

Utilização de biomassa lignocelulósica como potencial removedor de Rodamina B

Utilization of lignocellulosic biomass as a potential Rhodamine B remover

DOI:10.34117/bjdv7n7-109

Recebimento dos originais: 06/06/2021

Aceitação para publicação: 06/07/2021

Leticia dos Reis Darcie

Mestre em Engenharia Química. Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG.
Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela, BR 267, Km 533 11999 - Cidade Universitária,
Poços de Caldas/MG, 37715-400
E-mail: leticia_darcie@hotmail.com

Tânia Regina Giraldi

Doutora em Química. Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG.
Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela, BR 267, Km 533 11999 - Cidade Universitária,
Poços de Caldas/MG, 37715-400
E-mail: tania.giraldi@unifal-mg.edu.br

Ana Luiza Alves Faria

Mestre em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos UFSCAR, Brasil.
Endereço: Rodovia Washington Luís km 235 - SP-310 - São Carlos/SP, 13565-905.
E-mail: analuiza95faria@gmail.com

Grazielle Santos Silva Andrade

Doutora em Biotecnologia Industrial. Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG.
Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela, BR 267, Km 533 11999 - Cidade Universitária,
Poços de Caldas/MG, 37715-400
E-mail: grazielle.andrade@unifal-mg.edu.br

Melina Savioli Lopes

Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG.
Endereço: Rodovia José Aurélio Vilela, BR 267, Km 533 11999 - Cidade Universitária,
Poços de Caldas/MG, 37715-400
E-mail: melina.savioli@unifal-mg.edu.br

RESUMO

Dentre os corantes utilizados nas indústrias a rodamina B é o mais comum deles. Por ser altamente tóxico, ameaça o ambiente e a sobrevivência do ser humano, devido às suas aplicações massivas em têxteis, plásticos, couro, tinturaria e papel. Portanto, é de suma importância a missão de eliminar a rodamina B (RB) das águas residuais industriais antes de retornar a natureza. Dentre os métodos de tratamentos para remoção de corante em soluções aquosas este trabalho utilizou o método de adsorção, por ser considerada uma tecnologia de alta eficiência e baixo custo. Foi feita uma adsorção do corante RB em pseudocaule de bananeira (PB) e bagaço de cana-de-açúcar (BC). Neste estudo foi realizado uma caracterização física das amostras de PB e BC e também foi feito um

mapeamento das variáveis que poderiam influenciar o processo de adsorção do corante RB em soluções aquosas. Por meio das caracterizações físicas, verificou-se que as biomassas apresentam aspecto heterogêneo, com feixes lisos de fibras alongadas, com área superficial de $1,14 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ para PB e $0,78 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ para BC. Foi evidenciada a presença dos principais grupos funcionais dos materiais lignocelulósicos, sendo eles, celulose, hemicelulose e lignina e, apesar da baixa estabilidade evidenciada pelo ponto de carga zero, estes materiais apresentam força atrativa para a ligação de íons poluentes devido a estes numerosos e variados grupos funcionais. Os resultados obtidos sugerem que a faixa de condições ótimas de adsorção da Rodamina B empregando as biomassas lignocelulósicas são: dosagem de biomassa de 0,49%, tamanho de partícula de 0,25 mm e pH 4,00 (in natura) da solução de Rodamina B.

Palavras-Chave: Rodamina B, Adsorção, Resíduos Agrícolas Bagaço de Cana-de-Açúcar, Pseudocaule de Banana.

ABSTRACT

Among the dyes used in the industries, rhodamine B is the most common of them. For being highly toxic, it threatens the environment and the human survival, due to its massive applications in textiles, plastics, leather, dyeing and paper. Therefore, is of paramount importance to eliminate rhodamine B (RB) from industrial wastewater before its return to the nature. Among the treatment methods for removing dye from aqueous solutions this work used the adsorption method, for being considered a high efficiency and low-cost technology. An adsorption of the RB was carried out on banana pseudostem (PB) and sugarcane bagasse (BC). In this study, it was carried out a physical characterization of the PB and BC samples and also a mapping of the variables that could influence the rhodamine B adsorption process from aqueous solutions. Through physical characterizations it has been verified that the biomasses have a heterogeneous aspect, with smooth bundles of elongated fibers, with specific surface area of $1,14 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ for PB and $0,78 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ for BC. The presence of the main functional groups of lignocellulosic materials were evidenced, being them cellulose, hemicellulose and lignin and, despite the low stability showed by the point of zero charge, the materials have attractive force for the bonding of pollutant ions due to these numerous and varied functional groups. The results suggested that the range of optimal conditions for the rhodamine B adsorption using the lignocellulosic biomasses are: biomass dosage of 0.49%, particle size of 0.25 mm and rhodamine B solution pH at 4.00 (in natura).

Keywords: Rhodamine B, Adsorption, Agricultural waste Sugarcane Bagasse, Banana Pseudostem.

1 INTRODUÇÃO

Os efluentes das indústrias químicas são lançados no ambiente, causando grave escassez de água e levando a muitas doenças devido aos problemas ambientais decorrentes. Muitos métodos convencionais estão disponíveis para reduzir ou remover esses contaminantes (BAGALI; GOWRISHANKAR; ROY, 2017). O aumento da poluição ambiental causada por corantes tóxicos devido a sua natureza perigosa é motivo

de grande preocupação. Mesmo pequenos traços de corantes não são biodegradáveis e altamente tóxicos, sendo assim, podem trazer danos tanto à humanidade quanto a organismos aquáticos (ARRIEL *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2019).

Os corantes são utilizados para adicionar ou mudar a cor de um substrato ao se conectarem com sua superfície, sendo amplamente utilizados na indústria têxtil, de alimentos, farmacêutica, plásticos, cosméticos, tintas, fotografia e papel (YAGUB *et al.*, 2014). Porém, essas indústrias produzem elevada quantidade de efluentes, e seu despejo em águas subterrâneas e superficiais promove efeitos significativos ao meio ambiente e organismos vivos (PTASZKOWSKA-KONIARZ; GOSCIANSKA; PIETRZAK, 2018). Em especial, a Rodamina B, corante catiônico sintético, promove: toxicidade reprodutiva, neurotoxicidade, toxicidade crônica, alterações cancerogênicas, além de afetar a fotossíntese realizada pelos seres vivos aquáticos. Portanto, é de extrema importância o tratamento desses efluentes industriais antes de serem despejados no meio ambiente (SUN *et al.*, 2018; YAGUB *et al.*, 2014).

A remoção de corantes de águas residuais tem sido um tema muito estudado, vários tratamentos e métodos, foram amplamente investigados (FERNANDES *et al.*, 2019). Os métodos de remoção destes corantes e podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos (GADEKAR; AHAMMED, 2019). Dentre os métodos químicos, encontra-se o processo oxidativo e fotoquímico, característico pela simplicidade de aplicação e por não produzir nenhum lodo, respectivamente. Porém, o processo oxidativo depende de agentes ativantes e no processo fotoquímico subprodutos indesejáveis são produzidos (YAGUB *et al.*, 2014). Já os métodos biológicos abrangem os processos aeróbicos e anaeróbicos. Dentre os métodos físicos, tem-se a filtração por membrana e a adsorção (GADEKAR; AHAMMED, 2019). Entre os métodos propostos, a adsorção é considerada um método promissor para o tratamento dessas águas residuais, pois além de ter alta eficiência, baixo custo e não ser necessário pré-tratamento adicional, os outros métodos possuem restrições em relação a estabilidade do corante a luz e ao calor e também a resistência à oxidação e biodegradação (LIU; REN; CHEN, 2016; ZENG *et al.*, 2018).

O processo de adsorção tem chamado cada vez mais atenção como uma rota efetiva para remediação de águas residuais contaminadas com poluentes orgânicos e inorgânicos. O Processo de adsorção é altamente recomendado e preferido devido ao seu baixo custo, simplicidade, eficiência e facilidade de aplicação. Neste contexto, nos últimos anos, esforços foram feitos para remover corantes tóxicos de águas residuais

usando adsorventes de baixo custo, dos quais os resíduos agrícolas são importantes devido à sua abundância e regeneração (CHEN et al. 2019, ABDELWAHAB et al. 2021).

Resíduos agrícolas possuem estruturas soltas e porosas e contêm grupos funcionais como o grupo carboxila e o grupo hidroxila, portanto, podem ser utilizados como material de adsorção biológica. Como vantagens os resíduos agrícolas estão disponíveis em uma ampla gama de fontes, baixo custo e são renováveis. Tem uma boa perspectiva de utilização integral dos recursos quando utilizados no controle da poluição ambiental (DAI *et al.*, 2018).

Vários são os fatores que influenciam no processo de adsorção, dentre os quais encontram-se a temperatura, área superficial específica do adsorvente, pH da solução e potencial de carga zero. (ALCÂNTARA; IZIDORO; FUNGARO, 2015). Esses fatores interferem diretamente na eficiência de adsorção, sendo crucial sua análise em diferentes condições operacionais para identificar a influência e determinar o valor ótimo de operação. Porém, pelo método experimental convencional, vários experimentos são necessários, com alta demanda de tempo. Podendo ser solucionado pelo uso de planejamento experimental, os quais utilizam recursos limitados para obter informações a respeito do processo (KARRI *et al.*, 2018).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a adsorção da Rodamina B de solução aquosa utilizando como adsorventes o bagaço de cana-de-açúcar e o pseudocaule de bananeira, através da caracterização de cada adsorvente e da realização de ensaios de adsorção utilizando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

BIOSSORVENTES

O potencial de remoção de Rodamina B da água foi estudado usando como bioissorvente duas biomassas lignocelulósicas, o bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e o pseudocaule de banana (*Musa sp.*). As biomassas lignocelulósicas foram obtidas em uma propriedade privada em Tapiratiba, no estado de São Paulo, Brasil.

Os bioissorventes foram pré-secos ao sol por 48 horas e secos a 60 ° C por 24 horas em estufa de laboratório, para remover a umidade e evitar degradação durante o armazenamento. Depois de secos, foram triturados para diminuir o tamanho do material, e posteriormente graduados em peneiras Tyler, para classificação granulométrica a partir da separação em diâmetros médios de 0,44; 0,35; 0,25; 0,15 e 0,06 mm.

CARACTERIZAÇÃO DOS BIOSORVENTES

As caracterizações dos biossorventes realizadas para cada biossorvente foram o ponto de carga zero (pHpzc) para analisar o ponto isoelétrico, a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para determinar cada grupo orgânico característico e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para obter a morfologia da superfície e analisar o potencial de adsorção de cada biomassa.

Os valores de pHpzc foram determinados pelo Método de Adição de Sal adaptado do método Mular-Roberts, que é o método mais utilizado para medir o pHpzc de substratos orgânicos naturais (KOSMULSKI; MAÇZKA, 2019). Neste estudo, 20 mL de NaCl (0,1 M) foi utilizado como solução eletrolítica, o pH inicial foi ajustado de 2 a 10 pela adição de soluções de NaOH (0,1 M) e HCl (0,1 M), então 0,2 g de biossorvente foi adicionado a esta solução. Durante 24 horas as soluções com biossorventes foram agitadas em incubadora agitadora orbital à temperatura de 30 ° C e agitação de 250 rpm. O pH final das soluções foi registrado após a filtração, os valores de ΔpH foram calculados ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$) e plotados contra o pH inicial para obtenção do pHpzc do bagaço de cana e do pseudocaule de banana.

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos biossorventes foi medida colocando cada biomassa diretamente em um espectrômetro Agilent Cary 630 com medidas em comprimentos de onda entre de 4000 a 500 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} no modo de refletância total atenuada (ATR).

As imagens para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas em microscópio eletrônico Jeol JSM 6701F SEM, ajustado com 13 mm de distância de trabalho e aumento de 500x e 2.000x, com tensão de aceleração de 5 a 10 kV e um cátodo de tungstênio como fonte de elétrons.

Para verificação da área superficial, foi realizada análise de fisissorção de N_2 , em equipamento Micromeritics Gemini[®]VII. Uma massa de aproximadamente 500 mg da amostra foi seca em vácuo a 100 °C em Micromeritics Vap Prep 061 sistema. A área superficial específica foi calculada utilizando o método Brunauer–Emmett–Teller (BET).

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O tamanho de partícula da biomassa, o pH da solução de corante e a dosagem de biomassa empregada podem influenciar significativamente no processo de adsorção. O efeito desses parâmetros na biossorção da Rodamina B foi avaliado empregando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). O planejamento fatorial completo

23 foi conduzido com 4 ensaios no ponto central e 6 ensaios nos pontos axiais, totalizando 18 ensaios em triplicata em ordem randomica. A capacidade de adsorção (q_e) e a porcentagem de remoção (R%) foram as variáveis respostas para o DCCR estudado. Os valores reais e codificados estão descritos na Tabela 1. A análise estatística foi realizada usando o programa Statistic versão 7.0.

Tabela 1. Valores reais e codificados usados no DCCR 2³

Variáveis	Códigos	- α	-1	0	+1	+ α
Tamanho de partícula (mm)	X ₁	0,06	0,15	0,25	0,35	0,44
pH da solução	X ₂	2,00	3,62	6,00	8,38	10,00
Dosagem de biomassa (%)	X ₃	0,10	0,49	1,05	1,61	2,00

Os testes de biossorção foram conduzidos em Erlenmeyers (250 mL) contendo 50 mL de solução de corante (100 mg.L⁻¹). O tamanho de partícula, o pH da solução de corante e a dosagem de biomassa foram variadas e determinadas de acordo com os valores determinados pelo planejamento descrito na Tabela 1. O pH da solução para cada teste foi ajustado com solução de NaOH (0,1 mol.L⁻¹) e solução de H₂SO₄ (0,1 mol.L⁻¹) e então foram realizados em shaker orbital (Model SL 221-SOLAB) a 30°C e 150 rpm durante 24 horas, para garantir que o equilíbrio foi atingido. As amostras foram centrifugadas (Model SL 700 SOLAB) a 2500 rpm por 20 minutos. A concentração de solução de corante no equilíbrio foi medida espectrofotômetro UV-vis r (Model Edutec) a 554 nm de comprimento de onda e a capacidade de adsorção do biossorvente (q_e) (Eq. 1), bem como a porcentagem de remoção do corante (R%) (Eq. 2) foram determinadas.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\% R = \frac{(C_0 - C_e) \cdot 100}{C_i} \quad \text{Eq. 2}$$

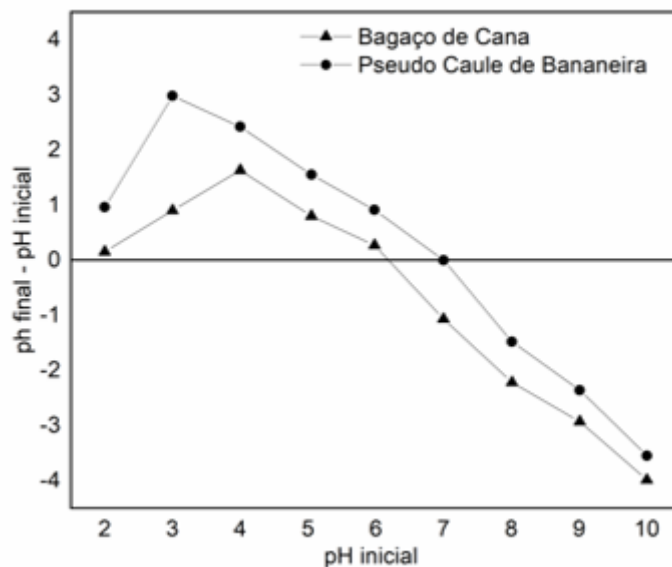
Onde q_e (mg.g⁻¹) é a capacidade de adsorção no equilíbrio, C_0 e C_e (mg.L⁻¹) são as concentrações inicial e no equilíbrio da Rodamina B, V (L) é o volume de solução de corante e m (g) é a massa do adsorvente utilizada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO DOS BIODSORVENTES

A influência do pH nas características superficiais das biomassa em estudo foi verificada pelo cálculo do ponto de carga zero, pH_{pzc} , conforme apresentado na Figura 1.

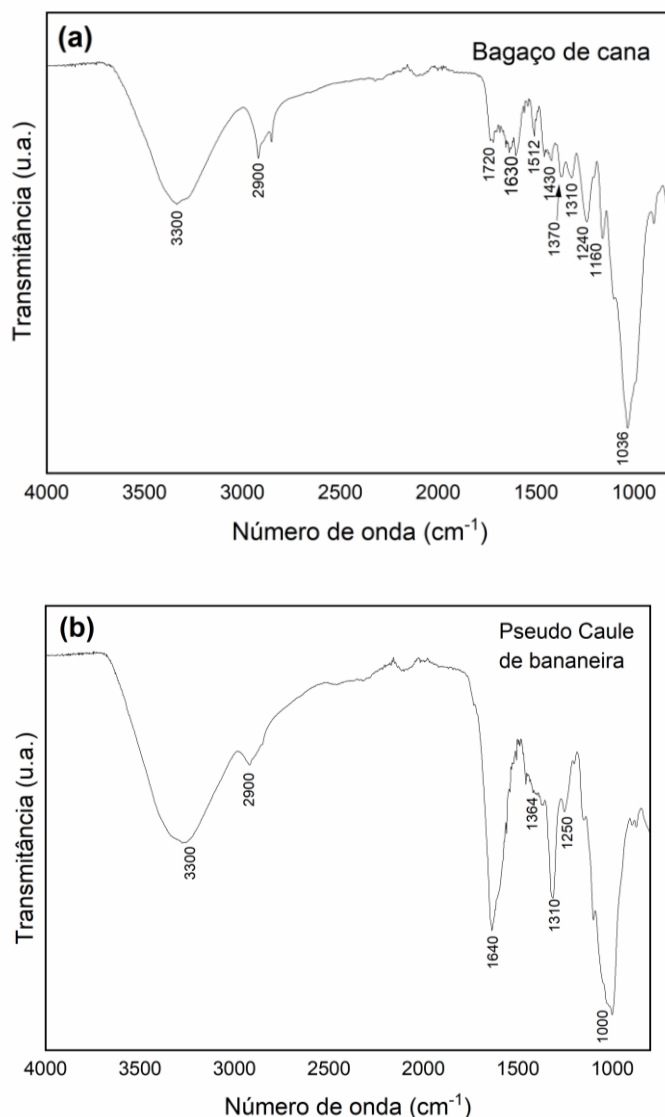
Figura 1: Ponto de carga zero do bagaço de cana e pseudocaule de bananeira



O pH_{pzc} do pseudocaule de bananeira foi de 6,2, enquanto do bagaço de cana foi de 7,0. Estes materiais apresentam baixa estabilidade em suspensão, o que é evidenciado pelos baixos valores absolutos de pH_{pzc} . Devido a esta baixa estabilidade, é essencial que os estudos de adsorção ocorram sob agitação mecânica, assim como foi realizado no presente estudo. Observou-se também a predominância de superfície carregada negativamente em pH acima de 8, apesar da baixa estabilidade.

A Figura 2 apresenta o espectro de FTIR de do bagaço de cana e do pseudocaule de bananeira.

Figura 2. Espectro de FTIR; (a) Bagaço de cana de açúcar, (b) Pseudocaule de bananeira



Os principais grupos funcionais destas biomassas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas de absorção para o bagaço de cana-de-açúcar e o pseudocaule de bananeira, com seus respectivos tipos de frequência vibracional dos grupos funcionais da superfície da biomassa.

Bagaço de cana-de-açúcar	Pseudocaule de Bananeira	Tipo de vibração
3300 cm ⁻¹	3300 cm ⁻¹	Alongamento vibracional das ligações de hidrogênio nos grupos -OH do álcool e fenol presentes na celulose.
2900 cm ⁻¹	2900 cm ⁻¹	Alongamento vibracional das ligações C-H dos grupos metil e metileno da celulose, hemicelulose e lignina.
1720 cm ⁻¹	-	Alongamento vibracional da ligação C=O dos grupos cetona/carbonila presentes na hemicelulose e lignina, e grupo acetil da hemicelulose.
1630 cm ⁻¹	1640	Alongamento vibracional das ligações C=O e C=C do anel aromático
1512 cm ⁻¹	-	Alongamento da ligação C=C correspondente ao anel aromático da lignina
1430 cm ⁻¹	-	Deformação simétrica alifática C-H dos grupos -CH ₃ e -CH ₂
1370 cm ⁻¹	1364 cm ⁻¹	Alongamento vibracional simétrico do COO ⁻
1310 cm ⁻¹	1310 cm ⁻¹	Deformação do CH ₂ alifático

1240 cm ⁻¹	1250 cm ⁻¹	Vibração da ligação C-O observada em amostras contendo hemicelulose e lignina
1160 cm ⁻¹	-	Alongamento do C-O ligado a um anel aromático da celulose
1036 cm ⁻¹	-	Representa grupos -OH primários e secundários de polissacarídeos
-	1000 cm ⁻¹	Deformações angulares das ligações C-H de grupos aromáticos

Tanto o bagaço de cana quanto o pseudocaule de bananeira são compostos de vários agrupamentos importantes, incluindo celulose, hemiceluloses, lignina, cinzas e extrativos em menor quantidade. Os materiais lignocelulósicos fornecem uma forte força atrativa para a ligação de íons poluentes devido aos seus numerosos e variados grupos funcionais. Porém, estas bandas apresentam diferentes intensidades devido a proporção dos três componentes básicos (celulose, hemicelulose e lignina) apresentarem diferentes proporções para as biomassas em estudo. O bagaço de cana é composto por 32-44% de celulose, 35-35% de hemicelulose e 19-24% de lignina (RANGABHASHIYAM & BALASUBRAMANIAN, 2019) e o pseudocaule de bananeira contém 46-49% de celulose, 6-10% de hemicelulose e 6-13% de lignina ((AGUILAR *et al.*, 2020; SRIVASTAVA *et al.*, 2019).

As Figuras 3 e 4 apresentam as características superficiais do bagaço de cana de açúcar e pseudocaule de bananeira, respectivamente. Observa-se, na Figura 3, que a morfologia do bagaço de cana de açúcar apresenta aspecto heterogêneo com feixes lisos de fibras arranjadas e alongadas, e área superficial de 0,78 m².g⁻¹, verificado por análise de fisissorção de N₂. Já o pseudocaule de bananeira (Figura 4) apresenta camadas com superfície plana e com pequeno número de fissuras superficiais, e área superficial de 1,14 m².g⁻¹.

Figura 3. Imagens de MEV do bagaço de cana de açúcar com aumento de (a) 500x e (b) 2000x.

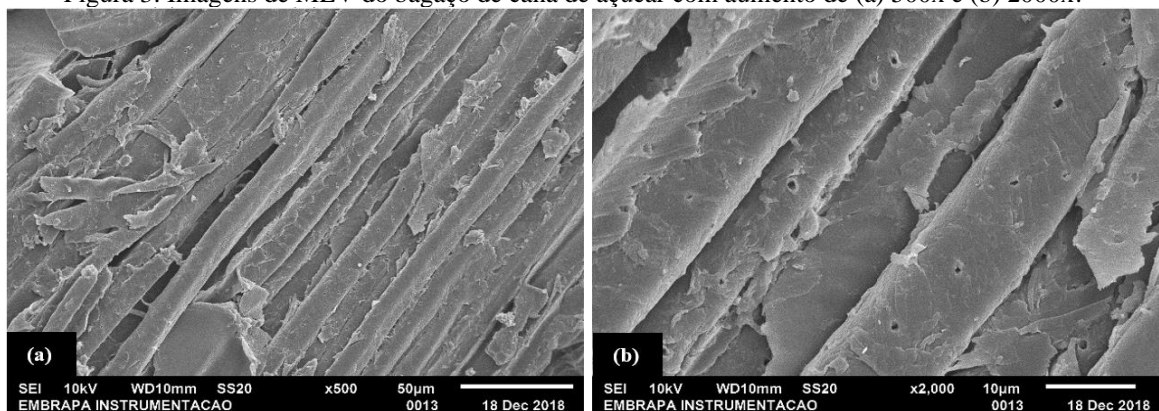
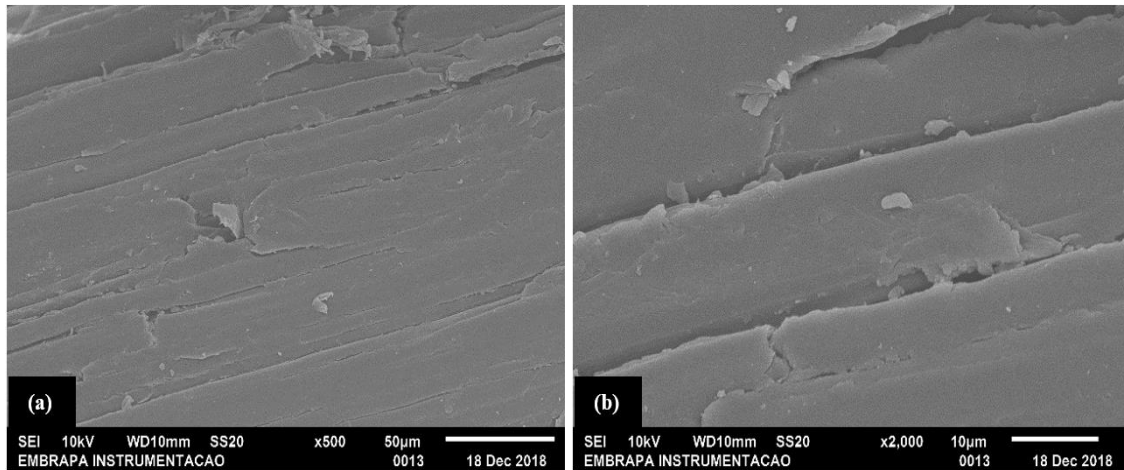


Figura 4. Imagens de MEV do pseudocaule de bananeira com aumento de (a) 500x e (b) 2000x. Delineamento composto central rotacional 2³



Um planejamento do tipo DCCR foi utilizado para avaliar a influência do tamanho de partícula da biomassa, dosagem de biomassa e pH da solução na remoção do corante Rodamina B pelas biomassas lignocelulósicas pseudocaule de bananeira (PB) e bagaço de cana (BC). A Tabela 3 mostra os resultados obtidos de cada ensaio de acordo com o planejamento experimental. Comparando as biomassas lignocelulósicas, os maiores valores de porcentagem de remoção e capacidade de adsorção foram alcançados pelo BC. Em relação à porcentagem de remoção, ambas as biomassas apresentaram o menor valor no experimento 13, em que se empregou biomassa de tamanho de partícula 0,25 mm, solução corante em pH 6,00 e dosagem de 0,1% da biomassa. Valores maiores de porcentagem de remoção (> 80%) foram obtidos nos experimentos em que havia mais de 1,05% de dosagem de biomassa, independente dos demais parâmetros, evidenciando o efeito significativo da quantidade de biomassa. Entretanto, um efeito antagonista foi observado para a capacidade de adsorção, visto que os maiores valores 30,19 e 19,07 mg/g para BC e PB, respectivamente, foram observados no experimento 13. Os valores mais baixos (< 6 mg/g) foram alcançados em experimentos com quantidade de biomassa mais alta. Os pontos centrais de ambas as respostas analisadas apresentaram pequenas variações, indicando boa repetibilidade do processo.

O efeito significativo das variáveis pode ser confirmado pela análise estatística dos dados experimentais, conforme descrito na Tabela 4. A análise dos resultados mostraram que somente a variável quantidade de biomassa (linear e quadrática) foi significativa em um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$) para ambas as biomassas. O tamanho de partícula da biomassa e o pH da solução, bem como as interações entre todos os parâmetros, não afetaram a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção. O efeito positivo do valor linear indica que o aumento da quantidade de biomassa aumenta

a porcentagem de remoção, enquanto que a capacidade de adsorção diminui, o que pode ser confirmado pelos valores lineares negativo da dosagem de biomassa.

Tabela 3. Matrix de planejamento experimental e resultados da capacidade de adsorção das biomassas lignocelulósica e porcentagem de remoção da Rodamina B

Exp	Variáveis (valores codificados)			Respostas (valores codificados)			
	T (mm) (X ₁)	pH (X ₂)	D (%) (X ₃)	R (%) (Y ₁)		qe (mg/g) (Y ₂)	
				BC	PB	BC	PB
1	-1 (0,15)	-1 (3,62)	-1 (0,49)	84,55	67,94	14,81	13,53
2	+1 (0,35)	-1 (3,62)	-1 (0,49)	85,07	61,61	19,92	12,29
3	-1 (0,15)	+1 (8,38)	-1 (0,49)	78,77	63,88	13,05	12,49
4	+1 (0,35)	+1 (8,38)	-1 (0,49)	78,96	58,83	13,08	11,51
5	-1 (0,15)	-1 (3,62)	+1 (1,61)	94,05	88,57	4,95	5,30
6	+1 (0,35)	-1 (3,62)	+1 (1,61)	94,73	89,38	4,98	5,35
7	-1 (0,15)	+1 (8,38)	+1 (1,61)	94,02	88,93	4,67	5,21
8	+1 (0,35)	+1 (8,38)	+1 (1,61)	92,36	88,22	4,59	5,16
9	-1,68 (0,06)	0 (6,00)	0 (1,05)	91,80	88,18	7,05	8,16
10	+1,68 (0,44)	0 (6,00)	0 (1,05)	89,91	85,01	6,90	7,87
11	0 (0,25)	-1,68 (2,00)	0 (1,05)	92,06	94,40	6,63	8,17
12	0 (0,25)	+1,68 (10,00)	0 (1,05)	91,79	82,53	7,20	7,49
13	0 (0,25)	0 (6,00)	-1,68 (0,10)	37,52	19,57	30,19	19,07
14	0 (0,25)	0 (6,00)	+1,68 (2,00)	94,50	90,58	3,81	4,40
15	0 (0,25)	0 (6,00)	0 (1,05)	92,04	82,74	7,06	7,66
16	0 (0,25)	0 (6,00)	0 (1,05)	92,22	83,68	7,07	7,75
17	0 (0,25)	0 (6,00)	0 (1,05)	93,29	83,70	7,16	7,75
18	0 (0,25)	0 (6,00)	0 (1,05)	91,45	83,36	7,02	7,72

T: tamanho de partícula; D: dosagem de biomassa; R(%): porcentagem de remoção; qe: capacidade de adsorção; BC: bagaço de cana-de-açúcar; PB: pseudocaule de banana

Tabela 4. Efeito de variáveis independentes na capacidade de adsorção e porcentagem de remoção

V	R (%)			qe (mg g ⁻¹)										
	BC			PB			BC			PB				
	E	SE	p-valor	E	SE	p-valor	E	SE	p-valor	E	SE	p-valor		
Mean	91,99	3,97	<0,0001	83,39	2,79	<0,0001	7,10	1,03	0,0001	7,74	0,29	<0,0001		
X ₁	-0,51	4,30	0,9095	-2,43	3,03	0,4451	0,71	1,12	0,5445	-	0,40	0,31	0,2395	
X ₁ ²	1,37	4,47	0,7666	2,11	3,15	0,5210	-0,28	1,16	0,8140	0,02	0,32	0,9443		
X ₂	-2,16	4,30	0,6294	-4,04	3,03	0,2188	-1,22	1,12	0,3085	-	0,48	0,31	0,1664	
X ₂ ²	2,13	4,47	0,6466	3,43	3,15	0,3069	-0,33	1,16	0,7869	-	0,11	0,32	0,7489	
X ₃	21,04	4,30	0,0012	32,55	3,03	<0,0001	-	12,60	1,12	<0,0001	-	7,83	0,31	<0,0001
X ₃ ²	-	4,47	0,0068	-	3,15	0,0002	-	6,81	1,16	0,0004	-	2,65	0,32	<0,0001
X ₁ .X ₂	-0,67	5,62	0,9084	-0,06	3,96	0,9833	-1,30	1,46	0,4009	0,04	0,41	0,9243		
X ₁ .X ₃	-0,42	5,62	0,9420	2,87	3,96	0,4890	-1,30	1,46	0,4009	0,56	0,41	0,2105		
X ₂ .X ₃	2,37	5,62	0,6842	1,51	3,96	0,7127	1,98	1,46	0,2123	0,39	0,41	0,3727		

V: variáveis; R(%): porcentagem de remoção; qe: capacidade de adsorção; BC: bagaço de cana-de-açúcar; PB: pseudocaule de banana

A partir dos coeficientes de regressão foi possível obter os modelos para representar o processo de adsorção da Rodamina B utilizando o bagaço de cana-de-açúcar

(BC) e o pseudocaule de banana (PB), e considerando como resposta a capacidade de adsorção (q_e) e a porcentagem de remoção (R%).

$$q_e(BC) = 6,83 - 0,35 \cdot X_1 - 0,14 \cdot X_1^2 - 0,61 \cdot X_2 - 0,16 \cdot X_2^2 - 6,30 \cdot X_3 + 3,41 \cdot X_3^2 - 0,65 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,65 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,99 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad \text{Eq. 4}$$

$$q_e(PB) = 7,74 - 0,19 \cdot X_1 + 0,01 \cdot X_1^2 - 0,23 \cdot X_2 - 0,53 \cdot X_2^2 - 3,92 \cdot X_3 + 1,33 \cdot X_3^2 + 0,02 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,28 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,20 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad \text{Eq. 5}$$

$$R\%(BC) = 91,98 - 0,25 \cdot X_1 - 0,69 \cdot X_1^2 - 1,08 \cdot X_2 + 1,07 \cdot X_2^2 + 10,52 \cdot X_3 - 8,09 \cdot X_3^2 - 0,33 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,21 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,19 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad \text{Eq. 6}$$

$$R\%(PB) = 83,39 - 1,22 \cdot X_1 + 1,06 \cdot X_1^2 - 2,02 \cdot X_2 + 1,72 \cdot X_2^2 + 16,28 \cdot X_3 - 10,09 \cdot X_3^2 - 0,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,43 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,75 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad \text{Eq. 7}$$

O teste F descrito pela análise da variância (ANOVA) (Tabela 5) indica que a regressão ($F_{calc} = 9.1$) é altamente significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) e o percentual de variação (R^2) explicou 92% da variabilidade do modelo, revelando assim a qualidade de ajuste do modelo aos dados experimentais.

Tabela 5. ANOVA para BC e PB.

Fonte de Variação	BC (R%)			PB (R%)			BC (qe)			PB (qe)		
	SQ	GL	p-valor	SQ	GL	p-valor	SQ	GL	p-valor	SQ	GL	p-valor
Regressão	2519,7 1	9	0,0239	5281,2 7	9	0,0002	726,7 2	9	0,0002	235,9 1	9	< 0,0001
Resíduo	505,92	8		250,63	8		34,22	8		26,60	8	
Total	3025,6 3	17		5531,9 0	17		760,9 5	17		238,5 7	17	
	$F_{calc} = 4,43$			$F_{calc} = 18,73$			$F_{calc} = 18,87$			$F_{calc} = 78,84$		
	$R^2 = 0,8328$			$R^2 = 0,9547$			$R^2 = 0,9550$			$R^2 = 0,9888$		

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade.

A partir dos modelos gerados, foi possível obter as curvas de contorno para ambas as biomassas, conforme mostram as Figuras 5 e 6. É possível observar para os adsorventes bagaço de cana-de-açúcar (Figura 5) e pseudocaule de banana (Figura 6), que para obter elevados valores de capacidade de adsorção, devem ser utilizados quantidades menores que 0,49% de biomassa, independente do tamanho de sua partícula e do pH da solução. Entretanto, para se obter maiores valores de porcentagem de remoção, deve-se utilizar

dosagem de biomassa acima de 0,49%. Para alcançar valores satisfatórios em termos de capacidade de adsorção e porcentagem de remoção, os resultados obtidos sugerem que a faixa de condições ótimas de adsorção da Rodamina B empregando as biomassas lignocelulósicas são: dosagem de biomassa de 0,49%, tamanho de partícula de 0,25 mm e pH 4,00 (in natura) da solução de Rodamina B.

Figura 5. Curvas de contorno de capacidade de adsorção (q_e) e porcentagem de remoção (R%) de Rodamina B utilizando bagaço de cana-de-açúcar como adsorvente.

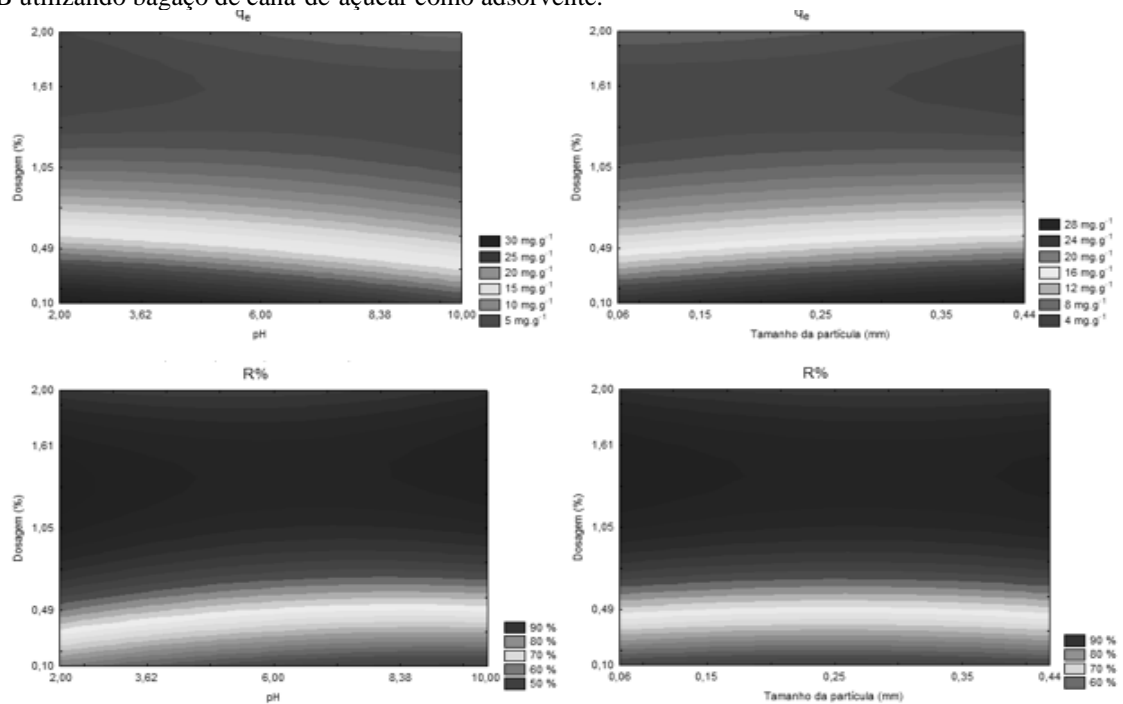
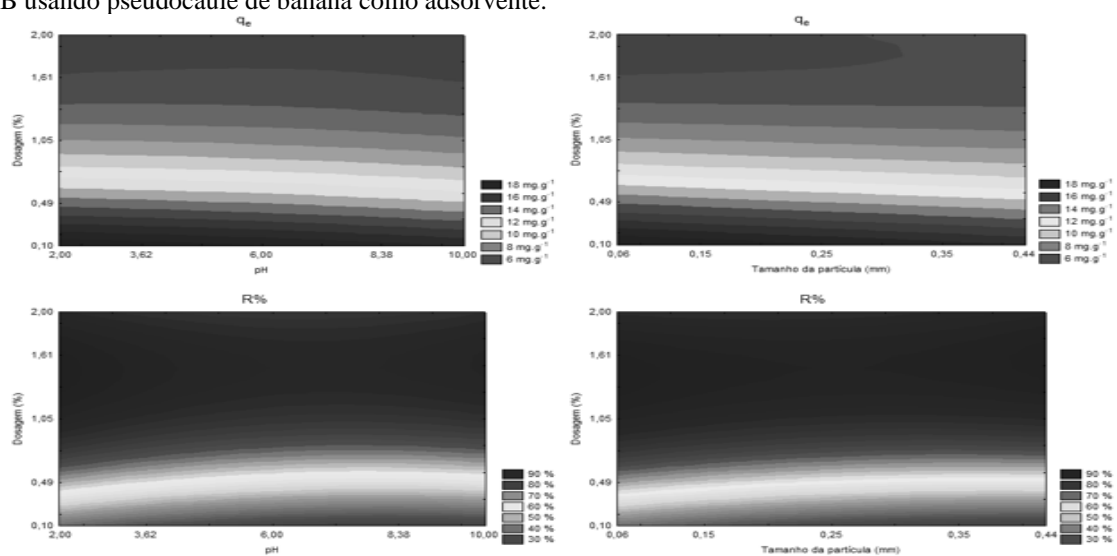


Fig. 6 Curvas de contorno de capacidade de adsorção (q_e) e porcentagem de remoção (R%) de Rodamina B usando pseudocaule de banana como adsorvente.



4 CONCLUSÕES

A remoção da rodamina B utilizando os resíduos: PB e BC foram estudados. Foi realizada uma caracterização física das amostras de bagaço de cana-de-açúcar e do pseudocaule de bananeira e também foi mapeado um planejamento fatorial completo (DCCR). As biomassas apresentam aspecto heterogêneo, com feixes lisos de fibras alongadas. Foi evidenciada a presença dos principais grupos funcionais dos materiais lignocelulósicos, sendo eles, celulose, hemicelulose e lignina. Apesar da baixa estabilidade evidenciada pelo ponto de carga zero e baixa área superficial específica, estes materiais apresentam força atrativa para a ligação de íons poluentes devido a estes numerosos e variados grupos funcionais.

Por meio do planejamento de experimentos, avaliou-se as variáveis de entrada: o tamanho de partícula da biomassa, o pH da solução de corante e a dosagem de biomassa. A variável de resposta foi a quantidade de adsorção do corante Rodamina B nas biomassas PB e BC. Os resultados mostram que somente a variável quantidade de biomassa foi significativa em um intervalo de confiança de 95% para as duas biomassas estudadas. O tamanho de partícula da biomassa e o pH da solução, bem como as interações entre todos os parâmetros, não afetaram a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção.

Os pontos ótimos para adsorção da Rodamina B nas biomassas lignocelulósicas foram: 0,49% de dosagem de biomassa, 0,25mm de tamanho de partícula e pH igual a 4,00 (in natura) da solução de Rodamina B, para ambas amostras estudadas.

Sendo assim, o presente trabalho traz uma proposta de reutilização de resíduos agrícolas no processo de adsorção de rodamina B. Além da possibilidade de despoluição de águas residuais contaminadas com o corante, contribui para um bom gerenciamento de resíduos, por meio de um processo de baixo custo e fácil aplicação, já que os resíduos não sofreram tratamentos prévios para realizarem a adsorção.

REFERÊNCIAS

- ABDELWAHAB, N. A.; SHUKRY, N.; EL-KALYOUBI, S. F. Separation of emulsified oil from wastewater using polystyrene and surfactant modified sugarcane bagasse wastes blend. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 1, p. 235–249, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-020-01973-1>>.
- AGUILAR, D. L. G. et al. Removal of zn(II) in synthetic wastewater using agricultural wastes. *Metals*, v. 10, n. 11, p. 1–12, 2020.
- ALCÂNTARA, R. R.; IZIDORO, J. C.; FUNGARO, D. A. Adsorção do Corante Rodamina B de Solução Aquosa Sobre Zeólita de Cinzas Pesadas de Carvão Modificada por Surfactante. 5th International Workshop, 2015.
- ARRIEL, L. F. P. et al. Adsorção do corante reativo azul BF-5G em bagaço de malte bruto e lavado. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 10, p. 18496–18503, 2019.
- BAGALI, S. S.; GOWRISHANKAR, B. S.; ROY, A. S. Optimization, Kinetics, and Equilibrium Studies on the Removal of Lead(II) from an Aqueous Solution Using Banana Pseudostem as an Adsorbent. *Engineering*, v. 3, n. 3, p. 409–415, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.024>>.
- CHEN, X. et al. Effective removal of methyl orange and rhodamine B from aqueous solution using furfural industrial processing waste: Furfural residue as an eco-friendly biosorbent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 583, n. May, p. 123976, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123976>>.
- DAI, Y. et al. Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review. *Chemosphere*, v. 211, p. 235–253, 2018.
- FERNANDES, J. P. S. et al. Uso de resíduos tratados para adsorção do corante azul brilhante remazol em efluente sintético. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 10, p. 20070–20076, 2019.
- GADEKAR, M. R.; AHAMMED, M. M. Modelling dye removal by adsorption onto water treatment residuals using combined response surface methodology-artificial neural network approach. *Journal of Environmental Management*, v. 231, n. September 2018, p. 241–248, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.017>>.
- KARRI, R. R. et al. Optimization and modeling of methyl orange adsorption onto polyaniline nano-adsorbent through response surface methodology and differential evolution embedded neural network. *Journal of Environmental Management*, v. 223, n. March, p. 517–529, 2018.
- KOSMULSKI, M.; MAÇZKA, E. Surface charging and points of zero charge of less common oxides: Beryllium oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 575, n. March, p. 140–143, 2019.
- LIU, H.; REN, X.; CHEN, L. Synthesis and characterization of magnetic metal-organic

framework for the adsorptive removal of Rhodamine B from aqueous solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 34, p. 278–285, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2015.11.020>>.

PTASZKOWSKA-KONIARZ, M.; GOSCIANSKA, J.; PIETRZAK, R. Removal of rhodamine B from water by modified carbon xerogels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 543, n. January, p. 109–117, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.01.057>>.

SRIVASTAVA, K. R. et al. Pretreatment of banana pseudostem fibre for green composite packaging film preparation with polyvinyl alcohol. *Journal of Polymer Research*, v. 26, n. 4, 2019.

SUN, Z. et al. Preparation of magnesium silicate/carbon composite for adsorption of rhodamine B. *RSC Advances*, v. 8, n. 14, p. 7873–7882, 2018.

YAGUB, M. T. et al. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 209, p. 172–184, 2014.

ZENG, H. et al. Modification of silica nanosheets by gemini surfactants with different spacers and its superb adsorption for rhodamine B. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 555, n. August, p. 746–753, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.08.001>>.