Meneguzzi e aos meus irmãos Danielly, Alan, Alex e Gabrielly que me deram forças em todos os momentos difíceis.

Aos meus amigos Gabrieli, Jamily, Nicoli, Natanael que estiveram comigo durante toda essa jornada deixando-a mais leve e agradável.

Ao Weslei que me apoiou, ajudou e sempre esteve ao meu lado nos momentos bons e ruins, que com sua paciência me ajudou em todas as dificuldades.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Mário Antônio Alves da Cunha, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, paciência e dedicação com qual me orientou.

A Secretaria do Curso, pela cooperação e professores que passaram ao longo do curso, por todo ensinamento e conselho.

Ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UTFPR - Pato Branco (LabSolos) pelas análises realizadas.

Ao laboratório Multiusuário Central de Análises – CA por todo auxílio nas análises.

Enfim, a todos os que de algum modo me ajudaram ou fizeram parte desse momento e contribuíram para a realização desta pesquisa.

Um cientista no seu laboratório não é apenas um técnico: é, também, uma criança colocada à frente de fenômenos naturais que impressionam como se fossem um conto de fadas.
(CURIE, MARIE 1867-1934).

RESUMO

No processo de cozimento das toras de madeira na indústria de laminados há geração de um efluente altamente poluente e de difícil degradação, o qual contém altos níveis de fenólicos e carga orgânica. Neste estudo, o efluente industrial foi analisado quanto a sua carga poluidora e biorecalcitrância. O fungo *Trichoderma koningiopsis* foi avaliado como um agente de biorremediação, sendo estudada a influência dos parâmetros concentração das fontes de carbono e nitrogênio e pH do meio de cultivo. Planejamento experimental (Delineamento Composto Central Rotacional – 2³) foi utilizado como uma ferramenta de estudo no processo de biorremediação. Os resultados mostraram que o efluente apresenta elevados teores de fenólicos totais (9.000,1 mg L⁻¹), lignina solúvel (1360 mg L⁻¹) e insolúvel (49 mg L⁻¹), além de alta turbidez (60,5 NTU) e coloração intensa (114.015,15 UC). Os valores de DBO₅ (68.737,02 mg O₂ L⁻¹) e DQO (137.812,50 mg O₂ L⁻¹) excederam os limites estabelecidos pela legislação brasileira para descarte em corpos hídricos. A relação DBO₅/DQO (0,50) indicou que o efluente é parcialmente biodegradável e sugerindo que tratamentos biológicos podem ser viáveis para sua remediação. O fungo *Trichoderma koningiopsis* demonstrou potencial para remediação do efluente estudado, promovendo remoções de até 88,6% de DQO, 94,9% de cor e 84,5% de fenólicos totais. Foram consideradas como melhores condições de cultivo do fungo para remediação do efluente: pH 6, 12 g L⁻¹ de glicose e 4 g L⁻¹ de nitrato de amônio. Palavras-chaves: Agente biológico; Compostos fenólicos; Lignina; Resíduo; Tratamento

ABSTRACT

In the process of cooking wood logs in the laminate industry, there is the generation of a highly polluting effluent that is difficult to degrade, containing high levels of phenolics and organic load. In this study, the industrial effluent was analyzed for its pollutant load and biorecalcitrance. The fungus *Trichoderma koningiopsis* was evaluated as a bioremediation agent, studying the influence of parameters such as concentration of carbon and nitrogen sources and pH of the culture medium. An experimental design (Central Composite Rotatable Design – 2³) was used as a study tool in the bioremediation process. The results showed that the effluent presented high levels of total phenolics (9,000.1 mg L⁻¹), soluble lignin (1360 mg L⁻¹) and insoluble lignin (49 mg L⁻¹), as well as high turbidity (60.5 NTU) and intense coloration (114,015.15 CU). The BOD_y values (68,737.02 mg O₂ L⁻¹) and COD (137,812.50 mg O₂ L⁻¹) exceeded the limits established by Brazilian legislation for discharge into water bodies. The BOD_y/COD ratio (0.50) indicated that the effluent is partially biodegradable, suggesting that biological treatments could be viable for its remediation. The fungus *Trichoderma koningiopsis* showed potential for remediating the studied effluent, achieving removals of up to 88.6% of COD, 94.9% of color, and 84.5% of total phenolics. The optimal cultivation conditions for the fungus for effluent remediation were identified as pH 6, 12 g L⁻¹ glucose, and 4 g L⁻¹ ammonium nitrate.

KEYWORDS: Biological agent; Phenolics compounds; Lignin; Residue; Treatment.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Efluente derivado do cozimento da madeira	16
3.2	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	18
4	MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1	Caracterização do efluente	20
4.1.1	pH	20
4.1.2	Condutividade	20
4.1.3	Cor	20
4.1.4	Turbidez	21
4.1.5	Série de Sólidos	21
4.1.5.1	Determinação de sólidos suspensos	21
4.1.5.2	Determinação de sólidos dissolvidos totais	21
4.1.5.3	Determinação de sólidos totais	22
4.1.5.4	Determinação de cinzas (ou resíduo mineral)	22
4.1.6	Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO)	22
4.1.7	Determinação de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	23
4.1.8	Razão de Biodegradabilidade (DBO ₅ /DQO)	23
4.1.9	Fenóis Totais	23
4.1.10	Série Nitrogenada	24
4.1.11	Lignina insolúvel	24
4.1.12	Lignina solúvel	24
4.1.13	Espectroscopia UV-Visível (UV-Vis)	25
4.1.14	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR) 25	
4.1.15	Fungo: Manutenção e Preparo do Inóculo	26
4.2	Ensaio de biorremediação	26
4.2.1	Estudo de Crescimento Radial	26
4.2.2	Tratamento em Sistema Submerso	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29

5.1	Caracterização do efluente	29
	ABSTRACT	
5.1.2	Perfil espectroscópico do efluente bruto na região do infravermelho.....	32
5.1.3	Varredura UV-VIS.....	33
5.2	Crescimento radial do micélio fúngico	34
5.3	Delineamento experimental (DCCR 2³)	35
6.0	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de extensão continental que possui um potencial de produção industrial imenso, e neste panorama está incluída a indústria de compensados e laminados. Os compensados são fabricados através de um sistema que permite laminar ou folhear a madeira. Atualmente, há dois métodos empregados na produção dessas lâminas: o torneamento e o faqueamento.

No método de torneamento, uma tora descascada é posicionada em um torno rotativo, e uma faca afiada gera lâminas de madeira, as quais são usadas na fabricação dos compensados. Já o método de faqueamento produz lâminas a partir de uma tora inteira, metade ou um quarto dela. A tora é fixada nos lados, permitindo que uma faca do mesmo comprimento seja pressionada sobre ela, resultando em fatias individuais (HEINZ, 2017).

Para obtenção das lâminas, as toras de madeira são previamente submetidas a aquecimento com vapor de água e isto gera um efluente industrial bastante tóxico. Este efluente é caracterizado por alto conteúdo de compostos recalcitrantes, incluindo lignina e compostos fenólicos.

Importante destacar a necessidade de tratamento dos diferentes efluentes industriais gerados pelas indústrias, tanto por questões ambientais, como legais. Neste contexto, a crescente consciência dos riscos iminentes à saúde humana e a necessidade premente de preservação dos recursos naturais têm impulsionado esforços para mitigar a problemática das contaminações do ambiente.

Medidas incluem a imposição de regulamentos mais restritivos buscando reduzir a quantidade e a toxicidade das emissões, a prática de reciclagem e reuso de resíduos, adaptação e otimização de processos produtivos, a substituição de matérias-primas nocivas, além do emprego de métodos de tratamento de efluentes e restauração de ambientes já contaminados que atendam a tais restrições.

Entre os processos de tratamento de efluentes industriais, destaque pode ser dado à biorremediação. A biorremediação é um processo de degradação de compostos com alta carga contaminante realizado por organismos vivos como fungos, bactérias, algas ou plantas. É um processo que têm demonstrado eficiência no tratamento de vários tipos de efluentes (SHIRKAVAND *et al.* 2016). A utilização de fungos neste processo é uma opção viável tendo em vista a resistência destes à meios com elevada concentração de compostos tóxicos. Os fungos são ótimos

degradadores de matéria orgânica e conseguem produzir enzimas extracelulares como por exemplo celulases, lipases, manganês peroxidases, lignina peroxidases e lacases, conseguindo assim transformar enzimaticamente moléculas grandes como a celulose em seus monômeros de glicose, por exemplo.

O presente estudo buscou avaliar, em um primeiro momento, a capacidade de biorremediação de um efluente oriundo do processo de cozimento das toras de madeira de uma indústria de laminados pelo fungo *Trichoderma koningiopsis*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de biorremediação do efluente gerado na etapa de cozimento das toras de madeira da indústria de laminados pelo fungo *Trichoderma koningiopsis*.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o efluente quanto aos parâmetros físico-químicos: pH, cor, turbidez, condutividade, fenóis totais, nitrogênio total, nitratos, nitritos, DQO, DBO₅, razão de biodegradabilidade, lignina solúvel, lignina insolúvel e série de sólidos.
- Avaliar a velocidade de crescimento radial do micélio fúngico em meio Ágar Sabouraud contendo 50% do efluente bruto (v/v).
- Avaliar a necessidade de suplementação do efluente com fontes de carbono (glicose) e de nitrogênio (nitrato de amônia), e a influência do pH inicial do meio de cultivo em fermentações submersas (processo de biorremediação) com o fungo *Trichoderma koningiopsis*, empregando para tanto um delineamento estatístico experimental (DCCR 2³).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

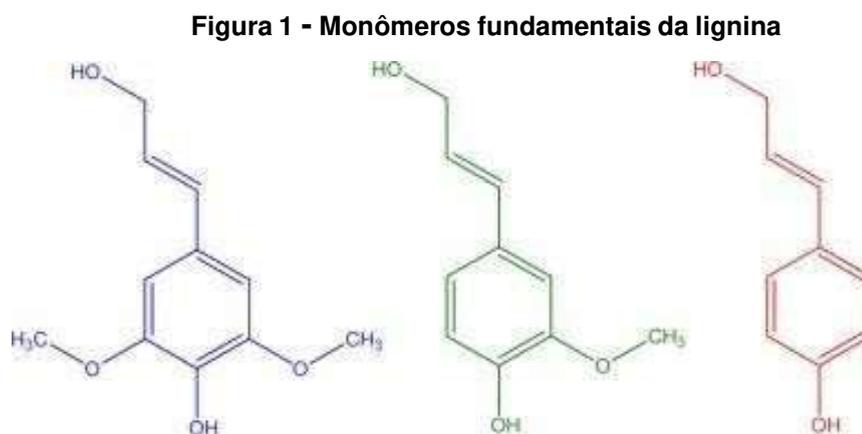
3.1 Efluente derivado do cozimento da madeira

O Brasil apresenta grande destaque na produção de compensados e laminados de madeira, já que detém um terço das florestas tropicais do mundo (CARVALHO, 2016).

Há geração de grande quantidade de efluente no processo de cozimento da madeira para produção de laminados. Tal efluente apresenta coloração escura, alta demanda química de oxigênio (DQO), elevada toxicidade, além de baixa biodegradabilidade (POLA *et al.* 2021). É composto principalmente por estruturas lignocelulósicas oriundas da madeira, como a lignina.

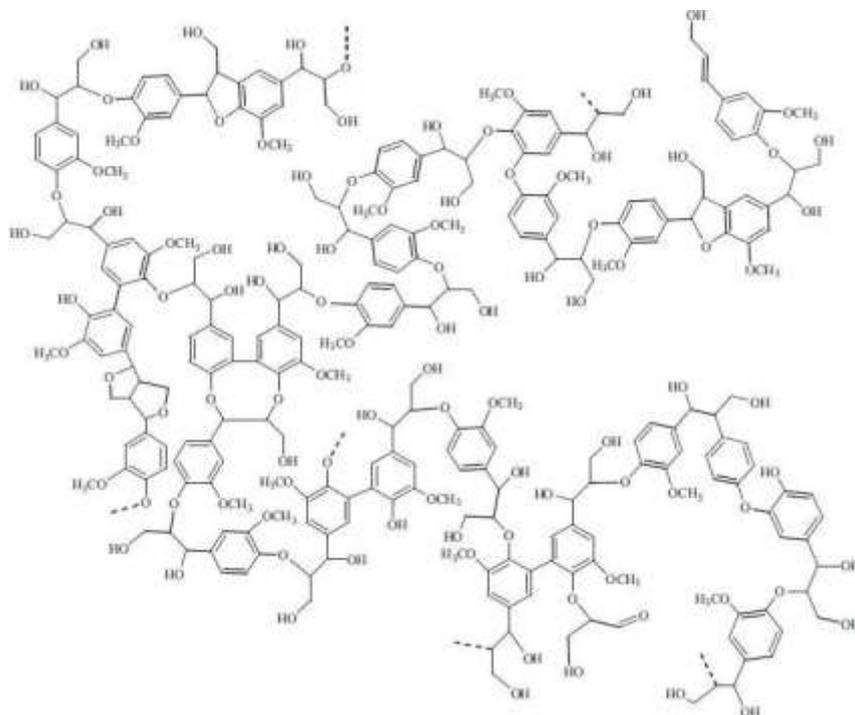
A lignina pode ser definida como uma macroestrutura fenólica, amorfa, tridimensional, encontra-se associada à celulose na parede celular e tem como função conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. É também um dos compostos naturais mais recalcitrantes na natureza e quimicamente complexa.

A lignina tem como base estrutural unidades de fenil-propano (álcool sinapílico, álcool coniferílico e álcool p-cumarílico) (Figuras 1 e 2), sendo o terceiro componente mais abundante na madeira, variando entre 15 e 35% de seu peso (COHEN; PERSKY; HADAR, 2002).



Álcool sinapílico, álcool coniferílico e álcool p-cumarílico, respectivamente.

Fonte: Lupoi *et al.*, 2015.

Figura 2 - Molécula de lignina

Fonte: Henriksson (2009).

Segundo estudo descrito por Barreto-Rodrigues, Aguiar, Cunha (2009), os efluentes derivados da indústria de madeira e laminados contém elevado valor de DQO e alta concentração de conteúdo fenólico, resultando em um efluente altamente tóxico ao ambiente. Similarmente, Heinz (2017) estudou a remediação de um efluente da indústria de madeira e laminados, obtendo na caracterização deste, os dados dispostos na Tabela 1 que mostram elevado conteúdo de compostos fenólicos, DQO e DBO₅ e lignina, indicando que o tratamento deste efluente é necessário devido as suas altas concentrações de compostos nocivos ao ambiente.

Tabela 1 – Caracterização físico-química do efluente bruto

Parâmetros	Resultados
pH	4,63
Condutividade	2.138 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 25 °C
DQO	12.192 \pm 100 mg O ₂ L ⁻¹
DBO ₅	8.849 \pm 60 mg O ₂ L ⁻¹
Razão de Biodegradabilidade	0,72
Cor	8.333 \pm 30 UC
Fenóis Totais	1.220 \pm 5 mg L ⁻¹
Nitratos	263 \pm 9 mg L ⁻¹
Nitritos	159 \pm 3 mg L ⁻¹
Nitrogênio Amoniacal	141 \pm 10 mg L ⁻¹
Nitrogênio Total Kjeldahl	280 \pm 10 mg L ⁻¹
Lignina Klason solúvel	1360 \pm 3 mg L ⁻¹
Lignina Klason insolúvel	49 \pm 3 mg L ⁻¹
Sólidos Suspensos	0,52 \pm 0,02 g L ⁻¹
Sólidos Dissolvidos Totais	15 \pm 0,30 g L ⁻¹
Cinzas	2,73 \pm 0,04 g L ⁻¹
Sólidos Totais	18,45 \pm 0,15 g L ⁻¹

Fonte: Heinz (2017).

3.2 *Trichoderma koningiopsis*

O fungo ascomiceto *Trichoderma koningiopsis* (Figura 3), tem amplo campo de aplicação na área biotecnológica, principalmente como um bioherbicida. Além de sua atividade biopesticida, foi comprovado que algumas cepas possuem atividade bioestimulante, promovem o crescimento de plantas, melhoram o rendimento e qualidade nutricional, bem como mitigam efeitos prejudiciais de estresses abióticos (LOLITO *et al.* 2010).

Os inoculantes microbianos, como os produtos à base de *Trichoderma*, estão recebendo grande interesse nos últimos anos de pesquisadores e produtores agrícolas. Tal interesse é justificado pelo potencial de melhoria da produtividade das culturas, a qualidade nutricional, bem como a resistência a patógenos/pragas de plantas e numerosos estresses ambientais (FIORENTINO *et al.* 2018).

Figura 3 – *Trichoderma koningiopsis*



Fonte: Aatoria própria, (2023).

Diversos trabalhos demonstram a capacidade de fungos ascomicetos e basidiomicetos em promover a degradação enzimática de compostos fenólicos, remover cor e matéria orgânica recalcitrante de efluentes ricos em lignina (DIAZ *et al.* 2022), já que estes em sua maioria são lignolíticos.

Cabe destacar que os materiais lignocelulósicos representam fontes cruciais de carbono, desempenhando um papel fundamental como substratos no cultivo de microrganismos, como os fungos filamentosos. Fungos dos gêneros *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Fusarium* e *Pichia* são reconhecidos como eficientes produtores de xilanase. De maneira geral, é sabido que as espécies de *Trichoderma* sintetizam uma gama diversificada de enzimas destinadas à degradação de homopolissacarídeos e heteropolissacarídeos, predominantemente associadas à família das glicosil hidrolases (MARLENE *et al.* 2021).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os protocolos metodológicos deste trabalho incluem a caracterização do efluente bruto, avaliação inicial da toxicidade aguda do efluente em ensaios de acompanhamento do crescimento radial do micélio fúngico em meio sólido contendo o efluente, ensaio de biorremediação em sistema submerso avaliando a influência das fontes de carbono (glicose), e nitrogênio (nitrato de amônia) e pH inicial de cultivo sobre a capacidade de remoção de DQO, cor e fenólicos totais.

4.1 Caracterização do efluente

O efluente foi fornecido por uma empresa produtora de laminados localizada no Sudoeste do Paraná. O efluente foi mantido sob refrigeração em geladeira até uso.

4.1.2 pH

As leituras do potencial hidrogeniônico (pH) foram realizadas utilizando potenciômetro digital de bancada calibrado com soluções de pH 4,0 e 7,0 (APHA, 2005).

4.2.2 Condutividade

As leituras da condutividade foram realizadas utilizando condutivímetro digital de bancada calibrado com soluções padrão de $146,9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (APHA, 2005).

4.1.3 Cor

A cor foi determinada de acordo com metodologia padrão CPPA (1975). Em todas as determinações, as amostras foram previamente centrifugadas por 15 min a 3.000 rpm e o pH ajustado para 7,6 com tampão fosfato $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. A absorbância da solução no espectro visível foi determinada em 465 nm, empregando como branco

água destilada. Os valores de absorvância foram transformados em unidades de cor (UC) de acordo com a Equação 1:

$$UC = 500 (A_2/A_1). \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

A_1 = absorvância de uma solução padrão de platina-cobalto de 500 UC ($A_{465} = 0,132$);

A_2 = absorvância do efluente, medida em 465 nm.

4.1.4 Turbidez

A turbidez da amostra foi determinada em turbidímetro digital Q279P (Quimis, Diadema, SP, Brasil) de bancada calibrado com soluções padrões.

4.1.5 Série de Sólidos

Na série de sólidos foram analisados, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos totais, sólidos totais e de cinzas ou compostos minerais, por gravimetria e os procedimentos estão descritos a seguir.

4.1.5.1 Determinação de sólidos suspensos

Uma alíquota de 100,0 mL do efluente foi filtrado em um papel filtro qualitativo de massa conhecida, e posteriormente seco em estufa a 105 °C até massa constante (APHA, 2005).

4.1.5.2 Determinação de sólidos dissolvidos totais

O filtrado que foi obtido na determinação de sólidos suspensos, foi seco a 105 °C em estufa. Posteriormente a amostra resfriada em dessecador por 2 horas e pesada até massa constante (APHA, 2005).

4.1.5.3 Determinação de sólidos totais

Uma alíquota de 100,0 mL do efluente foi transferido para béquer previamente tarado, e seco em estufa a 105 °C. Posteriormente a amostra foi resfriada em dessecador por 2 horas e pesado (APHA, 2005).

4.1.5.4 Determinação de cinzas (ou resíduo mineral)

Uma alíquota do efluente foi acondicionada em cadinho de porcelana previamente calcinado e tarado. Em seguida o cadinho foi levado ao aquecimento até eliminação de parte da água, sendo posteriormente levado a mufla por 4 horas a 550 °C (APHA, 2005).

4.1.6 Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A demanda química de oxigênio (DQO) foi feita com base no método 5220 D. Foram adicionados 3,0 mL do efluente diluído e 1,5 mL de solução digestora (10,12 g de dicromato de potássio; 33,3 g de sulfato de mercúrio II; 167,0 mL de H₂SO₄, completando para 1000,0 mL com água destilada) e 3,5 mL de solução catalítica (na proporção de 5,5 g de AgSO₄, por kg de H₂SO₄ concentrado) em tubos de ensaio. Os tubos foram mantidos a 150 °C por 2 horas em bloco digestor, após resfriamento foram feitas leituras de absorbância no comprimento de onda de 600 nm. O valor da demanda de O₂ (mg L⁻¹) foi obtido por meio de interpolação dos resultados em curva de calibração utilizando biftalato de potássio como padrão.

4.1.7 Determinação de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅)

A análise de DBO₅ foi realizada em um laboratório terceirado, seguindo os métodos 5220-D e 5210 B (SMWW, 23^a Edição), respectivamente, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

4.1.8 Razão de Biodegradabilidade (DBO₅/DQO)

A razão de biodegradabilidade foi obtida pela divisão do valor da demanda bioquímica (DBO₅) de oxigênio e a demanda química de oxigênio (DQO) do efluente.

4.1.9 Fenóis Totais

A determinação da concentração de fenóis totais foi conduzida colorimetricamente por meio do procedimento de Folin-Ciocalteu (Merck) (APHA, 2005).

O método espectroscópico Folin-Ciocalteu é amplamente utilizado para quantificar fenólicos totais, fundamentando-se na redução dos ácidos fosfomolibdico-fosfotungstíco pelas hidroxilas fenólicas. Esse processo resulta na formação de óxidos azuis de tungstênio (W₈O₂₃) e molibdênio (Mo₈O₂₃), um complexo que apresenta absorção máxima em $\lambda = 740$ nm. A reação é realizada em meio alcalino, sendo o carbonato de sódio (Na₂CO₃) a base mais apropriada.

Para a análise, 0,5 mL do efluente foi adicionado a tubos de ensaio, seguido por 2,5 mL do reagente Folin-Ciocalteu a 10% e 2,0 mL de carbonato de sódio a 4%. Posteriormente, a solução foi deixada em repouso protegida da luz por um período de 2 horas. Em seguida, a absorbância foi medida em um espectrofotômetro a 740 nm, utilizando água como branco. Os resultados foram calculados com base na equação de calibração derivada de uma curva padrão estabelecida com ácido gálico. Os valores obtidos foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico (EAG) por 100,0 mL de amostra.

4.1.10 Série Nitrogenada

Na série nitrogenada foram determinados os conteúdos de nitratos, nitritos e nitrogênio total pelo método Kjeldahl. As quantificações de nitrogênio total, nitrito e nitrato seguirão os protocolos da American Public Health Association (APHA, 2005) e será conduzida no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UTFPR - Pato Branco (LabSolos).

4.1.11 Lignina insolúvel

A determinação da lignina foi conduzida conforme o método Klason (HEINZ, 2017). Uma amostra de 0,3 g de efluente liofilizado foi transferida para um béquer e tratada com 5,0 mL de H₂SO₄ a 72%, sob agitação vigorosa, em um banho termostatizado a 45 °C por 7 minutos. Posteriormente, a reação foi interrompida com a adição de 79,0 mL de água destilada.

A solução resultante foi transferida para um Erlenmeyer de 250 mL e submetida a autoclavagem a 110 °C, por 30 minutos, a uma pressão de 1,05 bar, visando a completa hidrólise dos oligômeros remanescentes. Após essa etapa, a mistura reacional será filtrada, e o hidrolisado obtido foi transferido e diluído em um balão volumétrico de 100,0 mL com água destilada, sendo então armazenado para análises posteriores.

Os sólidos retidos no papel de filtro, devidamente tarado, serão lavados com cerca de 2 L de água destilada e posteriormente secados em estufa a uma temperatura de 105 ± 3 °C até alcançarem massa constante.

4.1.12 Lignina solúvel

A quantificação da lignina Klason Solúvel seguiu o protocolo estabelecido por HEINZ, (2017). Para tal, uma porção de 5,0 mL do hidrolisado, foi submetida a alcalinização com NaOH (6,5 mol L⁻¹) até atingir um pH de 12,5. Posteriormente, essa solução será diluída em água destilada em um balão volumétrico de 100 mL.

A leitura da absorvância foi realizada a 280 nm, utilizando a solução de NaOH (6,5 mol L⁻¹) como branco de referência. A concentração de lignina solúvel será determinada por meio da Equação 2:

$$[\text{Lig}] = (41,87 \cdot \text{Abs}_{280} - 0,3279)10^{-3} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

[Lig] = Concentração de lignina no hidrolisado

Abs₂₈₀ = Absorvância a 280 nm

4.1.13 Espectroscopia UV-Visível (UV-Vis)

As análises espectroscópicas foram realizadas utilizando espectrofotômetro Thermo Scientific modelo Evolution 60S – UV – Visible Spectrophotometer, utilizando cubetas de quartzo com 1 cm de caminho óptico. Água foi utilizada como branco e a varredura será realizada na faixa de 200 – 800 nm. O efluente foi previamente centrifugado (15 minutos a 3.000 rpm) e o pH ajustado para 7,6 com ácido sulfúrico e será diluído para se adaptar a faixa de leitura do equipamento.

4.1.14 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

Uma alíquota do efluente bruto foi previamente liofilizada e mantida em dessecador até o momento da análise. Os espectros de infravermelho foram obtidos em espectrofotômetro Perkin-Elmer, modelo FT-IR da Frontier (USA). Para obtenção dos espectros foram preparadas pastilhas de KBr contendo 1% de amostra (compactadas a 8-10 kgf cm⁻¹). Os espectros serão obtidos na região de 4.000 a 400 cm⁻¹, com 32 acumulações e resolução de 2 cm⁻¹.

4.1.15 Fungo: Manutenção e Preparo do Inóculo

O fungo *Trichoderma koningiopsis* CCT 4288 será utilizado nos ensaios de biorremediação. O fungo foi mantido em meio ágar sabourad sobre refrigeração e repiques sucessivos (trimestrais).

Para o preparo do inóculo a cepa fúngica foi ativada por repique para tubos de ensaios contendo meio ágar sabourad com cloranfenicol. Os tubos foram incubados em estufa bacteriológica à 28 °C por 96 horas. Após um segundo repique e cultivo nas mesmas condições os micélios crescidos na superfície do meio foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 100 mL de meio mínimo de Vogel (VOGEL, 1956) e glicose (10,0 g L⁻¹), sendo cultivados por 72 horas a 25 °C sob agitação (150 rpm).

A pré-cultura foi homogeneizada assepticamente em mixer por 30 segundos. Ao homogeneizado de células foi adicionada água destilada esterilizada para originar uma solução padrão com absorbância entre 0,4 e 0,5 a 400 nm.

4.2 Ensaios de biorremediação

4.2.1 Estudo de Crescimento Radial

Este ensaio permite avaliar a toxicidade aguda do efluente para o fungo relacionando o diâmetro de crescimento do micélio fúngico em placas de petri com o tempo, este ensaio foi realizado inicialmente com a pretensão de verificar o fungo *Trichoderma koningiopsis* como biorremediador do efluente da indústria de laminados de madeira.

Em vista disso, utilizou-se efluente bruto diluído com Ágar Sabourad com cloranfenicol 50% (V/V), como teste inicial de toxicidade aguda. No centro foi inserido um disco de 01 cm de diâmetro contendo micélio fúngico previamente cultivado em placas contendo Ágar Sabourad com Cloranfenicol 28 °C por 96 horas. Após as placas contendo micélio fúngico e meio foram cultivadas por 144 horas a 28 °C em estufa. A cada 24 horas foram realizadas medições do raio micelial com paquímetro analógico.

4.2.2 Tratamento em Sistema Submerso

A necessidade de suplementação do efluente com fontes de carbono e nitrogênio foi avaliada seguindo um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2³. As variáveis independentes a serem estudadas são: Concentração de sacarose, concentração de nitrato de amônio e pH inicial de cultivo (Tabela 3). Como variáveis resposta foi considerado: Remoção de DQO, remoção de fenólicos totais e cor.

Tabela 3 – Delineamento Composto Central 2³

Ensaio	Variáveis Independentes		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

Variáveis	Nível codificado e valores reais				
	-1,68	-1	0	1	1,68
pH inicial (X ₁)	4,6	5	5,5	6	6,3
Glicose (g L ⁻¹) (X ₂)	0	3	7,5	12	15
Nitrato de amônio (g L ⁻¹) (X ₃)	0	1	2,5	4	5

Fonte: Autoria Própria (2024).

As fermentações serão conduzidas em frascos agitados de 250 mL contendo 100 mL de meio de cultivo e 10 mL de inóculo padronizado (item 4.1.15). O meio de

cultivo será constituído pelo efluente bruto com pH previamente ajustado e suplementado com as fontes de carbono e nitrogênio, seguindo valores de pH inicial e concentrações descritas no delineamento experimental. Os frascos serão mantidos em incubador orbital Shaker a 25 °C, 150 RPM de agitação por 10 dias.

Os resultados serão analisados por análise de variância (ANOVA). A homoscedasticidade da variância será checada pelo teste de Levene e a distribuição normal dos resultados será testada pelo teste de Shapiro-Wilk, considerando nível de significância de 10%.

Após o delineamento (biorremediação), a biomassa será filtrada em filtros previamente secos e posteriormente seca em estufa a temperatura de 70°C por 24 horas, após será pesada novamente para o cálculo da biomassa seca.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do efluente

Os dados de caracterização do efluente industrial estão demonstrados na Tabela 5, assim como os limites legais de lançamento segundo as resoluções 357/2005, complementada e alterada pela resolução 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2011). O alto potencial de poluição do efluente é claramente demonstrado, uma vez que os valores dos parâmetros físico-químicos avaliados excedem os limites permitidos pela legislação brasileira.

Tabela 5 - Caracterização do Efluente Bruto

Parâmetros analisados	Efluente Bruto	Legislação
pH	4,2	5 a 9
Cor	114.015,15 UC	N/A
Turbidez	60,5 NTU	N/A
Condutividade	17,31 mS cm ⁻¹ 25°C	N/A
Fenóis Totais	9.000,09 mg L ⁻¹	0,5 mg L ⁻¹
Nitrogênio Total	290,88 mg L ⁻¹	N/A
Nitratos	285 mg L ⁻¹	N/A
Nitritos	13 mg L ⁻¹	N/A
DQO	137.812,50 mgO ₂ L ⁻¹	300 mgO ₂ L ⁻¹
DBO ₅	68.737,62 mgO ₂ L ⁻¹	50 mgO ₂ L ⁻¹
DBO ₅ /DQO	0,50	N/A
Lignina solúvel Klason	1360 mg L ⁻¹	N/A
Lignina Insolúvel Klason	49 mg L ⁻¹	N/A
Sólidos Suspensos	12,53 g L ⁻¹	N/A
Sólidos Totais	117 g L ⁻¹	N/A
Cinzas	26,6 g L ⁻¹	N/A

Fonte: Autoria própria (2023).

***Valores estabelecidos pela legislação (CONAMA 430/2011).**

N/A: Não aplicável.

Figura 7 – Aspecto visual do efluente bruto da indústria de compensado de madeira



Fonte: A autoria própria, (2024).

Conforme verificado na Tabela 5 e Figura 7 o efluente bruto apresentou pH ácido (4,2), coloração intensa (114.115,15 UC), e elevada turbidez (60,5 NTU). O pH do efluente está em desacordo com a legislação brasileira vigente a qual preconiza valores de 5 a 9. Efluentes com coloração intensa e elevada turbidez podem causar danos aos corpos hídricos receptores, necessitando, portanto, de tratamentos prévios. Valores inferiores (8.333,0 UC) de cor foram reportados por Heinz *et al.* (2019). Cabe destacar que efluentes coletados na mesma empresa, podem apresentar parâmetros físico-químicos diferentes quando coletados em diferentes períodos.

A condutividade é uma medida do fluxo de elétrons que é facilitado através da presença de íons no efluente e em efluentes líquidos, reflete a concentração total de íons dissolvidos. Embora os elétrons possam estar envolvidos em algumas situações específicas nos processos de tratamento de efluentes, a condutividade no efluente se deve principalmente ao movimento dos íons, e não dos próprios elétrons (<The Importance Of Electrical Conductivity Of Wastewater=, 2022; LEVLIN, 2010). O efluente apresentou uma condutividade relativamente baixa (17,31 mS cm⁻¹ a 25°C), embora bastante superior ao reportado por Heinz, *et al.* (2016). Tal resultado sugere que o efluente não apresenta elevadas concentrações de íons e sais dissolvidos. Altos valores de condutividade afetam os sistemas de transporte de compostos químicos através da parede celular microbiana, resultando em mudanças no metabolismo e efeitos inibitórios (DAN; VISVANATHAN; BASU, 2003; LOMBARDI E FURLEY, 2015).

O efluente demonstrou ser rico em compostos fenólicos, sendo verificado uma concentração de 9.000,1 mg L⁻¹ superior ao permitido pela legislação (0,5 mg L⁻¹). O conteúdo de fenóis totais, bem como a presença de cor, pode ser atribuído à presença de lignina e seus derivados, além de possíveis extrativos da madeira que foram transportados pelo vapor no momento do cozimento. Heinz *et al.* (2019) verificaram valores de 1.220 mg L⁻¹ em efluente similar. Por outro lado, valores inferiores foram reportados por Barreto-Rodrigues, Aguiar, Cunha, (2009), os quais encontraram um conteúdo de 358 mg L⁻¹ de fenólicos totais.

Os teores de nitritos e nitratos encontrados foram 13 mg L⁻¹ e 285 mg L⁻¹, o que pode desencadear o processo de eutrofização nos corpos hídricos de despejo, além de interferir na passagem de luz e temperatura. O teor de nitrogênio total foi de 290,88 mg L⁻¹ e corresponde a soma do nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico. Cabe destacar que a presença de nitrogênio assimilável em efluentes pode contribuir como nutriente (fonte de nitrogênio) em processos biológicos de remediação.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) encontrada no efluente foi de 137.812,50 mgO₂L⁻¹ e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) de 68.737,62 mgO₂ L⁻¹. Estes resultados confirmam o elevado potencial poluidor do efluente estudado, mesmo ele apresentando uma relação DBO₅/DQO de 0,5, a qual indica queo mesmo é parcialmente biodegradável (DÍAZ *et al.* 2022). A relação DBO₅/DQO expressa a biodegradabilidade de efluentes e é utilizada como marcador na definição dos procedimentos de tratamento. Se a relação for superior a 0,60 o efluente deverá ser facilmente biodegradável e se esta relação for inferior a 0,30 o efluente não será biodegradável ou será lentamente biodegradado (HEINZ *et al.*, 2016; JOUANNEAU *et al.*2014).

A presença de lignina foi detectada no efluente, sendo encontrados conteúdos de 1360 mg L⁻¹ e 49 mg L⁻¹ de lignina Klason solúvel e insolúvel, respectivamente. Os elevados teores de lignina presentes no efluente podem justificar, os elevados valores de cor e turbidez do efluente. Os resultados obtidos para a série de sólidos indicaram que os sólidos totais presentes foram constituídos de 22,73% de material inorgânico e 77,26% de material orgânico. Embora a maior parte de conteúdo de sólidos totais presentes no efluente correspondem a material orgânico, verifica-se uma elevada concentração de material inorgânico, possivelmente oriundo do uso de sais empregados em alguma etapa do processo ou possivelmente por elevada dureza da água de cozimento das toras.

5.1.2 Perfil espectroscópico do efluente bruto na região do infravermelho

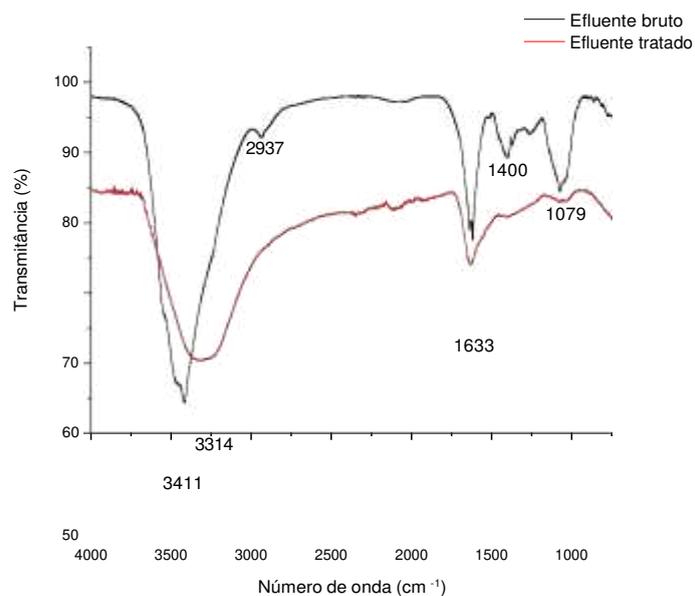
O espectro de infravermelho com transformada de Fourier do efluente bruto e tratado após o delineamento experimental, (biorremediação) (Figura 8) mostra uma banda intensa em 3.411 cm^{-1} atribuída a vibrações de estiramento de ligações O-H, oriundas possivelmente de grupos aromáticos, corroborando com a composição majoritária do efluente, tendo em vista que soluções de lignina e licor negro, mostram bandas de absorções entre 3.540 cm^{-1} e 3.400 cm^{-1} (TIAN, Z., *et al*, 2015). A banda de baixa intensidade em 2.937 cm^{-1} foi atribuída à vibrações de estiramento (C-H) dos grupos metil e metoxilas aromáticas presentes na estrutura da lignina. Bandas como estas foram visualizadas em espectros de soluções de lignina acidificadas e carbonatadas, além de serem indicados como picos que caracterizam a celulose (KUMAR; ALÉN; SAHOO, 2016; FARIS *et al*. 2015; HAO, Y. *et al*, 2018).

Os anéis aromáticos, estruturas presentes na molécula da lignina, podem ser evidenciados nos picos de média e baixa intensidades, respectivamente, em 1.633 cm^{-1} e em 1.400 cm^{-1} que são característicos de vibrações entre carbonos C=C no esqueleto do anel aromático da lignina, por vezes atribuídos aos monômeros guaiacil ou siringil da lignina (ZHOU, X., *et al*. 2019; DO *et al*. 2020; REYES-RIVERA; TERRAZAS, 2017). Já o pico de média intensidade em 1.079 cm^{-1} foi atribuído às vibrações de estiramento das ligações C-O e podem corresponder a absorções em moléculas residuais de celulose e hemicelulose. Além disso, picos entre 1.072 e 1.076 foram identificados como vibrações nos grupos de álcoois primários e secundários. (REYES-RIVERA; TERRAZAS, 2017; PIQUERAS *et al*. 2020).

Percebe-se clara redução e deslocamento nas bandas de absorção O-H, demonstrando que as vibrações de estiramento de ligações O-H, oriundas possivelmente de grupos aromáticos sofreram degradação e/ou adsorção micelial. A banda em 2937 cm^{-1} sofreu uma redução intensa no efluente tratado, sugerindo que o microrganismo conseguiu utilizar a celulose como substrato, diminuindo suas concentrações significativamente no meio. Assim como nas bandas em 1400 cm^{-1} o que denota a eficiência do fungo em degradar a lignina utilizando como substrato (fonte de carbono), seus monômeros (álcool sinapílico, álcool coniferílico e álcool p-cumarílico) e os grupos guaiacil e siringil. As reduções de transmitância nas bandas

1633 cm^{-1} e 1079 cm^{-1} corroboram com os estudos de que o *T. koningiopsis* foi capaz de degradar tais substâncias.

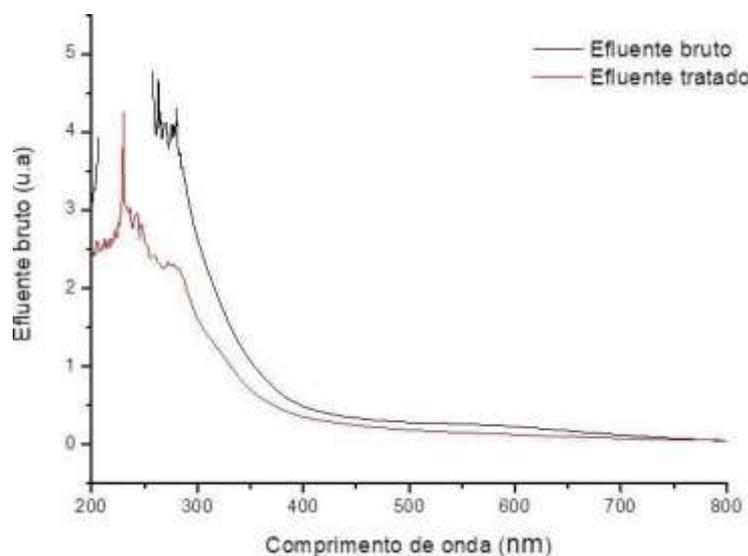
Figura 8 - Espectro de infravermelho com transformada de Fourier



Fonte: Autoria própria (2024).

5.1.3 Varredura UV-VIS

A Figura 9, mostra os espectros de varredura do efluente bruto e após tratamento biológico derivado do delineamento experimental na região UV-Vísivel. Nota-se uma banda de máxima absorção em torno de 280 nm, típico da lignina (HEINZ, *et al.* 2016). Esta banda de absorção também pode estar relacionada a presença de compostos como furfural e hidroximetilfurfural oriundos da degradação de açúcares provenientes de polissacarídeos presentes na madeira. Nítida redução de intensidade nesta banda de absorção foi verificado após biorremediação. Esta redução de absorção indica que houve remoção de grupos cromóforos, em função de possível degradação enzimática e/ou adsorção micelial. De fato, tem sido demonstrado que o fungo *T. koningiopsis* é hábil produtor de polifenoloxidasas envolvidas em processos de degradação de biomassa celulósica (CASTRILLO *et al.* 2015).

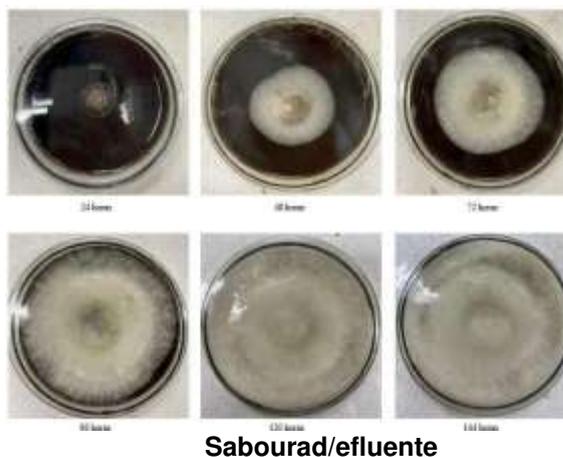
Figura 9 - Espectros de varredura do efluente bruto e tratado.

Fonte: Autoria própria, (2024).

5.2 Crescimento radial do micélio fúngico

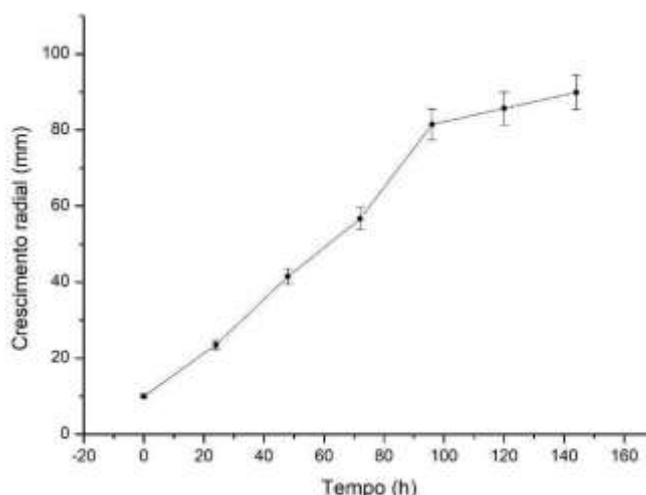
As Figuras 10 e 11 mostram o crescimento radial do fungo *Trichoderma koningiopsis* em meio ágar Sabourad/cloranfenicol e efluente (50%, v/v), ao longo de seis dias. O fungo foi capaz de crescer em toda a superfície do meio com uma velocidade média de crescimento micelial de 0,75 mm/h. Essa elevada velocidade de crescimento micelial indicou que o fungo é capaz de superar a toxicidade biológica do efluente. Heinz (2016), reportou uma menor taxa de crescimento micelial (0,26mm/dia) do fungo *Pleorotus ostreatus* cultivado em condições similares. Corroborando com isso, fungos lignocelulolíticos têm sido amplamente usados para a degradação deste tipo de efluente devido a sua facilidade em secretar enzimas que auxiliam na degradação de compostos como a lignina e a celulose (MARLENE, *et al.* 2021).

Figura 10 - Crescimento micelial do fungo *Trichoderma koningiopsis* em meio ágar



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Gráfico de crescimento micelial do *Trichoderma Koningiopsis*



Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 Delineamento experimental (DCCR 2³)

Os resultados de remoção de DQO, remoção de fenólicos totais e remoção de cor obtidos nos ensaios experimentais conduzidos segundo o Delineamento Composto Central Rotacional - 23, estão descritos na Tabela 6.

O fungo foi hábil em crescer em todas as condições de cultivo. Os percentuais de remoção de DQO variaram de 61,72% (ensaio 1) a 88,77% (ensaio 11), enquanto o percentual de remoção de fenólicos totais variou de 57,4% (ensaio 15) a 84,51%

(ensaio 4). Interessante destacar que as condições experimentais consideradas como ponto central no delineamento experimental contribuíram para maior crescimento micelial, no entanto não promoveram a efetiva remoção de cor do efluente (22,13% – 22,61%) (Tabela 7). Uma avaliação pontual do ensaio 8 sugere que o uso de maiores concentrações de glicose e nitrato de amônio associado ao pH 6 contribui para melhores resultados de DQO, fenólicos totais e cor. Chamam a atenção os pontos 9, 11 e 13, pois mesmo possuindo valores abaixo do ensaio 8, são economicamente interessantes do ponto de vista industrial, visando menor consumo de reagentes.

Tabela 6 – Delineamento Composto Central 2³

Ensaio	Variáveis Independentes			Valores obtidos		
	X ₁	X ₂	X ₃	% R. DQO*	% R. FT*	% R. COR*
1	-1	-1	-1	61,72	61,22	36,39
2	-1	-1	1	80,05	81,17	75,00
3	-1	1	-1	76,42	75,78	51,85
4	-1	1	1	77,69	84,51	76,94
5	1	-1	-1	72,61	75,96	41,30
6	1	-1	1	76,24	79,66	46,30
7	1	1	-1	72,06	71,05	50,09
8	1	1	1	87,48	82,75	94,95
9	-1,68	0	0	78,41	67,95	59,35
10	1,68	0	0	80,41	69,59	46,02
11	0	-1,68	0	88,57	63,46	43,43
12	0	1,68	0	65,53	67,83	52,50
13	0	0	-1,68	68,44	61,89	47,87
14	0	0	1,68	80,41	65,10	44,26
15	0	0	0	73,33	57,40	22,61
16	0	0	0	74,06	58,67	22,13
17	0	0	0	73,69	58,03	22,37

Variáveis	Nível codificado e valores reais					
		-1,68	-1	0	1	1,68
pH inicial (X ₁)		4,6	5	5,5	6	6,3
Glicose (g L ⁻¹) (X ₂)		0	3	7,5	12	15
Nitrato de amônio (g L ⁻¹) (X ₃)		0	1	2,5	4	5

Fonte: Autoria Própria (2024).

***Percentual de redução de DQO, Fenólicos Totais e cor.**

Tabela 8 – Biomassa seca após ensaio de biorremediação

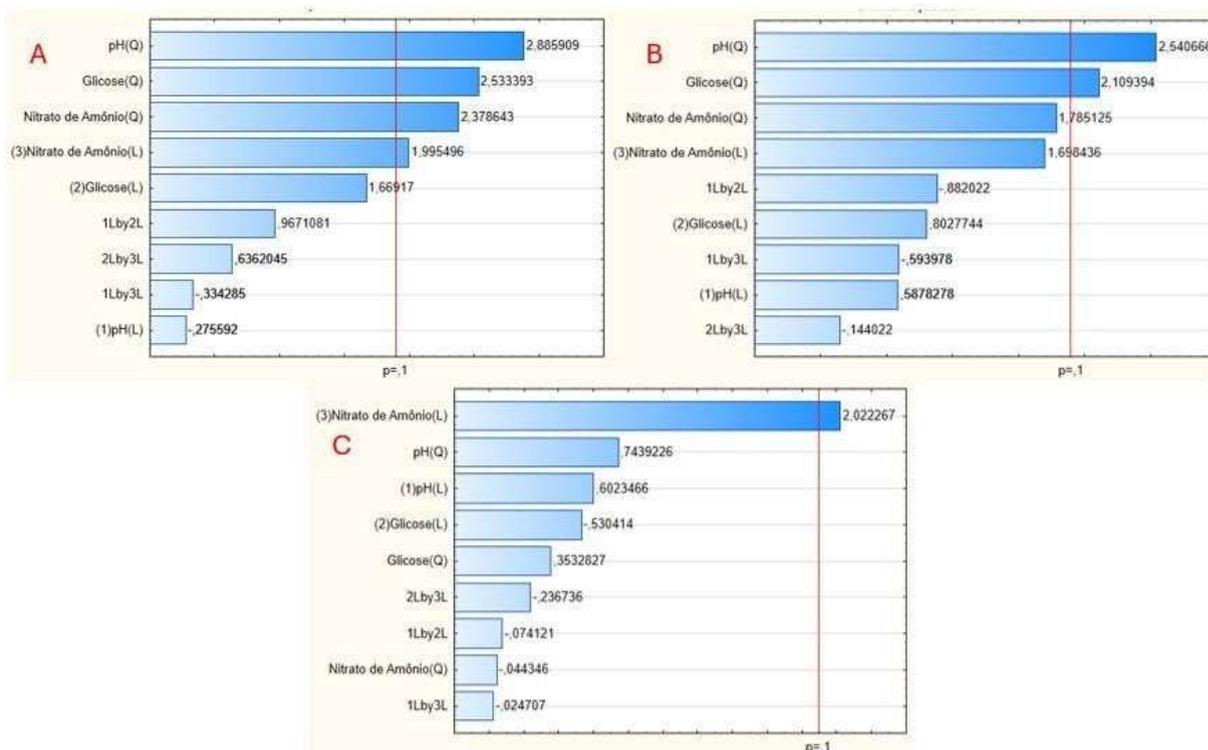
Ensaio	Biomassa seca (g)	Ensaio	Biomassa seca (g)
1	4,76	10	4,47
2	2,31	11	4,24
3	3,79	12	4,50
4	2,45	13	4,28
5	4,32	14	4,59
6	3,89	15	5,17
7	3,52	16	5,27
8	4,34	17	5,22
9	4,37	-	-

Fonte: Autoria própria, (2024).

Para uma melhor visualização dos efeitos principais de primeira e segunda ordem, bem como possíveis interações entre as variáveis, foram construídos diagramas de Pareto ($p=0,10$).

Conforme pode ser verificado na Figura 12 A, ambas as variáveis estudadas apresentaram efeitos positivos (efeito quadrático) estatisticamente significativos ao nível de 90% de confiança ($p < 0,1$) sobre a remoção de cor. A variável nitrato de amônio também mostrou efeito linear positivo ($p < 0,1$). Estes resultados indicam que o uso de maiores concentrações de fonte de carbono e nitrogênio associada a um pH de cultivo mais próximo a neutralidade tende a promover maior remoção de cor. Glicose e pH do meio de cultivo também influenciaram positivamente (efeito quadrático) a remoção de fenólicos totais (Figura 12 B). Com relação a remoção de DQO apenas a variável nitrato de amônio demonstrou influência (efeito linear positivo).

Figura 12 – Diagrama de Pareto de Cor (A), Fenólicos Totais (B) e DQO (C).



Fonte: Autoria própria, (2024).

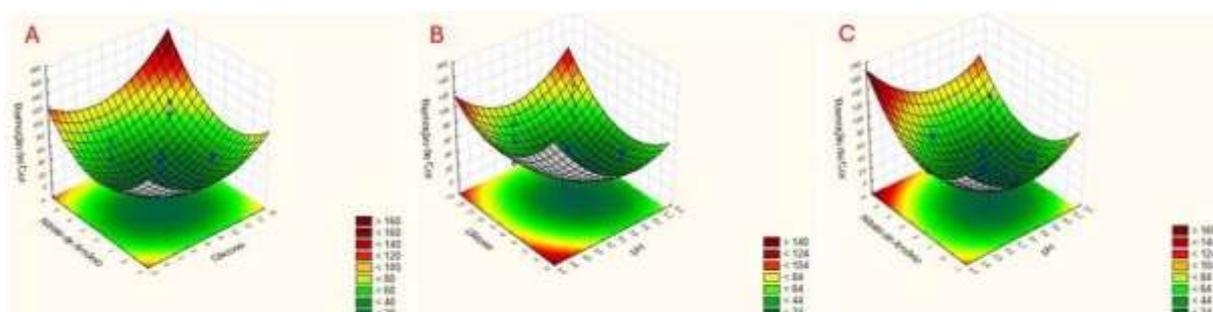
Os modelos matemáticos que representam a remoção de cor, remoção de fenólicos e remoção de DQO, descritos pelas superfícies de respostas mostradas nas Figuras 13 A, 13 B e 13 C, respectivamente, estão representadas abaixo:

$$\text{Remoção de cor (\%)} = 1623,70 + 49,082X_1^2 + 0,553X_2^2 - 9,046X_3 \quad (\text{Equação 4})$$

$$\text{Remoção de fenólicos totais (\%)} = 689,54 + 23,33X_1^2 + 0,249X_2^2 \quad (\text{Equação 5})$$

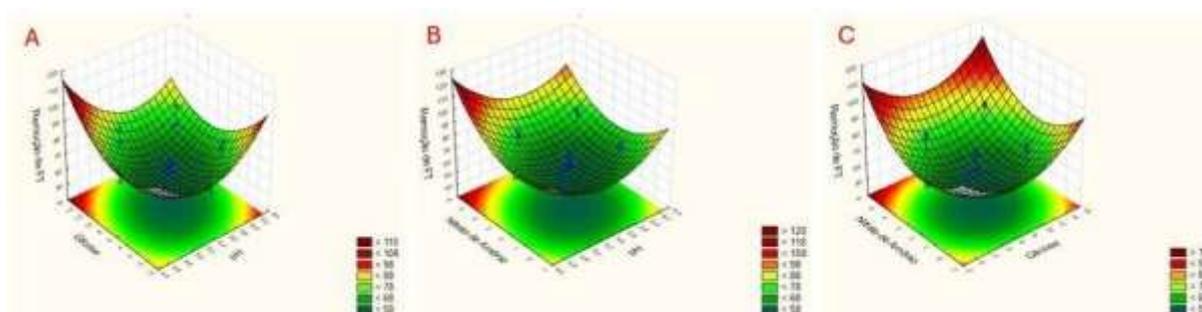
$$\text{Remoção de DQO (\%)} = 255,27 + 4,35X_3 \quad (\text{Equação 6})$$

Figura 13 – Gráficos de superfície para remoção de cor



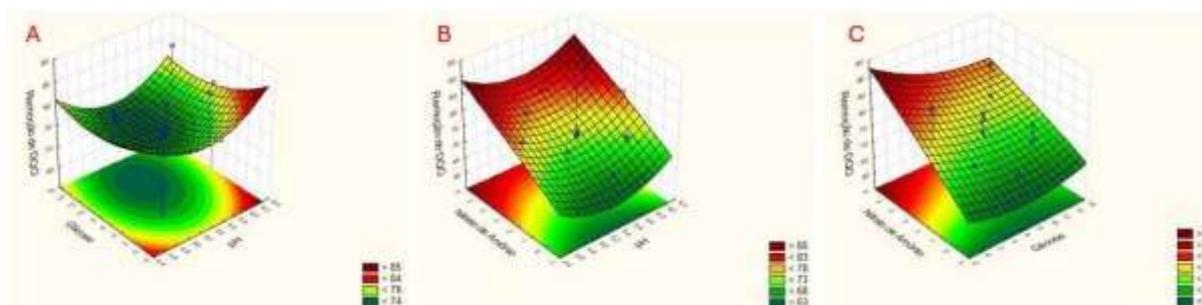
Fonte: Autoria própria, (2024).

Figura 14 – Gráficos de superfície para remoção de Fenólicos Totais.



Fonte: Autoria própria, (2024).

Figura 15- Gráficos de superfície para remoção de DQO.



Fonte: Autoria própria, (2024).

O modelo matemático relativo à remoção de cor Figura 13 não foi significativo em um intervalo de confiança de 90% ($p < 10$) (Equação 1). O valor F calculado foi 2,48 e o F tabelado foi 2,73, sendo um modelo não preditivo, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,77467. Da mesma forma os demais modelos não demonstraram ser preditivos em um intervalo de confiança de 90% ($p < 10$). Os valores F calculado dos modelos relativos a remoção de fenólicos totais e DQO foram 1,55 e 0,59 respectivamente.

Embora os modelos matemáticos obtidos não tenham apresentado pungência estatística, avaliações univariadas dos resultados dos ensaios do delineamento (DCCR 2³) permitem inferir a influência de cada variada estudada nas respostas. Avaliando conjuntamente os resultados de remoção de cor, fenólicos totais e DQO percebe-se que o ensaio 8 permitiu uma melhor biorremediação do efluente.

6.0 CONCLUSÃO

O efluente analisado, proveniente da indústria de fabricação de laminados, demonstrou ser altamente poluente devido à presença significativa de compostos fenólicos, turbidez e coloração. Os valores de pH, fenólicos totais, DBO₅ e DQO excedem os limites permitidos pela legislação brasileira para descarte em corpos receptores. A relação entre DBO₅/DQO observada indica que o efluente é suscetível à biodegradação, sugerindo que tratamentos biológicos podem ser eficazes.

O fungo *Trichoderma koningiopsis*, demonstrou crescimento em meio ao efluente, além de capacidade de redução da cor, compostos fenólicos e DQO. Isso sugere que ele possui potencial para ser utilizado em processos de biorremediação do efluente estudado. O estudo do processo de biorremediação conduzido com auxílio de planejamento experimental demonstrou a necessidade de suplementação do efluente com fontes de carbono (glicose) e nitrogênio (nitrato de amônio) para melhor desintoxicação do efluente. Valores de pH de cultivo próximos a 5,5 demonstraram contribuir para maior crescimento de biomassa celular e no pH 6 foram obtidos os melhores resultados de remoção de cor, fenólicos e DQO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, G., BHATTACHARYYA, KG. **Impacto dos efluentes e resíduos sólidos das fábricas de celulose e papel nas propriedades mineralógicas e físico-químicas do solo.** *Environ Monit Avaliação* 187, 98 (2015).

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examinations for Water and Wastewater.** Whashington, D.C: 21th Centennial Edition, 2005.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 430/11.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, SEMA, 2011.

BUGG, T. D. H. *et al.* **Pathways for degradation of lignin in bacteria and fungi.** *Natural Product Reports*, v. 28, n. 12, p. 1883, 2011.

CARVALHO JR., J. A. *et al.* **CO₂ and CO emission rates from three forest fire controlled experiments in Western Amazonia.** *Atmospheric Environment*, v. 135, p. 73–83, jun. 2016.

CASTRILLO, M. *et al.* **Evaluation of Synthetic and Semi- synthetic Culture Media for Endo-1,4- β - Glucanases Secretion by *Trichoderma koningiopsis*.** *Procedia materials science*, v. 8, p. 786–792, 1 jan. 2015.

CHANG, Y. *et al.* **Textile Dye Biodecolorization by Manganese Peroxidase: A Review.** *Molecules*, v. 26, n. 15, p. 4403, 21 jul. 2021.

COHEN, R.; PERSKY, L.; HADAR, Y. **Biotechnological applications and potential of wood degrading mushrooms of the genus *Pleurotus* Applied.** *Microbiology and Biotechnology*, 2002.

DE, J. et al. **Microbial plant material–degrading enzymes**. Elsevier eBooks, p. 79–120, 1 jan. 2023.

DE QUEIROZ BAPTISTA, N. M.; DOS SANTOS, A. C.; ARRUDA, F. V. F.; DE GUSMÃO, N. B. **Produção das Enzimas Lignina Peroxidase e Lacase por Fungos Filamentosos**. Scientia Plena, [S. l.], v. 8, n. 1, 2012.

DÍAZ, A. I. *et al.* **Treatment of kraft black liquor using basidiomycete and ascomycete fungi**. Process Safety and Environmental Protection, v. 168, p. 67–76, dez. 2022.

DO, N. H. *et al.* The novel method to reduce the silica content in lignin recovered from black liquor originating from rice straw. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, dez. 2020.

FARIS, A. H. *et al.* Preparation and Characterization of Lignin Polyols from the Residues of Oil Palm Empty Fruit Bunch. **BioResources**, v. 10, n. 4, 15 set. 2015.

FIORENTINO, N. *et al.* **Trichoderma-Based Biostimulants Modulate Rhizosphere Microbial Populations and Improve N Uptake Efficiency, Yield, and Nutritional Quality of Leafy Vegetables**. Frontiers in Plant Science, v. 9, 5 jun. 2018.

HEINZ, O. L. **APLICAÇÃO DO FUNGO DE DEGRADAÇÃO BRANCA Pleurotus ostreatus (EB 016) NA BIORREMEDIAÇÃO DO EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE COMPENSADO**. DISSERTAÇÃO. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

HEINZ, O. L. *et al.* **Combined fungal and photo-oxidative Fenton processes for the treatment of wood-laminate industrial waste effluent**. Journal of Hazardous Materials, v. 379, p. 120790, nov. 2019.

HENRIKSSON, G., CHRISTIERNIN, M., AND AGNEMO, R. (2005). **Monocomponent endoglucanasetreatment increases the reactivity of softwood sulphite dissolving pulp**. J Ind. Microbiol. Biotechnol. V32(5): 211–21

HAO, Y. *et al.* **The Influence of a Thermal Treatment on the Decay Resistance of Wood via FTIR Analysis.** *Advances in materials science and engineering*, v. 2018, p. 1–7, 1 jan. 2018.

JANUSZ, G.; SKWAREK, E.; PAWLIK, A. **Potential of Laccase as a Tool for Biodegradation of Wastewater Micropollutants.** *Water*, v. 15, n. 21, p. 3770, 1 jan. 2023.

KANT BHATIA, S. *et al.* **Molecular biology interventions for activity improvement and production of industrial enzymes.** *Bioresource Technology*, v. 324, p. 124596, mar. 2021.

KUMAR, H.; ALÉN, R.; SAHOO, G. **Characterization of Hardwood Soda-AQ Lignins Precipitated from Black Liquor through Selective Acidification.** *BioResources*, v. 11, n. 4, 3 out. 2016.

KUMAR, V. V. *et al.* **Laccase production by *Pleurotus ostreatus* using cassava waste and its application in remediation of phenolic and polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated lignocellulosic biorefinery wastewater.** *Environmental Pollution*, v. 309, p. 119729, 15 set. 2022.

Levlin, E. **Research and application of new technologies in wastewater treatment and municipal solid waste disposal in Ukraine, Sweden and Poland: Proceedings of a Polish-Swedish-Ukrainian seminar / E. Plaza, , 2010, p. 51-62**

LORITO, M. *et al.* **Translational Research on Trichoderma: From 'Omics to the Field.** *Annual Review of Phytopathology*, v. 48, n. 1, p. 395–417, jul. 2010.

LUPOI, J. S. *et al.* **Recent innovations in analytical methods for the qualitative and quantitative assessment of lignin.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 871–906, set. 2015.

MARCIO BARRETO-RODRIGUES; CAROLINE MOTTA AGUIAR; ALVES, A. **Biotreatment of an effluent from a wood laminate industry using *Lentinula edodes*.** UEC 2019. 30 maio 2009.

MARLENE, C. *et al.* **Production of Hemicellulolytic Enzymes by a Novel *Trichoderma koningiopsis* 20I2A1M and Its Application in the Saccharification**

of Barley Bagasse. Waste and Biomass Valorization, v. 12, n. 11, p. 5949–5958, 15 mar. 2021.

MUSZYŃSKA, B. et al. **Lentinula edodes Mycelium as Effective Agent for Piroxicam Mycoremediation.** Frontiers in Microbiology, v. 10, 21 fev. 2019.

NOGUEIRA, R. F. P. et al. **Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton.** Química Nova, v. 30, n. 2, p. 400–408, abr. 2007.

PIQUERAS, S. et al. **Understanding the Formation of Heartwood in Larch Using Synchrotron Infrared Imaging Combined With Multivariate Analysis and Atomic Force Microscope Infrared Spectroscopy.** v. 10, 3 fev. 2020.

POLA, L. et al. **Characterisation of the wet oxidation of black liquor for its integration in Kraft paper mills.** Chemical Engineering Journal, v. 405, p. 126610–126610, 1 fev. 2021.

REYES-RIVERA, J.; TERRAZAS, T. **Lignin Analysis by HPLC and FTIR.** Methods in molecular biology, p. 193–211, 1 jan. 2017.

RODRIGUES, K. et al. **THE INFLUENCE OF GLUCOSE ON THE PHENOL CONSUMPTION BY ASPERGILLUS NIGER AN 400 IN BATCH REACTORS** Engenharia sanitária ambiental. v. 12, p. 222–228, 2007.

RODRÍGUEZ-COUTO, S. **Industrial and environmental applications of white-rot fungi.** Mycosphere, v. 8, n. 3, p. 456–466, 9 mar. 2017.

SANDRA TÉDDE SANTAELLA et al. **Tratamento de efluentes de refinaria de petróleo em reatores com Aspergillus niger.** Engenharia Sanitaria E Ambiental, v. 14, n. 1, p. 139–148, 1 mar. 2009.

SHIRKAVAND, E. et al. **Combination of fungal and physicochemical processes for lignocellulosic biomass pretreatment - A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 217–234, 2016.

TIAN, Z. *et al.* **Recovery and characterization of lignin from alkaline straw pulping black liquor: As feedstock for bio-oil research.** Journal of Applied Polymer Science, v. 132, n. 25, p. n/a-n/a, 10 mar. 2015.

VU DINH GIAP *et al.* **Purification and characterization of lignin peroxidase from white-rot fungi *Pleurotus pulmonarius* CPG6 and its application in decolorization of synthetic textile dyes.** Journal of general and applied microbiology, v. 68, n. 6, p. 262–269, 1 jan. 2022.

ZHOU, X. *et al.* **Effect of Alkaline Black Liquor Recycling on Alkali Combined with Ozone Pretreatment of Corn Stalk.** Molecules, v. 24, n. 15, p. 2836, 5 ago. 2019.