



# A Produção do Conhecimento na Engenharia Química

**Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)**

**Atena**  
Editora  
Ano 2019



# **A Produção do Conhecimento na Engenharia Química**

**Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)**

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Chefe: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie di Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
P964	A produção do conhecimento na engenharia química [recurso eletrônico] / Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-747-5 DOI 10.22533/at.ed.475190611  1. Engenharia química – Pesquisa – Brasil. I. Voigt, Carmen Lúcia.  CDD 660.76
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Química, devido preocupação em desenvolver produtos e processos de produção, é responsável por pesquisas e projetos em relação aos materiais que passam por mudanças físicas e químicas, adquirindo outras características. A manipulação de compostos e substâncias para se criar novos produtos é o foco da Engenharia Química. Estes produtos proporcionam uma melhoria na qualidade de vida humana, pois além de pesquisas relacionadas, existe a preocupação em viabilizar as invenções, criar métodos baratos e eficientes de fabricação em massa, implementar processos químico-industriais cada vez melhores, mais econômicos e mais ecológicos.

O mercado de trabalho na área da Engenharia Química volta-se, por exemplo, para as áreas de energias renováveis (biocombustíveis), para a extração de óleos vegetais e para a produção de ração animal. Há espaço nas indústrias de tintas prediais e automotivas (máquinas agrícolas), nas indústrias têxteis, de cosméticos e higiene pessoal, assim como nas indústrias de tratamento de superfícies metálicas e não metálicas. Os profissionais também podem atuar nas indústrias de transformação dos polímeros, de gemas e joias, de erva-mate, frigoríficas e em laticínios, bem como nas indústrias farmacêuticas e de medicamentos.

Neste volume, organizado para você, apresentamos a produção de conhecimento na Engenharia Química através da realização de pesquisas diversas que abrangem desde nanomateriais na indústria de fármacos, métodos para degradação de poluentes, recuperação e purificação de compostos tanto de origem orgânica ou inorgânica, métodos de adsorção de corantes, até síntese de materiais, como óxido de grafeno e zeólita sodalita, por questões ambientais e energéticas.

Com base nestes trabalhos, convidamos você a aprimorar seus conhecimentos na área da Engenharia Química. Os trabalhos selecionados oportunizam uma nova visão de materiais, métodos e técnicas, mostrando a produção de conhecimento na área bem como o impacto tecnológico no desenvolvimento da indústria e sua relação direta com a sociedade e meio ambiente.

Boa leitura.

Carmen Lúcia Voigt

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
NANOMATERIAIS NA INDÚSTRIA DE FÁRMACOS	
Marlucia Ribeiro Barbosa Bourguignon	
Mariana César	
Iara Sperandio	
Damaris Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4751906111</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADORES PARA DEGRADAÇÃO DOS HORMÔNIOS 17 $\beta$ -ESTRADIOL E 17 $\alpha$ -ETINILESTRADIOL	
Ramiro Picoli Nippes	
Sérgio Ursulino Junior	
Tháisa Frossard Coslop	
Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4751906112</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>22</b>
MICROENCAPSULAMENTO DE ÓLEOS ESSENCIAIS: CONCEITOS E APLICAÇÕES	
Lidiane Diniz do Nascimento	
Márcia Moraes Cascaes	
Kauê Santana da Costa	
Eloisa Helena de Aguiar Andrade	
Elisângela Lima Andrade	
Cristiane Maria Leal Costa	
Lênio José Guerreiro de Faria	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4751906113</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
ANÁLISE TERMODINÂMICA DA FORMAÇÃO DE HIDROGÊNIO E GÁS DE SÍNTESE AO LONGO DA REAÇÃO DE GASEIFICAÇÃO COM ÁGUA SUPERCRÍTICA DO GLICEROL	
Julles Mitoura dos Santos Junior	
Annamaria Doria Souza Vidotti	
Reginaldo Guirardello	
Antônio Carlos Daltro de Freitas	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4751906114</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
PERFORMANCE OF A CYCLONE ADAPTED WITH WATER SPRAYERS	
Ana Clara Alves Justi	
Gabriel Henrique Justi	
Mônica Lopes Aguiar	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4751906115</b>	

**CAPÍTULO 6 ..... 62**

SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS: UMA PLATAFORMA PARA A EXTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE COMPOSTOS

Luan Vittor Tavares Duarte de Alencar  
Laís Maria Santos Passos  
Ricardo Porto Santos  
Cleide Mara Faria Soares  
Álvaro Silva Lima  
Ranyere Lucena de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.4751906116**

**CAPÍTULO 7 ..... 75**

AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO EM BIOCARVÃO PREPARADO POR PIRÓLISE DE CASCA DE EUCALIPTO

Lucas Destefani Paquini  
Ueslei Giori Favero  
Ruan de Oliveira Alves  
Cynthia Pereira dos Santos  
Jean Cota Coura  
Renato Ribeiro Passos  
Luciene Paula Roberto Profeti  
Demetrius Profeti

**DOI 10.22533/at.ed.4751906117**

**CAPÍTULO 8 ..... 85**

INFLUÊNCIA DA AGITAÇÃO, pH E TEMPERATURA NO ESTUDO DA CINÉTICA E EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO CORANTE VERMELHO CONGO

Priscila Pereira Silva  
Bruno Henrique Peressin Lanzoni  
Evandro Roberto Alves

**DOI 10.22533/at.ed.4751906118**

**CAPÍTULO 9 ..... 99**

TINGIMENTO DE POLIAMIDA ADICIONANDO  $\beta$ -CICLODEXTRINA AO BANHO DE TINGIMENTO

Ana Luísa Alves Musialak  
Bruna Thaisa Martins Ferreira  
Washington Luiz Félix Santos

**DOI 10.22533/at.ed.4751906119**

**CAPÍTULO 10 ..... 106**

PREPARAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFITE PARA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS  $\text{Cu}@\text{TIO}_2/\text{RGO}$  UTILIZADOS COMO FOTOCATALISADORES

Jean César Marinozi Vicentini  
Eduardo Sbardellati Barbieri  
Gimerson Weigert Subtil  
Nathalia Caputo da Silva  
Fernanda Ribeiro Gaspar Branco da Silva  
Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante

**DOI 10.22533/at.ed.47519061110**

**CAPÍTULO 11 ..... 118**

**SÍNTESE DE ZEÓLITA TIPO SODALITA A PARTIR DA CINZA VOLANTE**

Emerson Cardoso Rodrigues  
José Antônio da Silva Souza  
Emanuel Negrão Macêdo  
Carlos Augusto da Rocha Junior  
Alice dos Prazeres Pinheiro  
Romero Moreira de Oliveira  
Dilson Nazareno Pereira Cardoso  
Wenderson Gomes dos Santos  
Bruno Maués Farias

**DOI 10.22533/at.ed.47519061111**

**SOBRE A ORGANIZADORA..... 132**

**ÍNDICE REMISSIVO ..... 133**



## AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO EM BIOCARVÃO PREPARADO POR PIRÓLISE DE CASCA DE EUCALIPTO

### **Lucas Destefani Paquini**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Ueslei Giori Favero**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Ruan de Oliveira Alves**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Cynthia Pereira dos Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Jean Cota Coura**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Renato Ribeiro Passos**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Agronomia

Alegre- Espírito Santo

### **Luciene Paula Roberto Profeti**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

### **Demetrius Profeti**

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES),  
Departamento de Química e Física

Alegre- Espírito Santo

**RESUMO:** Os efluentes têxteis com altas cargas de corantes tornaram-se um dos principais problemas ambientais da atualidade. Nesse mérito, diversos métodos direcionados ao tratamento dessas águas foram desenvolvidos com intuito de minimizar os impactos ambientais. Dentre esses, o método de adsorção constituiu-se como o mais economicamente viável, principalmente quando os materiais adsorventes são oriundos de fontes abundantes, como é o caso da biomassa da casca de eucalipto. Assim, o presente estudo investigou o equilíbrio de adsorção do corante Azul de metileno em biocarvão de eucalipto utilizando as isotermas de Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Redlich-Peterson, Sips e Liu. A partir disso, verificou-se que a remoção do corante pelo biocarvão apresentou alta eficiência quando comparado aos dados da literatura para adsorções similares com carvão ativado comercial. Outro fator relevante foi o comportamento do equilíbrio de adsorção, que seguiu as considerações do modelo de isoterma de Sips, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99936.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adsorvente, Corantes, Adsorção, Biomassa

**ABSTRACT:** The textile wastewaters with high contents of dyes is one of the main environmental problem of actuality. In this context, different effluent treatment process have been developed for reducing the environmental degradation. Among them, the adsorption method is an alternative low-cost treatment process that can use adsorbent materials from industrial wastes or abundant natural sources such as eucalyptus husks biomass. Thus, this study investigated the adsorption equilibrium of Methylene Blue (MB) on biochar from pyrolysis of eucalyptus husk using Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin–Radushkevich, Redlich-Peterson, Sips and Liu isotherm. It was observed a higher efficiency for dye removal by the biochar compared to the other materials found in literature. The Sips model best describes the uptake of MB dye ( $R^2 = 0.99936$ ), which implies that its adsorption onto eucalyptus biochar is homogeneous.

**KEYWORDS:** Adsorbent, Dyes, Adsorption, Biomass

## 1 | INTRODUÇÃO

Uma temática cada vez mais abordada e que vem ganhando destaque no cenário geopolítico atual é o lançamento indiscriminado de corantes no meio ambiente. Com efeito, esse problema advém do despejo de águas residuais não tratadas, originadas principalmente do meio industrial, ocasionando assim um grande impacto ao meio ambiente (CONAMA, 2004). Partindo desse pressuposto, além de gerarem consequências irreversíveis ao meio natural, tais despejos promovem, em função de suas propriedades bioacumulativas e biomagnificantes, um conjunto de patologias ao ser humano, como consequência direta à exposição contínua e exacerbada a essas espécies (LAJAYER, 2017).

Na indústria têxtil, a água é usada como veículo para os produtos químicos no processamento de fibras, bem como na remoção dos excessos de produtos considerados indesejáveis para o produto final (SOUSA et al, 1999). A contaminação das águas naturais é um dos principais problemas sociais, causando preocupação constante e levando à criação de novas normas e regras estabelecer limites para a descarga de contaminantes, a fim de se minimizar os impactos ambientais (SOUSA et al, 1999).

Os corantes e pigmentos apresentam-se como um dos grupos mais problemáticos no que concerne às emissões de efluentes líquidos industriais. Essas espécies são emitidas em águas residuais de vários setores industriais principalmente a partir da fabricação de tecidos e acabamento têxtil e também das indústrias de coloração de alimentos, cosméticos, papel/celulose e tapetes. Águas residuais originadas da operação de tingimento de têxtil contêm corantes não aproveitados no processo produtivo, sendo esses cerca de 8-20% da carga total de poluição e 3-5% de substâncias químicas auxiliares, dispersos em grandes quantidades de água. A variedade de processos e produtos usados nas fábricas têxteis tornam os efluentes extremamente complexos, dificultando o seu devido tratamento.

A produção mundial de substâncias corantes é cerca de 700.000 toneladas e, desse total, 50% são corantes compostos pelo grupo azo (BELTRAME et al., 2004). Corantes catiônicos, comumente conhecidos como corantes básicos, são amplamente utilizados em tingimento de acrílico, nylon, seda e lã. Em virtude de sua estrutura química complexa, esses tipos de corantes são resistentes a desagregação/degradação por tratamentos químicos, físicos ou biológicos. Além disso, qualquer degradação por algum desses meios pode produzir substâncias tóxicas e cancerígenas como produtos (BHATT, 2006).

Dentre as substâncias normalmente utilizadas na coloração de produtos, o azul de metileno (AM) é um corante catiônico que possui uma variedade de aplicações, tais como no tingimento de algodão, lãs e papel e tinturas temporárias para cabelos (BHATT, 2006). Ainda que o azul de metileno não seja demasiadamente tóxico comparando-se aos metais pesados por exemplo, a exposição aguda pode causar efeitos prejudiciais à saúde, como aumento do batimento cardíaco, dor de cabeça intensa, náuseas, vômitos, diarreia e necrose do tecido humano (GUPTA, 2011). Devido à sua forte adsorção em suportes sólidos, o azul de metileno pode ser considerado um composto modelo para a investigação da remoção de corantes e de contaminantes orgânicos presentes em soluções aquosas, por novos materiais adsorventes.

Partindo da magnitude da problemática supracitada, a remoção de contaminantes de águas residuais de forma eficiente tornou-se imprescindível para a garantia da sustentabilidade dos processos industriais, em termos da redução dos impactos ambientais. Alguns métodos como precipitação, seguido de coagulação, ou filtração por membrana, têm sido utilizados para a remoção de substâncias tóxicas de água residual (AHMARUZZAMAN, 2011). No entanto, estes processos tornam-se inviáveis por produzir grandes volumes de lamas e baixa remoção das substâncias, ou mesmo serem de alto custo limitando o uso na prática (AHMARUZZAMAN, 2011). Dentre as diferentes alternativas para o tratamento de águas residuais, o processo de adsorção torna-se um dos métodos mais eficazes e viáveis economicamente para o tratamento de efluentes (AHMARUZZAMAN, 2011).

Nesse segmento, os carvões ativados constituem-se como um dos adsorventes mais antigos usados na indústria. Eles são largamente usados nos tratamentos de água residencial e de efluentes industriais (RUTHVEN, 1948). Industrialmente, possuem um significativo interesse e são aplicados em diversos casos, como no tratamento de poluentes atmosféricos. Além disso, podem ser utilizados na remoção de pesticidas, compostos orgânicos dissolvidos e metais pesados (LEGROURI, 2005).

O carvão é um material com uma elevada área superficial e alta porosidade (TANCREDI, 2004). As propriedades dos carvões são essencialmente atribuídas à sua área superficial, a um bom desenvolvimento da estrutura dos poros, assim como o tamanho dos mesmos (LEGROURI, 2005). A distribuição dos tamanhos dos poros

depende do tipo do material e da maneira de ativação do carvão.

De maneira geral, os principais adsorventes usados para a remoção de poluentes nas águas residuais empregam carvão ativado comercial, porém o uso do mesmo é restrito devido ao seu custo elevado. Para contornar esse problema, é desejável que se utilize materiais adsorventes de menor custo e maior eficiência na remoção das espécies (GUPTA et al., 2011). Assim, o desenvolvimento de materiais adsorventes de menor custo ganhou maior protagonismo nos últimos anos, principalmente em se tratando da utilização de biomassa como fonte primária (GUPTA et al., 2011).

Dentro da perspectiva da minimização dos custos inerentes ao processo de adsorção, o uso de resíduos agroindustriais como fonte de biomassa para a produção do biocarvão tem se tornado cada vez mais relevante. Essa classe de resíduos, é formada em grande parte por resíduos da produção agrícola presentes em abundância e que são de difícil decomposição quando dispostos no ambiente, por exemplo, palha de café, casca de eucalipto, fibra de coco, etc. Esses resíduos são constituídos por substâncias húmicas, lignina, celulose, hemicelulose e proteínas, as quais conferem características interessantes à superfície dos biocarvões, devido à formação de grupos carboxilas, carbonilas, hidroxilas e aminas durante o processo de pirólise. Esses grupos superficiais funcionam como sítios adsorptivos que são capazes de reter as substâncias tóxicas presentes em efluentes (NGAH, et. Al., 2008 apud GUPTA et al., 2011).

O objetivo desse trabalho foi avaliar o equilíbrio de adsorção do corante azul de metileno utilizando biocarvão proveniente da pirólise do resíduo agrícola de cascas de.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Preparação do biocarvão

Os resíduos da casca de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) foram submetidos a um processo de pirólise lenta a 600 °C, com tempo de permanência de 60 minutos nessa temperatura. A pirólise foi conduzida em um reator metálico hermeticamente fechado, modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 6 °C min<sup>-1</sup>. Após o processo de pirólise, os resíduos permaneceram no reator até que atingissem a temperatura ambiente. Esses materiais foram mantidos em recipiente fechado e livre de incidência solar até o início das análises.

### 2.2 Reagentes e Soluções

Todos os reagentes são de grau analítico. A solução estoque do corante azul de metileno (Synth Produtos Químicos, 95%) foi preparada pela dissolução do corante em água deionizada na concentração de 1000 mg L<sup>-1</sup>. As soluções de trabalho foram obtidas por diluição da solução estoque. Todas as soluções foram preparadas com

água ultrapura ( $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ), obtida a partir do sistema purificação de água da marca Megapurity RO/UP.

## 2.3 Estudo do equilíbrio

Os estudos intrínsecos ao equilíbrio de adsorção foram realizados em batelada a  $25^\circ \text{C}$ . Foi preparado um aparato adicionando-se 0,2 g do carvão de eucalipto em Erlenmeyers de 125 mL. Após foram adicionadas 20 mL de soluções de azul de metileno, na faixa de concentração de  $100\text{-}1000 \text{ mg L}^{-1}$  em pH 5,5 sob agitação (100 rpm) durante 24h para garantir completo equilíbrio. Após o tempo de equilíbrio, alíquotas desses frascos foram coletadas para a determinação da concentração de equilíbrio do corante. Para tanto, a determinação da concentração foi realizada por espectrofotometria, utilizando um espectrofotômetro de absorção na região do UV-Vis (Genesys, 10uv) em comprimento de onda de 665 nm.

Após proceder com os métodos supracitados, a análise do equilíbrio foi realizada por meio do estabelecimento de uma relação entre a quantidade de corante adsorvido no carvão e a concentração de equilíbrio, sendo que, a quantidade adsorvida por unidade de massa de carvão poderá ser verificada por meio da expressão (1).

$$q_e = \frac{(C_i - C_f) \cdot V}{m_{ad}} \quad (1)$$

Em que  $q_e$  corresponde a quantidade de corante adsorvido por unidade de massa do carvão ( $\text{mg g}^{-1}$ ); os termos  $C_i$  e  $C_f$  correspondem a concentração inicial e final do corante, respectivamente; o termo  $m_{ad}$  corresponde a massa de carvão utilizada nos ensaios de adsorção.

Após estabelecer uma relação entre  $q_e$  e  $C_e$ , utilizou-se os modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Sips, Liu e Redlich-Peterson para descrever o equilíbrio de adsorção. Todos os modelos matemáticos citados foram usados em suas formas não lineares e compilados por meio do algoritmo *Levenberg-Marquardt*.

## 2.4 Modelos de isotermas de Adsorção

Vários modelos de isotermas de adsorção foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, tendo como principal finalidade melhor descrever as condições do equilíbrio de adsorção (GUPTA, 2011). Nesse segmento, além de descrever o equilíbrio como relatado, tais modelos também se mostraram poderosas ferramentas para a obtenção de parâmetros relativos à energética dos sítios de adsorção; ao recobrimento máximo e ao quão heterogênea é uma superfície (NIAD, et. Al., 2008 *apud* GUPTA *et al.*, 2011). A Tabela 1 mostra os modelos matemáticos de isotermas utilizados nesse trabalho, onde é possível observar que a concentração de equilíbrio

( $C_e$ ) e a quantidade adsorvida por unidade de massa de adsorvente ( $q_e$ ) compõem o conjunto básico de dados experimentais necessários para o estudo do equilíbrio.

Modelo	Equação	Parâmetros
Sips	$q_e = \frac{q_m \cdot K_s \cdot C_e^{\frac{1}{n_s}}}{1 + K_s \cdot C_e^{\frac{1}{n_s}}}$	$q_m$ : Quantidade máxima adsorvida ( $\text{mg g}^{-1}$ ) $K_s$ : Constante de Sips ( $\text{L mg}^{-1}$ ) $n_s$ : Coeficiente de Sips
Liu	$q_e = \frac{(q_m \cdot (K_{liu} \cdot C_e)^{nL})}{1 + (K_{liu} \cdot C_e)^{nL}}$	$q_m$ : Quantidade máxima adsorvida ( $\text{mg g}^{-1}$ ) $K_{liu}$ : Constante de Liu ( $\text{L mg}^{-1}$ ) $nL$ : Coeficiente de Liu
Langmuir	$q_e = \frac{q_{m\text{áx}} \cdot K_L C_e}{1 + K_L \cdot C_e}$	$q_m$ : Quantidade máxima adsorvida ( $\text{mg g}^{-1}$ ) $K_L$ : Constante de Langmuir ( $\text{L mg}^{-1}$ )
Freundlich	$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$K_f$ : Constante de Freundlich $n$ : Grau de Heterogeneidade da superfície
Dubinin-Radushkevich	$q_e = Q_m - k\varepsilon^2$	$Q_m$ : capacidade máxima de adsorção ( $\text{mol g}^{-1}$ ) $k$ : constante de energia de ativação
Redlich-Peterson	$q_e = \frac{A_{RP} K_{RP} C_e}{1 + K_{RP} C_e^\beta}$	$A_{RP}$ , $K_{RP}$ e $\beta$ são parâmetros específicos da isoterma de Redlich-Peterson

Tabela 1. Modelos não lineares de Isotermas de adsorção

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, as isotermas de adsorção têm um papel importante na compreensão de como adsorvatos interagem com adsorventes. A execução dos experimentos referentes ao equilíbrio de adsorção, permitiu determinar valores de concentração no equilíbrio ( $C_e$ ) e a quantidade de azul de metileno adsorvido por unidade de massa ( $q_e$ ) após um tempo de equilíbrio de 24 horas. A Figura 1 mostra os dados experimentais de  $q_e$  em função de  $C_e$  e os modelos de isotermas de adsorção para o azul de metileno em biocarvão.

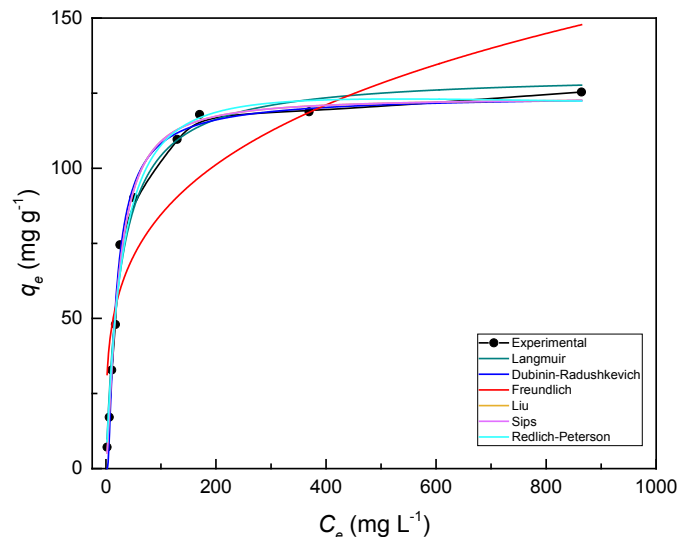


Figura 1. Isoterma de adsorção do azul de metileno em carvão de eucalipto.

Vale ressaltar que os dados experimentais foram ajustados a seis (06) modelos de isoterma de adsorção, nas suas formas não lineares. Desse modo, as equações apresentaram um determinado número de parâmetros, sendo normalmente de dois (02) a três (03), dependendo do modelo. Os parâmetros referentes a cada modelo de isoterma estão mostrados na Tabela 2, bem como os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Langmuir		Sips	
KL ( $L\ mg^{-1}$ )	0,03806	$K_s$ ( $L\ mg^{-1}$ )	0,01588
$q_{m\acute{a}x}$ ( $mg\ g^{-1}$ )	131,55921	$n_s$	0,74815
$R^2$	0,98424	$q_m$ ( $mg\ g^{-1}$ )	123,50506
Freundlich		$R^2$	0,99936
$K_f$ ( $mg\ g^{-1}(mg\ L^{-1})^{-1/n}$ )	25,69034	Liu	
$n$	3,86471	$K_{liu}$ ( $L\ mg^{-1}$ )	0,04509
$R^2$	0,79533	$n_{liu}$	1,33772
Dubinin-Radushkevich		$q_m$ ( $mg\ g^{-1}$ )	123,48853
$q_m$ ( $mmol\ g^{-1}$ )	$1,3551 \times 10^5$	$R^2$	0,99295
$k$ ( $mol^2\ J^{-2}$ )	6,99227	Redlich-Peterson	
$R^2$	0,98877	$\beta$	1,05562
		$A_{RP}$ ( $mg\ L^{-1})^{-\beta}$	0,02387
		$K_{RP}$ ( $L\ g^{-1}$ )	4,39493
		$R^2$	0,98655

Tabela 2. Parâmetros dos modelos de isotermas de adsorção obtidos a partir de ajustes não lineares

De maneira geral, todos os modelos, exceto o de Freundlich, se ajustaram muito bem aos dados experimentais. Dessa forma, por meio dos valores dos coeficientes

de determinação ( $R^2$ ), foi possível observar que o modelo de isoterma de Sips é o que melhor descreve o equilíbrio de adsorção do corante no carvão de eucalipto, com valor de  $R^2$  de 0,99936.

Nesse segmento, o modelo de Sips apresenta-se como uma combinação entre os modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich, sendo desenvolvido com o objetivo de prever a heterogeneidade dos sistemas adsorptivos. O referido modelo faz uso de um conjunto de condições de contorno, principalmente nos casos de aumento exacerbado de concentração (Sips, 1948 *apud* HO, 2004). Esse aumento está intrinsecamente ligado ao comportamento natural do modelo matemático de Freundlich, que apresenta um recobrimento em multicamada. Em condições de contorno (baixas concentrações), o modelo se adapta muito bem à isoterma de Langmuir. De maneira geral, os parâmetros da equação de Sips são governados principalmente pelas condições operacionais, como alterações de pH, temperatura e concentração do soluto (Sips, 1948 *apud* HO, 2004).

Em relação a viabilidade do biocarvão como material adsorvente, verificou-se que o mesmo apresenta uma eficácia de remoção muito próxima ao do carvão ativo comercial. Nesse sentido, verificou-se que a capacidade máxima de adsorção ( $q_m$ ) do corante no biocarvão de eucalipto foi de 123,51 mg g<sup>-1</sup>. Esse valor é comparável aos dados apresentados pela literatura, sendo cerca de 121,25 mg g<sup>-1</sup> a 135,74 mg g<sup>-1</sup> para a adsorção de azul de metileno em carvão ativo comercial (ELABBAS *et al*, 2016).

Outros parâmetros relevantes na isoterma de Sips são a constante de equilíbrio de Sips ( $K_s$ ) e o coeficiente de Sips ( $n_s$ ). Levando-se em conta a definição empírica para constante de equilíbrio, é possível afirmar que quanto maior for seu valor maior será a quantidade de produtos de adsorção formados (FOO, 2012). Isso porque, ao assumir um valor maior, o equilíbrio de adsorção desloca-se no sentido da formação dos produtos (GUPTA, 2011). De modo específico, a constante de equilíbrio de Sips apresentou um valor de 0,01588 L mg<sup>-1</sup>. Na literatura, verifica-se, para adsorções similares, constantes em torno de 0,03658 a 0,13582 L mg<sup>-1</sup> (GUPTA, 2011).

O coeficiente de Sips é uma medida do quão heterogênea é o sistema adsorptivo em análise. Quando  $n_s$  tende a zero, há fortes indícios de que a adsorção seja governada pelas considerações de Freundlich e, portanto, há uma adsorção em multicamadas e com sítios energeticamente diferenciados. Entretanto, caso  $n_s$  tenda a 1, há indícios de que o processo de adsorção ocorra via monocamada e com maior homogeneidade energética entre os sítios. No caso do presente estudo, o ajuste revelou um  $n_s$  de 0,74815, ou seja, se aproximando de 1. Isso implica que potencialmente a adsorção deverá ocorrer via monocamadas e que os sítios ativos apresentam pequenas divergências energéticas (Sips, 1948 *apud* HO, 2004).

Outros modelos também se ajustaram relativamente bem aos dados experimentais, como os de Liu e Dubinin-Radushkevich (DR), com coeficientes de determinação de 0,99295 e 0,98877, respectivamente. Por outro lado, o modelo com



o pior ajuste foi o de Freundlich, possuindo um  $R^2$  de 0,79533.

Um último modelo que destaca-se no conjunto de isotermas investigadas é o de Langmuir. Esse modelo, na maioria dos casos, é utilizado pela sua simplicidade matemática e facilidade de interpretação de seus parâmetros. Assim, no presente estudo o modelo de Langmuir não apresentou o melhor ajuste, porém seus conceitos foram utilizados de maneira indireta através de modelos derivados, como por exemplo a equação de Sips, no qual apresentou o melhor ajuste. Os parâmetros dessa equação revelaram uma adsorção mais próxima às considerações de Langmuir, principalmente por meio do valor assumido por  $n_s$ , assim como discutido anteriormente.

## CONCLUSÃO

Conclui-se com esse estudo que a adsorção de azul de metileno em biocarvão de eucalipto apresentou um equilíbrio governado pela isoterma de Sips, com um coeficiente de determinação de 0,99936. Ainda, verificou-se que o carvão se mostrou eficiente na remoção do corante do meio aquoso, possuindo uma capacidade máxima de adsorção de 123,51 mg g<sup>-1</sup>. Esse valor foi similar àqueles encontrados na literatura e reforçou a eficiência do material como adsorvente frente ao carvão ativo comercial. De maneira geral, a maioria dos modelos de isoterma verificados apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais, com exceção ao de Freundlich, que obteve o pior coeficiente de correlação dentre os demais modelos testados. Portanto, os estudos conduzidos validaram a eficácia do biocarvão de eucalipto como um potencial adsorvente para o tratamento de águas residuais.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).

## REFERÊNCIAS

AHMARUZZAMAN, M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 166, n. 1, p. 36-59, 2011.

BELTRAME, L. T. C.; DANTAS, T. N. C.; DANTAS NETO, A. A. Microemulsão: A nova tecnologia na remoção da cor de efluentes. **Química Têxtil**, n. 76, p. 64-75, 2004.

BHATT, R.; SREEDHAR, B.; PADMAJA, P. Adsorption of chromium from aqueous solutions using crosslinked chitosan–diethylenetriaminepentaacetic acid. **International journal of biological macromolecules**, v. 74, p. 458-466, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA**. Resolução CONAMA nº 430/11, Brasília, DF, 2004.

ELABBAS, Saliha et al. Removal of Cr (III) from chrome tanning wastewater by adsorption using two natural carbonaceous materials: Eggshell and powdered marble. **Journal of Environmental Management**, v. 166, n.1, p. 589-595, 2016.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced  $K_2CO_3$  activation. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 679-686, 2012.

GUPTA, Susmita Sen; BHATT-ACHARYYA, Krishna G. Kinetics of adsorption of metal ions on inorganic materials: a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 162, n. 1, p. 39-58, 2011.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Sorption of copper (II) from aqueous solution by peat. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 158, n. 1, p. 77-97, 2004.

LAJAYER, B. A.; GHORBANPOUR, M.; NIKABADI, S.. Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 145, p. 377-390, 2017.

LEGROURI, K. et al. Production of activated carbon from a new precursor molasses by activation with sulphuric acid. **Journal of Hazardous Materials**, v. 118, n. 1, p. 259-263, 2005.

SOUSA, F. W. et al. Single and multielementary isotherms of toxic metals in aqueous solution using treated coconut shell powder. **Desalination and Water Treatment**, v. 36, p. 289-296, 1999.

TANCREDI, N. et al. Phenol adsorption onto powdered and granular activated carbon, prepared from Eucalyptus wood. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 279, n. 2, p. 357-363, 2004.

## ÍNDICE REMISSIVO

### SÍMBOLOS

$\beta$ -ciclodextrina 99, 100, 101, 104

### A

Adsorção 14, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 106, 109

Adsorvente 75, 80, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 90, 93, 95, 97, 131

ATR 106, 107

### B

Bagaço de cana 85, 86, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97

Bagasse 49, 51, 60, 86, 98

Biomassa 36, 38, 39, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 68, 71, 75, 78

### C

Carvão ativado 75, 78, 85, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98

Cinética 5, 85, 87, 89, 94, 97, 100, 101, 102, 103, 104, 130

Cogeneration 49

Collection 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60

Compostos de interesse 39, 62

Corantes 62, 67, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 86, 87, 92, 93, 94, 98, 100, 102, 104

Couro wetblue 85, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 95, 97

### D

Dióxido de titânio 11, 13, 18, 109

DRX 106, 107, 123, 125, 126

### E

Efficiency 2, 12, 32, 34, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 73, 76, 86

### F

Fármacos de liberação controlada 1

Fotocatálise heterogênea 11, 13, 20

### G

Glicerol 36, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47

Grafeno 3, 8, 14, 106, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115

## H

Hammers modificado 106

## I

Irradiação solar 11, 15

Isotermas 75, 79, 80, 81, 83, 85, 87, 90, 95, 96, 97, 103

## M

Maximização de entropia 36, 39, 40, 42

Mercado de óleos essenciais 22, 24

Microencapsulação 22, 23, 25, 27, 28, 31, 32

## N

Nanopartículas 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 26

Nanotecnologia 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9

## P

Particulate material 49, 50, 52, 55, 57

Poliamida 99, 100, 101, 104

Purificação 62, 63, 66, 67, 68, 69, 71, 74, 79

## R

Raman 106, 107, 113, 114

Recuperação 62, 70

## S

SCWG 36, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47

Síntese hidrotérmica 120, 125

Sistemas aquosos bifásicos 62, 63, 69, 70, 71

Sodalita 118, 119, 120, 121, 125, 126, 127, 128, 129

Spray drying 22, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35

## T

Tingimento têxtil 99, 105

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-747-5

