



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DE PORTO ALEGRE  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ALIMENTOS**



**Thais Closs**

**Utilização de resíduos da indústria de alimentos para adsorção de poluentes de  
águas e efluentes líquidos**

**Porto Alegre  
2022**

**Thais Closs**

**Utilização de Resíduos da Indústria de Alimentos para Adsorção de Poluentes de Águas e Efluentes Líquidos: uma revisão da literatura**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Tecnóloga em Alimentos, pela Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Cristiane Oliveira Rodrigues

**Porto Alegre  
2022**

### Catlogação na Publicação

Closs, Thais

Utilização de resíduos da indústria de alimentos para  
adsorção de poluentes de águas e efluentes líquidos /  
Thais Closs. -- 2022.

38 f. : il., tab. ; 30 cm.

Monografia (trabalho de conclusão de curso) --  
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto  
Alegre, Curso de Nutrição, 2022.

Orientador(a): Profa. Dra. Cristiane Oliveira.

1. Adsorção. 2. Resíduos da indústria de alimentos. 3.  
Poluentes. 4. Efluentes. I. Título.

**Thais Closs**

**Utilização de resíduos da indústria de alimentos para adsorção de poluentes de águas e efluentes líquidos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Tecnóloga em Alimentos, pela Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Profa. Dra. Cristiane Oliveira Rodrigues  
(UFCSPA)

---

Profa. Dra. Manuela Poletto Klein  
(UFCSPA)

---

Prof.Dr José Fernando Ruggiero Bachega  
(UFCSPA)

## RESUMO

A indústria de alimentos é responsável por aproximadamente 5,9% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e participa da transformação de produtos, do beneficiamento e do processamento de matérias-primas, havendo, conseqüentemente, grande geração de resíduos. Além disso, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura estima que um terço dos alimentos destinados ao consumo humano sejam desperdiçados, seja como resíduos do processamento, seja por perdas na cadeia produtiva. Por isso, os resíduos da indústria de alimentos têm despertado interesse para uso na produção de materiais adsorventes de poluentes de águas e de efluentes líquidos, principalmente, devido ao fato de serem abundantes, renováveis e de baixo custo. Para a adsorção de fármacos, a casca de batata mostrou uma melhor capacidade de adsorção ( $454 \text{ mg. g}^{-1}$ ) para o fármaco Bisfenol-A. Foi observada a remoção de poluentes, sobretudo, de corantes, tais como azul de metileno, tartrazina e amarelo crepúsculo. Os resíduos de abacaxi apresentaram maior adsorção para metais (Chumbo (Pb) e Cádmio (Cd)) (> 95%). A casca de laranja demonstrou ser um resíduo com grande potencial para a remoção de metais (Antimônio (Sb) (98,5%), nitrato e amônia (100%). Os resíduos submetidos ao processo de carbonização apresentaram maior eficiência na remoção de poluentes, por conta do aumento provocado na área superficial específica em relação à utilização do resíduo *in natura*. Tendo em vista os aspectos observados, verificou-se a importância do reprocessamento de resíduos da indústria de alimentos, sendo uma estratégia sustentável para sua utilização como adsorvente de poluentes, com o propósito de minimizar os impactos ambientais ocasionados pelo seu descarte de forma inadequada no meio ambiente. Estes materiais adsorventes, por serem abundantes e de baixo custo, são alternativas vantajosas para o tratamento de efluentes das indústrias têxtil, galvânica e farmacêutica. Além disso, os resíduos da indústria de alimentos podem ser utilizados para outros fins, como produção de biocombustíveis e de ração animal. A adsorção pode ser uma alternativa complementar para as Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), em substituição ao carvão ativado.

**Palavras-chave:** Adsorção. Resíduos da indústria de alimentos. Poluentes. Efluentes.

## ABSTRACT

The food industry is responsible for approximately 5.9% of the Brazilian Gross Domestic Product (GDP) and participates in the transformation of products, processing and processing of raw materials, consequently generating a large amount of waste. In addition, the Food and Agriculture Organization of the United Nations estimates that a third of food destined for human consumption is wasted, either as processing residues or as losses in the production chain. Therefore, residues from the food industry have aroused interest for use in the production of adsorbent materials for pollutants from water and liquid effluents, mainly because they are abundant, renewable and low cost. For the adsorption of drugs, potato skin showed a better adsorption capacity (454 mg. g<sup>-1</sup>) for the drug Bisphenol-A. The removal of pollutants was observed, especially dyes, such as methylene blue, tartrazine, twilight yellow. Pineapple residues showed greater adsorption to metals (Lead (Pb) and Cadmium (Cd)) (> 95%). Orange peel proved to be a residue with great potential for removing metals (Antimony (Sb)) (98.5%), nitrate and ammonia (100%). The residues submitted to the carbonization process showed greater efficiency in removing pollutants, due to the significant increase in superficial area compared to the use of natural waste. In view of the observed aspects, the importance of reprocessing waste from the food industry was verified, being a sustainable strategy for its use as a pollutant adsorbent to minimize the environmental impacts caused by its inappropriate disposal in the environment. These adsorbent materials, as they are abundant and inexpensive, are advantageous alternatives for the treatment of effluents from the textile, galvanic and pharmaceutical industries. In addition, residues from the food industry can be used for other purposes, such as the production of biofuels and animal feed. Adsorption can be a complementary alternative for the Effluent Treatment Plants (ETE) in replacement of activated carbon.

**Keywords:** Adsorption. Food industry wastes. Pollutants. Effluents.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>11</b>
3.1 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E DE EXCLUSÃO.....	11
<b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
4.1 ASPECTOS TEÓRICOS DA OPERAÇÃO DE ADSORÇÃO .....	13
<b>4.1.1 Isotermas de adsorção</b> .....	<b>16</b>
4.1.1.1 Isoterma de Freundlich .....	17
4.1.1.2 Isoterma de Langmuir.....	17
4.1.1.3 Isoterma de Sips.....	18
<b>4.1.2 Cinética de adsorção</b> .....	<b>18</b>
4.2 OS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS .....	20
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os resíduos da indústria de alimentos, devido à sua alta disponibilidade, podem ser reprocessados, buscando serem utilizados como materiais adsorventes, tanto *in natura* quanto processados, para gerar carvão ativado (biochar), oferecendo um destino sustentável e diminuindo custos para o processo de adsorção, bem como para o tratamento de águas e de efluentes líquidos (ANTUNES *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019). Entre alguns resíduos gerados pela indústria de alimentos, podemos citar diferentes bagaços, cascas e sementes de frutas, que podem apresentar características físicas, químicas e físico-químicas importantes para viabilizar o desenvolvimento de materiais para aplicação em processos de adsorção.

Considerando que a indústria de alimentos é responsável por, aproximadamente, 5,9% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e participa da transformação de produtos, do beneficiamento e do processamento de matérias-primas provenientes da agropecuária (EMBRAPA, 2020), é notório que há uma crescente demanda pela produção e pela geração de resíduos, por parte desse setor. Concordando com esses dados, a *Food Agricultural Organization* (FAO) estima que um terço dos alimentos destinados ao consumo humano é desperdiçado, seja no processamento, seja na cadeia produtiva (FAO, 2013). A industrialização gera grande quantidade de resíduos, que ocasionam poluição ambiental, caso não sejam adequadamente tratados e dispostos (GUTERRES *et al.*, 2018; ROSA; DE MELLO RODRIGUES; DE FÁTIMA, 2019).

Com o crescente desenvolvimento industrial e populacional, bem como com a mudança de hábitos da sociedade, o meio ambiente vem, ao longo dos anos, sendo exposto a diferentes substâncias nocivas, como, por exemplo, corantes, pesticidas, metais pesados, fármacos, derivados fenólicos, produtos de higiene pessoal, entre outros (FLORES *et al.*, 2004; KYSAS; LAZARIDIS; KOSTOGLU, 2014; SILVA, 2015). Muitas vezes, estes poluentes não são degradados pela ação do tempo, sendo bioacumulados e, conseqüentemente, podendo causar danos à saúde humana (VAGHETTI, 2009).

Entre os principais métodos utilizados para o tratamento de efluentes, destacam-se os tratamentos biológicos, a separação por membranas, a precipitação química, seguida de floculação, e a adsorção (JAWAD *et al.*, 2016; ROSALES *et al.*,

2017). Entre estes, a operação de adsorção tem se mostrado uma alternativa vantajosa para tratar efluentes, devido ao seu baixo custo, à alta disponibilidade de alguns materiais adsorventes, à facilidade de operação e à eficiência, frente aos demais métodos convencionais (SING; ROUQUEIROL, 1999; SANTOS; BOAVENTURA, 2008).

Em virtude destas vantagens, a adsorção é utilizada para o tratamento de uma variedade de efluentes, sendo o carvão ativado o material convencional mais usualmente aplicado, devido às suas elevadas capacidades de adsorção física. No entanto, muitos estudos ainda buscam descobrir novos materiais adsorventes, que possibilitem a substituição do carvão ativado, visando, principalmente, à redução nos custos do processo, bem como à produção voltada para a sustentabilidade ambiental. Nesse sentido, a utilização de resíduos da indústria de alimentos para a produção de materiais adsorventes é uma alternativa notória, viável e sustentável no tratamento de efluentes líquidos industriais (ANTUNES *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre os principais e mais recentes estudos, especialmente, os internacionais, voltados ao desenvolvimento de materiais adsorventes, a partir de resíduos das indústrias de alimentos, contribuindo para a literatura científica e industrial que envolve o tema.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão da literatura científica, especialmente, da internacional, sobre a utilização de adsorventes obtidos a partir de resíduos da indústria de alimentos para a remoção de poluentes presentes em águas e/ou em efluentes líquidos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

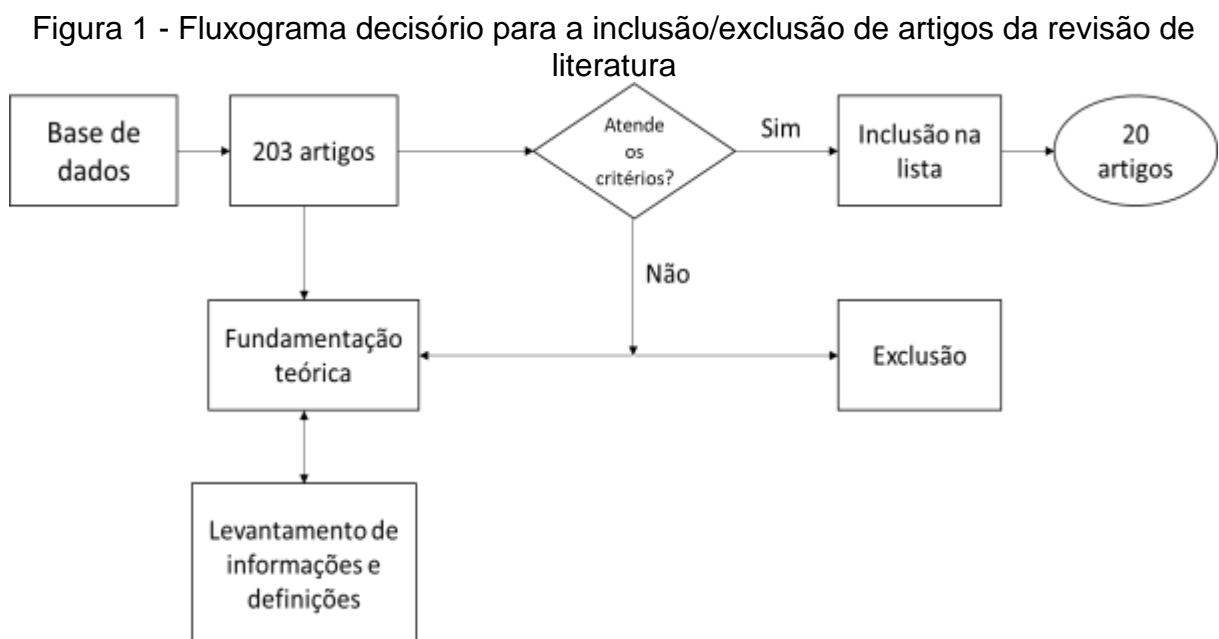
- Mapear os diferentes resíduos da indústria de alimentos que podem ser utilizados para a adsorção de poluentes.
- Identificar os processos utilizados para produção de adsorventes a partir de resíduos da indústria de alimentos.
- Estudar a influência do tipo de processo e parâmetros de operação utilizados nos diferentes experimentos apresentados na literatura a fim de elucidar e comparar o desempenho dos adsorventes produzidos.

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa abrange uma revisão de literatura científica, especialmente, da internacional, a partir de artigos encontrados nas bases de dados *Science Direct* e Portal de Periódicos da Capes. A busca foi realizada com o uso das palavras-chave: *adsorption, food industry wastes, effluents e pollutants*, considerando o período de publicação de 2015 a 2021. Na base de dados do *Science Direct*, foram encontrados 100 artigos e, no Portal de Periódicos da Capes, foram encontrados 103 artigos. Após a leitura sistemática dos artigos, foram selecionados 20 artigos científicos internacionais sobre uso de resíduos da indústria de alimentos como material adsorvente.

#### 3.1 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E DE EXCLUSÃO

Para a seleção dos artigos incluídos no trabalho, foram realizadas as buscas nas bases de dados com posterior análise dos artigos e seleção dos mesmos de acordo com o fluxograma decisório da Figura 1.



Fonte: elaborada pela autora (2021)

Os critérios de inclusão e exclusão para a seleção de artigos de acordo com o fluxograma foram os seguintes:

Critérios de inclusão:

- Resíduos apresentados no artigo provenientes da indústria de alimentos
- Nível de detalhamento das operações de preparo do adsorvente: se houvesse boa descrição dos processos utilizados para apoiar as discussões e comparações posteriormente realizadas.
- Variedade estudada pelos autores de poluentes (e.g: metais, fármacos e corantes)

Critérios de exclusão:

- Artigos fora do tema/escopo do trabalho
- Artigos que apresentaram outras operações unitárias de tratamento de afluentes além da adsorção.
- Artigos cujo foco exclusivo ou quase total fosse na modelagem matemática do processo e não em seu estudo prático.

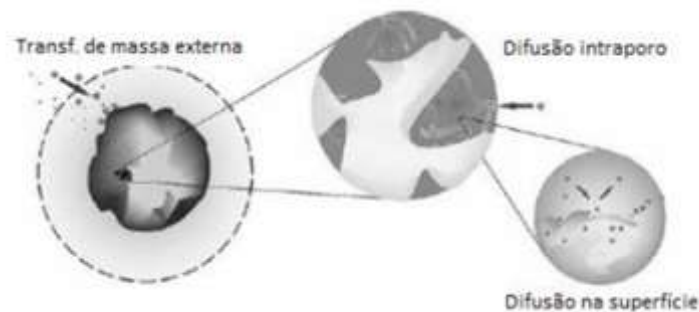
## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 ASPECTOS TEÓRICOS DA OPERAÇÃO DE ADSORÇÃO

A operação unitária de adsorção é conhecida, desde 1773, por C.W. Scheele, que observou a capacidade de adsorver vapores de algumas substâncias porosas (McKAY; EL GEUNDI; NASSAR, 1996; WEBER, 1972). Este mecanismo consiste na separação de componentes de uma mistura, em que ocorre transferência de massa entre uma fase fluida, que pode ser um vapor, um gás ou um líquido, e um sólido adsorvente (MARELLA; DA SILVA, 2005; GEANKOPLIS; HERSEL: LEPEK, 2018). Os elementos que fazem parte da adsorção são: o adsorvente, que é o material, no qual as substâncias (ou compostos) ficam retidas; e o adsorvato, que é a substância (ou composto) que será removida da fase fluida e ficará retida na superfície do adsorvente (DABROWSKI, 2001).

O mecanismo cinético é, normalmente, descrito por três etapas, conforme ilustrado na Figura 2. Nesse caso, primeiro, o soluto se encontra dissolvido no fluido, ao redor do filme líquido, que envolve a partícula sólida. Após, ocorre a difusão do soluto, através do filme, até a entrada dos poros do sólido. Posteriormente, ocorre a difusão intraporo. Finalmente, ocorre a adsorção intraporo, em que a difusão na superfície consoma a adsorção do adsorvato sobre a superfície da partícula (NASCIMENTO et al., 2014; TAN, HAMEED, 2017).

Figura 2 – Mecanismos envolvidos na adsorção



Fonte: adaptado de Nascimento *et al.* (2014)

A adsorção pode ser classificada em física, química, elétrica e de troca iônica. A **adsorção física** se caracteriza por ser um processo rápido e reversível, devido às forças de atração do tipo *Van der Waals*, podendo ocorrer em multicamadas (SCHETTINO JUNIOR, 2004; COSTA, 2005). Por outro lado, na **adsorção química** ou quimissorção, há uma ligação química entre o adsorvente e o adsorvato, em que cada molécula (ou íon) da superfície do adsorvente forma apenas uma ligação com a substância adsorvida. Esse tipo de adsorção, normalmente, ocorre em monocamada (SCHETTINO JUNIOR, 2004; MELO, 2017). A **adsorção elétrica** depende fundamentalmente do pH, pois ele determina a carga da superfície do adsorvente e governa as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato. Nesse caso, para que a adsorção ocorra, é necessário que as cargas do adsorvente e do adsorvato sejam opostas, para que ocorra uma melhor interação eletrostática (TOLEDO, 2005). Por fim, na **adsorção por troca iônica**, ocorre a troca de íons da superfície do material para a solução por íons da solução, que migram para a superfície do material. Normalmente, esse tipo de adsorção é reversível, o que permite o repetido uso dos materiais adsorventes, desde que não sofram mudanças em sua estrutura e que a velocidade da reação seja dependente da seletividade do material. Os materiais mais aplicados nesse caso são as resinas de troca iônica, que apresentam uma estrutura hidrofílica, regular e reprodutível, resistente à atração, com rápida velocidade de troca e com alta estabilidade física (DECHOW, 1989; HARLAND, 1994).

Existem diversos parâmetros que influenciam a operação de adsorção, entre os quais, podemos citar: tipo e tamanho de adsorvente; tamanho e distribuição de poros; temperatura; pressão; área superficial do adsorvente; pH da solução; força iônica; nível de agitação; e tipo de fluido (SUN; XIANG JING, 1997; COONEY, 1999; FERNANDES *et al.*, 2010; MONARIN, 2012; ALFREDO, 2015). As principais características destes tipos de adsorção são sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais características dos diferentes tipos de adsorção

<b>Adsorção física</b>	<b>Adsorção química</b>	<b>Adsorção elétrica</b>	<b>Adsorção por troca iônica</b>
causada por forças de <i>Van der Waals</i>	causada por ligações covalentes	sistemas altamente reprodutíveis	reversível
formação de multicamadas	somente monocamadas	adequada para redução de íons metálicos	cíclica
lenta ou rápida	instantânea	utiliza poucos reagentes químicos	estequiométrica
baixo grau de especificidade	fenômeno específico, conforme a relação adsorvente-adsorvato	possui estrutura hidrofílica	rápida velocidade de troca
acontece abaixo da temperatura crítica	Acontece, também, com altas temperaturas	resistente à atração	-
pode ser recuperado, após a dessorção	não pode ser recuperado, pois perde sua identidade original	-	-

Fonte: adaptado de Teixeira, Coutinho e Gomes (2001)

No que diz respeito ao processo, a operação de adsorção pode ser realizada em batelada (sistemas não contínuos) ou em leitos fixos ou fluidizados (sistemas contínuos). A operação em batelada costuma ser utilizada em escala laboratorial, por ser simples e por utilizar equipamentos de baixo custo. Aqui, o adsorvente e o fluido, que contém o adsorvato, ficam em contato, durante todo tempo de realização do experimento em um tanque isotérmico, havendo apenas um estágio de equilíbrio. Nesta etapa, é possível obter parâmetros cinéticos e isotermas de equilíbrio (MALVESTIO, 2010; TADINI *et al.*, 2016). Já a operação em leito fixo é amplamente aplicada no tratamento de águas e de efluentes líquidos industriais, por ser um sistema contínuo, que ocupa um reduzido espaço físico, sendo capaz de operar em grandes volumes e em diferentes concentrações, e por possuir baixo custo de operação (COSTA, 1998). Nesse caso, o fluxo descendente é mais aplicado, geralmente, pois evita a fluidização do sistema, que pode ocasionar atrito e perda do particulado (VASQUES, 2008; McCABE; SMITH; HARRIOT, 2017). Por outro lado, as operações em leito fluidizado permitem um incremento significativo nas taxas de transferência de massa, sendo capazes, em alguns casos, de levar a processos mais eficientes.

É importante enfatizar que, para a decisão da aplicabilidade de qualquer um dos sistemas descritos, é de suma importância a obtenção inicial de parâmetros básicos de processo, a partir de experimentos de adsorção, em escala de bancada e batelada, com obtenção das isotermas e da cinética de adsorção.

#### 4.1.1 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção são modelos matemáticos, que relacionam as concentrações de equilíbrio do adsorvato distribuído na fase sólida e na fase fluida, à uma temperatura constante, sendo que, para o seu desenvolvimento e para a sua validação experimental, são considerados diferentes fatores, como, por exemplo, pH da solução, homogeneidade/heterogeneidade superficial, interações adsorvente-adsorvato, entre outros (VEGLIO; BEOLCHINI; PRISCIANDARO, 2003; DURSUN, 2006; RIBEIRO, 2012).

No equilíbrio da adsorção, os dados podem ser determinados em experimentos, utilizando pequenas bateladas e parâmetros físico-químicos (de velocidade e de capacidade de adsorção), que são importantes para avaliar a aplicabilidade e a viabilidade do processo (LESMANA *et al.*, 2009). No sistema em batelada, as isotermas são obtidas, usando uma determinada quantidade fixa de adsorvente com um volume fixo de solução, alterando a concentração dessa e aplicando agitação, até o equilíbrio. As isotermas são obtidas matematicamente pela relação entre a quantidade adsorvida ( $q_e$ ) e a concentração remanescente em solução ( $C_e$ ) (SCHIMMELL, 2008). Nesse caso, a capacidade de adsorção ( $q$ ) de um determinado adsorvente é determinada pela Equação 1.

$$q = \frac{V \times (C_i - C_e)}{m} \quad (\text{Equação 1})$$

Aqui,  $C_i$  é a concentração inicial de adsorvato,  $C_e$  é a concentração do adsorvato no equilíbrio,  $V$  é o volume total da solução e  $m$  é a massa de adsorvente utilizado.

A partir da obtenção destes dados nos experimentos de adsorção, é de suma importância interpretá-los, a partir de modelos matemáticos de isotermas de adsorção, visando a determinar a eficiência de um material adsorvente, em relação às interações

com o adsorvato (FERREIRA *et al.*, 2015). Nesse caso, os modelos mais utilizados na área são os de Freundlich, Langmuir e Sips (MELO, 2017).

#### 4.1.1.1 Isoterma de Freundlich

A isoterma de Freundlich se baseia na distribuição do adsorvato entre a fase sólida e a fase líquida no equilíbrio, considerando a formação de múltiplas camadas de adsorvato sobre o adsorvente, devido a uma desuniformidade das superfícies reais (NG *et al.*, 2002; KURODA *et al.*, 2005; YAKAMURA; YAKAMURA, 2015). Este modelo sugere, ainda, que a energia da solução decresce, espontaneamente, não havendo interação significativa entre as moléculas do adsorvato. Tal fato leva a uma distribuição logarítmica de sítios ativos ocupados (MEZZARI, 2002), resultando na Equação 2, que representa o modelo de Freundlich.

$$q_e = K_F \times C_e^{1/n} \quad (\text{Equação 2})$$

Aqui,  $q_e$  é a quantidade de adsorvato por massa de adsorvente (expressa em mg. g<sup>-1</sup>),  $C_e$  é a concentração de adsorvato remanescente em solução no equilíbrio (expressa em mg. L<sup>-1</sup>) e  $K_F$  e  $n$  são constantes empíricas.

#### 4.1.1.2 Isoterma de Langmuir

Segundo Vasquez (2008), o modelo proposto por Langmuir considera que a adsorção pode ocorrer entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente. O modelo de Langmuir se baseia no fato da adsorção ocorrer em sítios uniformes, com recobrimento do adsorvato em monocamada e em afinidade, independentemente da quantidade da substância (ou composto) adsorvida(o) (ATKINS, 2014). Langmuir propôs uma teoria para explicar a adsorção sobre uma superfície simples, não porosa, uniforme, infinita, que assume que as moléculas adsorvidas não interagem, umas com as outras, e que a entalpia de adsorção independe da superfície coberta (McQUARRIT; SIMON, 1997; WORCH, 2012). O modelo de Langmuir é representado pela Equação 3.

$$q_e = \frac{q_m \times K_L \times C_e}{1 + (q_m \times C_e)} \quad (\text{Equação 3})$$

Aqui,  $q_e$  é a quantidade de adsorvato por massa de adsorvente (expressa em  $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $C_e$  é a concentração de adsorvato remanescente em solução no equilíbrio (expressa em  $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $K_L$  é uma constante empírica e  $q_m$  é uma constante, relacionada à energia de adsorção (expressa em  $\text{L.mg}^{-1}$ ).

#### 4.1.1.3 Isoterma de Sips

A isoterma de Sips é uma combinação dos modelos de Freundlich e de Langmuir, que considera a heterogeneidade da superfície do adsorvente, em relação às moléculas adsorvidas. Em pequenas concentrações de adsorvato, a equação se reduz à isoterma de Freundlich, mas, para concentrações mais elevadas, segue a isoterma de Langmuir (FOO; HAMEED, 2010; TÓTH, 2011; NASCIMENTO, 2014). A equação de Sips é representada na Equação 4.

$$q_e = q_{e,m\acute{a}x} \times \frac{(K_S \times C_e)^m}{(1 + K_S \times C_e^m)} \quad (\text{Equação 4})$$

Aqui,  $q_e$  é a concentração do adsorvato no adsorvente, após o equilíbrio no tempo  $t$  (expressa em  $\text{mg. g}^{-1}$ ),  $q_m$  é a capacidade máxima de adsorção (expressa em  $\text{mg. g}^{-1}$ ),  $K_S$  é a constante de Sips (expressa em  $\text{mg. L}^{-1}$ ),  $C_e$  é a concentração final do adsorvato (expressa em  $\text{mg. L}^{-1}$ ) e  $m$  é a medida da heterogeneidade superficial.

#### 4.1.2 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção mostra a taxa de remoção do adsorvato da fase fluida, em relação ao tempo, envolvendo transferência de massa de um ou mais componentes de um fluido para a superfície da partícula do adsorvente (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Os estudos cinéticos têm, como objetivo principal, prever a proporção de adsorvato removido pelo adsorvente (PLAZINSKI; RUDZINSKI; PLAZINKA, 2009). O comportamento cinético depende das características físico-químicas do adsorvato (natureza, peso molecular, solubilidade, densidade de carga,

entre outros), do adsorvente (natureza, área superficial, tamanho e estrutura dos poros, entre outros), do fluido (pH, temperatura e concentração) e das condições operacionais (batelada ou fluxo contínuo, tempo de contato, agitação, entre outros) (ROYER, 2008).

Os modelos cinéticos mais utilizados para a maioria dos sistemas adsorvente/adsorvato são os de pseudo-primeira-ordem (LAGERGREN, 1898) e pseudo-segunda-ordem (HO *et al.*, 1996) e de difusão intrapartícula (WEBER, 1972). No modelo de pseudo-primeira-ordem de Lagergren, representado pela Equação 5, a taxa de variação, ou quantidade adsorvida com o tempo ( $dq/dt$ ), é proporcional à diferença das capacidades de adsorção no equilíbrio e em um dado instante de tempo ( $t$ ).

$$\frac{dq}{dt} = k_1 \times (q_e - q_t) \quad (\text{Equação 5})$$

Aqui,  $dq/dt$  representa a taxa de adsorção,  $q_e$  e  $q_t$  representam a capacidade de adsorção no equilíbrio e no tempo ( $t$ ) (expressas em mg. g<sup>-1</sup>) e  $k_1$  é a constante de velocidade da adsorção de pseudo-primeira-ordem (expressa em min<sup>-1</sup>) (JAVADIAN; VAHEDIANB; TOOSIB, 2013).

O modelo de pseudo-segunda-ordem, representado pela Equação 6, considera a diferença das capacidades de adsorção elevada ao quadrado.

$$\frac{dq}{dt} = k_2 \times (q_e - q_t)^2 \quad (\text{Equação 6})$$

Aqui,  $dq/dt$  representa a taxa de adsorção,  $q_e$  e  $q_t$  representam a capacidade de adsorção (expressas em mg. g<sup>-1</sup>) no equilíbrio e no tempo ( $t$ ), respectivamente, e  $k_2$  é a constante de velocidade da adsorção de pseudo-primeira-ordem (expressa em min<sup>-1</sup>).

## 4.2 OS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Na indústria de alimentos, o termo resíduo é utilizado para descrever todo material, proveniente de etapas do processamento, que não é considerado matéria-prima ou produto. Os principais resíduos deste setor são constituídos de matérias orgânicas solúveis (normalmente, açúcares) e insolúveis (como fibras, cascas, bagaços, sementes, talos, folhas, entre outros) (PEREIRA *et al.*, 2005; GOMES *et al.*, 2016; EVANGELISTA, 2018). Normalmente, os resíduos insolúveis apresentam morfologia porosa, alto teor de matéria orgânica, destacando-se grandes quantidades de celulose, de hemicelulose e de lignina, que são biopolímeros ricos em grupos funcionais, como carboxilas, hidroxilas e carbonilas. As composições destes materiais permitem a adsorção de poluentes, como por exemplo, corantes aniônicos e catiônicos, presentes em águas e/ou em efluentes líquidos industriais (PINO, 2005; KURNIAWAN *et al.*, 2006; AZEVEDO *et al.*, 2015).

Nas áreas da ciência e da tecnologia de alimentos, existe um grande interesse, sobretudo, na indústria, quanto ao aproveitamento de resíduos, visando à redução de custos de produtos e a disposição de resíduos. Tal fato se deve, principalmente, ao desenvolvimento dos processos e à automação industrial, que levaram a uma maior produção de resíduos, que, muitas vezes, ficam sem a destinação adequada.

De uma forma geral e majoritária, as indústrias de alimentos destinam seus resíduos à produção de ração animal ou combustível, para queima em caldeiras. No entanto, é possível inferir que existem alternativas mais nobres e que podem impactar de forma importante a área de sustentabilidade do setor industrial. Entre estas opções, está o desenvolvimento de novos materiais adsorventes para tratamento de águas e de efluentes líquidos industriais, visando à criação de novas rotas tecnológicas para a sustentabilidade ambiental. Assim, considerando a importância do tema, alguns pesquisadores demonstraram importantes estudos nessa linha, conforme sumarizado na Tabela 2.

Alguns pré-tratamentos podem ser utilizados no resíduo, a fim de melhorar suas características superficiais e, assim, aumentar a eficiência do processo. Dentre os pré tratamentos disponíveis podem-se destacar: pirólise, na qual os resíduos da indústria de alimentos são secos e carbonizados em mufla a altas temperaturas (acima de 400 °C) a fim de elaborar um carvão com elevada área superficial, o carvão ativado;

e o tratamento com ácidos, bases ou outros compostos inorgânicos e orgânicos que podem modificar a estrutura do material antes ou após a pirólise a fim de modificar os grupos superficiais e possibilitar a adsorção de diferentes compostos.

Tabela 2 – Principais estudos de produção de materiais adsorventes, a partir de resíduos da indústria de alimentos

<b>Autores</b>	<b>Adsorvente</b>	<b>Utilização do adsorvente</b>	<b>Poluente</b>	<b>Capacidade de adsorção (mg g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Remoção %</b>
<b>FAUZIA et al. (2015)</b>	Sementes de graviola	<i>In natura</i>	Corante Tartrazina	23,63	40
<b>AL KHUSAIBI et al. (2015)</b>	Casca de laranja (CL) Casca de banana (CB)	Carbonização	Efluente indústria leiteira (gordura, nitrogênio, fósforo)	14,5	CL 50,1 CB 44,1
<b>HASAN, ALTAMEEMI e ABBAS (2020)</b>	Casca de laranja	<i>In natura</i> , com tratamento com ácido acético	Metal Antimônio (Sb <sup>+5</sup> )	15,5	92,5
<b>DEY (2021)</b>	Casca de laranja	<i>In natura</i>	Amônia (NH <sub>3</sub> ) Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	33,24	100% (para ambos os compostos)
<b>MOPOUNG e KENGGHETKIT (2016)</b>	Resíduos de abacaxi	<i>In natura</i> , com tratamento com NaOH	Chumbo (Pb <sup>+2</sup> ) Cádmio (Cd <sup>+2</sup> )	Chumbo (Pb <sup>+2</sup> ) 150 Cádmio (Cd <sup>+2</sup> ) 143	> 95
<b>ANTUNES et al. (2018)</b>	Casca de abacaxi	<i>In natura</i>	Corante Azul de metileno (AM)	171,12	81
<b>HERALDI et al. (2017)</b>	Resíduos de tomate Suco de maçã	<i>In natura</i>	Metal Chumbo (Pb <sup>+2</sup> ) Cádmio (Cd <sup>+2</sup> )	Chumbo (Pb <sup>+2</sup> ) 152 Cádmio (Cd <sup>+2</sup> ) 108	81

Tabela 2 - Continuação

<b>ZIATI <i>et al.</i> (2017)</b>	Caroço de pêssigo	Carbonização	Compostos fenólicos azeitona	19,4	83,4
<b>TEJADA-TOVAR, VILLABONA-ORTIZ e GONZALEZ-DELGADO (2021)</b>	Mesocarpo de coco	<i>In natura</i>	Corantes Tartrazina vermelho congo	Tartrazina 19,61 Vermelho Congo 19,99	97
<b>ADEMORYIO e EBERE (2021)</b>	Casca de coco Casca de amendoim	Carbonização	Corantes Tartrazina Amarelo crepúsculo (AC)	Tartrazina 17,12 Amarelo Crepúsculo 10,6	casca de coco 87,86 casca de amendoim 93,34
<b>ARAMPATZIDO e DELIYANNI (2016)</b>	Casca de batata	Carbonização	Bisphenol-A	454,62	98,5
<b>MOR, CHHODEN e RAVINDRA (2016)</b>	Casca de arroz	Carbonização	Fosfato (PO4-3)	221, 4	89
<b>PENAFIEL <i>et al.</i> (2019)</b>	Sabugo de milho	<i>In natura</i>	Sulfametoxazol	0,85	50
<b>OKOROCHA (2021)</b>	Sabugo de milho		Corantes Verde malaquita e Vermelho congo	Verde Malaquita 13,02 Vermelho Congo 9,41	VM 97,76 VC 99,45

Tabela 2 - Continuação

<b>CHUKWUEMEKA-OKORIE <i>et al.</i> (2021)</b>	Biomassa de mandioca	Carbonização	Corantes Tartrazina Amarelo Crepúsculo	Tartrazina 29,4 Amarelo Crepúsculo 22,2	85
<b>CUSIOLI (2019)</b>	Casca de soja	<i>In natura</i>	Corante Azul metileno	169,9	89
<b>RACHID <i>et al.</i> (2019)</b>	Casca de abóbora	Carbonização com tratamento com extrato de beterraba	Corante azul metileno cristal violeta	198,15	95
<b>GEORGIN (2018)</b>	Casca castanha do Pará	<i>In natura</i>	Corante azul metileno Cristal violeta	Corante Azul metileno 83,8 Corante Cristal violeta 83,6	90% (para ambos os corantes)
<b>BUREVSKA (2017)</b>	Casca de amendoim	Carbonização	Metal Níquel (NI+2)	22,,5	77
<b>FRANCISKI (2018)</b>	Bagaço de malte	Carbonização com ativada com CO2	Corante azul metileno	161	70

Fauzia *et al.* (2015) investigaram a utilização de sementes de graviola na adsorção do corante tartrazina. As amostras foram secas a 60°C por 1 h e imersas em 0,01 M HCl por 2 h. O experimento foi realizado em batelada, sendo a máxima capacidade de adsorção obtida de 23,63 mg. g<sup>-1</sup>, alcançada com pH 2, com tempo ótimo de 2 h, com velocidade de agitação de 100 rpm, com concentração inicial de corante de 600 mg. L<sup>-1</sup> e com concentração de adsorvente de 0,1g.

Al Khusaibi (2015) utilizou cascas de laranja e de banana como adsorventes de poluentes da indústria de leite (gorduras, sólidos suspensos e nutrientes, como nitrogênio e fósforo). As cascas das frutas foram cortadas e secas por 48 h no forno à 100°C. O adsorvente obtido por carbonização do resíduo se mostrou mais eficiente na remoção de poluentes do que aquele usado somente seco. O pH ótimo para ambos os métodos foi entre 6 e 8 e o tempo de contato foi de 120 min. A dosagem de adsorvente utilizada para a biossorção da casca de laranja foi de 0,15g e, para a casca de banana, foi de 0,25g. A eficiência na adsorção do adsorvente obtido por carbonização da casca de laranja foi de 50,1% e, do obtido somente por secagem, de 14,3%. Por outro lado, para a casca de banana carbonizada, obteve-se 44,15% de eficiência e 8,3% para a casca de banana desidratada. Com isto, pode-se observar que as cascas de laranja são mais efetivas do que as cascas de banana na remoção de poluentes da indústria de leites, por conta da presença de grupos hidroxila na estrutura do material.

Nos estudos de Deyet *al.* (2021), foi avaliada a viabilidade da utilização de cascas de laranja para a remoção de amônia e de nitrato em efluentes. Nesse caso, o resíduo foi seco e aplicado em soluções de amônia (NH<sub>3</sub>) e de nitrato (NO<sub>3</sub>) em pH 5,5, com tempo de contato de 60 min, com temperatura de 35 °C e com velocidade de agitação de 90 rpm. Segundo os autores, com a utilização de 4g de biossorvente, foi possível adsorver 100% de amônia e de nitrato dos efluentes.

Hasan, Al-Tameemi e Abbas (2020) investigaram a viabilidade da utilização de cascas de laranja para a adsorção de antimônio (Sb<sup>+5</sup>). Este resíduo recebeu lavagem e secagem em forno à 40 °C, por 1 h. As amostras foram divididas em duas partes, sendo uma mantida *in natura* e a outra, tratada com ácido acético. Uma das razões para o incremento da remoção de antimônio (Sb<sup>+5</sup>) usando as cascas de laranja tratadas com ácido acético se deve à redução do pH. O incremento de íons H<sup>+</sup> resulta em sítios ativos com um maior número de cargas positivas o que favorece a redução

do metal antimônio ( $\text{Sb}^{+5}$ ). Os autores mostraram que a maior remoção (92,5%) ocorreu com o resíduo tratado, utilizando 0,005g de adsorvente e concentração inicial de 0,001 g.L<sup>-1</sup> de antimônio ( $\text{Sb}^{+5}$ ), com agitação de 450 rpm, durante 120 min.

Mopoung e Kengkhetkit (2016) investigaram o potencial dos resíduos de abacaxi para a remoção de poluentes, como o chumbo ( $\text{Pb}^{+2}$ ) e o cádmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ), em corpos hídricos. A adsorção foi averiguada, variando o pH em 2, em 4 e em 6, o tempo de contato em 15 min, em 30 min, em 60 min e em 90 min e a temperatura em 30 °C e em 60 °C. Os adsorventes foram tratados com NaOH, sendo que, nesta condição, apresentaram a melhor eficiência de adsorção (> 95%). O tempo de equilíbrio foi 30 min para o chumbo ( $\text{Pb}^{+2}$ ) e de 60 min para o cádmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ). A maior eficiência para ambos os íons metálicos foi alcançada com pH 4. Conforme este estudo, os resíduos de abacaxi são de baixo custo, facilmente disponíveis e podem ser utilizados em grande escala na remoção destes poluentes.

Antunes *et al.* (2018) utilizaram cascas de abacaxi como adsorventes de azul de metileno na concentração de 100 mg. L<sup>-1</sup> em soluções aquosas. Nesse caso, o resíduo foi seco a 80 °C e aplicado nos estudos. A melhor remoção (de 81%) foi obtida com uma concentração de corante de 10 g.L<sup>-1</sup> e com um tempo de contato de 240 min.

Tejada-Tovar, Villabona-Ortíz e Gonzalez-Delgado (2021) realizaram experimentos, utilizando celulose e celulose modificada de mesocarpo de coco na remoção de corantes azo-aniônicos (vermelho congo e tartrazina) em efluentes. Para a produção da celulose modificada, foi utilizado cloreto de cetiltrimetilamônio. Nesse caso, foram investigadas três concentrações (5mg. L<sup>-1</sup>, 8mg. L<sup>-1</sup> e 12 mg. L<sup>-1</sup>) de materiais adsorventes e três concentrações iniciais de corante (40mg. L<sup>-1</sup>, 70 mg. L<sup>-1</sup> e 100 mg. L<sup>-1</sup>). Os principais resultados do estudo mostraram que o CC e o MCC proporcionaram capacidades máximas de adsorção de 5,67 mg. g<sup>-1</sup> e de 19,61 mg. g<sup>-1</sup> para a tartrazina, respectivamente. Para o vermelho congo, as capacidades de adsorção foram de 15,52 mg. g<sup>-1</sup> e de 19,99 mg. g<sup>-1</sup> para o CC e para o MCC, respectivamente. As melhores remoções de 83% e 97% de tartrazina e de vermelho congo, ocorreram com a celulose modificada devido ao maior número de sítios ativos protonados na superfície do adsorvente.

Ademoryo e Ebere (2020) avaliaram as potencialidades das cascas de coco e de amendoim para a remoção dos corantes tartrazina e amarelo crepúsculo. A preparação do adsorvente foi realizada em temperatura de 50 °C, em duas etapas.

Na primeira etapa, 30 g de amostra foram carbonizadas em mufla à 450 °C, por 30 min, e, em seguida, lavadas com ácido clorídrico 0,1 M. Na segunda etapa, foi realizado um tratamento ácido com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e, novamente, as amostras foram levadas ao forno. No processo de adsorção dos corantes, o equilíbrio foi atingido, após 20 min. As cascas de amendoim apresentaram maior eficiência de remoção (93,34%) do que as cascas de coco (87,86%).

Ziati *et al.* (2017) estudaram a remoção de compostos fenólicos de efluentes da indústria de azeitonas, utilizando resíduos lignocelulósicos de caroços de pêsego, termicamente tratados, como adsorventes. Este estudo demonstrou maior eficiência de adsorção (91%) nas condições de 20 °C, com pH 2, com 2g de adsorvente e com tempo de contato de 60 min.

Arampatzidou e Deliyanni (2016) investigaram a utilização de carvão ativado, elaborado a partir de cascas de batata, na adsorção do disruptor endócrino Bisfenol-A em soluções aquosas. A biomassa de casca de batata foi ativada com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, com KOH e com ZnCl<sub>2</sub>, sendo carbonizada a diferentes temperaturas (400 °C, 600 °C e 800°C). A ativação com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> foi mais significativa devido ao maior número de grupos carboxílicos associados com grupos ácidos como os fenóis. A carbonização realizada a 400 °C foi responsável por um aumento na área superficial específica que somado ao tratamento ácido proporcionou a melhor capacidade de adsorção (454,62 mg. g<sup>-1</sup>), com pH 3 e com temperatura de 25 °C.

Mor, Chhoden e Ravindra (2016) analisaram a aplicação de cinzas de casca de arroz para a remoção de fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>) de efluentes líquidos. O material foi preparado por queima em mufla (à 550 °C) por 2 h, com posterior tratamento ácido, para modificar as características da superfície do adsorvente e, conseqüentemente, propiciar maior capacidade de adsorção. Estes autores mostraram que a maior remoção observada foi de 89%, utilizando uma concentração de adsorvente de 2 g.L<sup>-1</sup> nas condições de pH 6 e com 120 min de contato entre o adsorvente e a solução.

Burevska *et al.* (2017) investigaram a utilização de cascas de amendoim *in natura* e quimicamente modificadas, com HNO<sub>3</sub> e com NaOH, para a remoção de níquel (Ni<sup>+2</sup>) em soluções aquosas. As cascas foram lavadas e secas à 60 °C, até o peso constante, sendo, então, aplicadas no estudo. Os autores consideraram que a composição fibrosa das cascas de amendoim (60%-65%) colaborou para a adsorção do íon poluente, demonstrando que o tratamento superficial das cascas proporcionou

maiores eficiências de remoção (77%), quando comparadas ao material *in natura* (53%).

Heraldi *et al.* (2017) utilizaram resíduos de tomate e da produção de suco de maçã, realizando um pré-tratamento nos materiais, com NaOH, para a remoção de íon chumbo ( $Pb^{+2}$ ) e, posteriormente, secaram os materiais ativados, à 70 °C, por 48 h. Os principais resultados mostraram adsorções máximas de 152 mg. g<sup>-1</sup> e de 108 mg. g<sup>-1</sup> para os resíduos de tomate e de maçã, respectivamente, em pH 4 e 0,1 g de adsorvente, com tempo de contato de 60 min e de 90 min, respectivamente. Os autores enfatizaram que os adsorventes apresentaram boa estabilidade e puderam ser reutilizados.

Franciski *et al.* (2018) analisaram três experimentos: o primeiro, utilizando bagaço de malte de cevada *in natura* (BM), *biochar* (carvão vegetal, elaborado com bagaço de malte de cevada e pirolisado) e *biochar*, seguido de ativação, com CO<sub>2</sub>, para a adsorção do corante azul de metileno. No estudo, o bagaço de malte foi seco ao sol e, após, em forno, à 40 °C, por 6 h, até a umidade atingir 2,24%±0,2% em base seca. Os parâmetros utilizados e avaliados foram dosagem de adsorvente de 1,0 g.L<sup>-1</sup> e pH 6,5. As porcentagens de remoção, para o BM e para o *biochar*, foram de 10% e de 40% respectivamente, enquanto, para o *biochar* ativado, foi de 70%, mostrando que somente a pirólise não foi suficiente para que a biomassa de malte obtivesse um aumento significativo na sua capacidade adsorptiva.

Georgin *et al.* (2018) utilizaram cascas de castanha-do-pará como biossorvente na remoção dos corantes catiônicos azul de metileno e cristal violeta, visando ao tratamento de efluentes têxteis. As cascas foram secas, à 60 °C, por 12 h, e peneiradas, obtendo uma fração abaixo de 250 µm. Para estes dois corantes, a concentração de 0,5 g.L<sup>-1</sup> em pH 4 proporcionou as maiores capacidades de adsorção, de 83,8 mg. g<sup>-1</sup> e de 83,6 mg. g<sup>-1</sup>, respectivamente, resultando em uma remoção de 90%, o que caracteriza um bom material adsorvente de corantes em efluentes industriais.

Cusioli *et al.* (2019) também investigaram o uso de casca de soja como adsorvente do corante azul de metileno. Estes autores fizeram um preparo no resíduo, com lavagem, com secagem e com peneiramento, obtendo partículas com tamanho de 350 µm. Os estudos em batelada foram conduzidos com soluções do corante na concentração de 50 mg. L<sup>-1</sup> e com velocidade de agitação de 120 rpm, variando-se o

pH (5, 7 e 9) e a temperatura (25 °C, 35 °C e 45 °C). Os autores concluíram que as melhores condições experimentais foram com temperatura de 25 °C, utilizando 0,025 g de adsorvente, com pH 7 e com tempo de contato de 180 min, resultando em uma capacidade de adsorção de 169,90 mg. g<sup>-1</sup>. Os autores observaram, também, que foi possível realizar operações de regeneração nas cascas, a fim de utilizá-las repetidamente em novas remoções do poluente em questão, o que representa grande vantagem no uso deste novo adsorvente.

Penafiel *et al.* (2019) avaliaram a capacidade de adsorção de sulfametoxazol em efluentes, utilizando sabugos de milho. Tais resíduos foram secos ao sol por 5 dias, e, após, em forno, à 60 °C, por 24 h. A maior remoção alcançada foi de 50%, usando a concentração de 30 mg. L<sup>-1</sup> de adsorvente em pH 6, com tempo de contato de 60 min.

Okorochoa *et al.* (2021) também utilizaram sabugos de milho como adsorvente alternativo para adsorção dos corantes verde malaquita e vermelho congo em soluções aquosas. Os parâmetros utilizados foram pH 10, temperatura de 70 °C e tempo de contato de 30 min, com concentração inicial de 100 mg. L<sup>-1</sup> de corante e 1 g de adsorvente. Os autores mostraram que houve remoções de 99,45% do corante vermelho congo e de 97,76% do verde malaquita. Nestas remoções, o equilíbrio foi alcançado, após 90 min de contato entre adsorvente e adsorvato.

Rashid *et al.* (2019) desenvolveram um adsorvente, utilizando casca de abóbora, para a remoção de corante azul de metileno em águas. Neste caso, as cascas foram secas à 100 °C, por 18 h. Após, foram carbonizadas em diferentes temperaturas (250 °C, 350 °C, 450 °C e 550 °C). No experimento, a melhor adsorção ocorreu com o material produzido por carbonização à 250 °C. Os autores realizaram dois experimentos. O primeiro experimento foi realizado com cascas de abóbora com a ativação utilizando ácidos (ácido cítrico, ácido nítrico e ácido oxálico). Por outro lado, o segundo experimento foi desenvolvido com suco de beterraba. O suco de beterraba foi preparado com 50g de beterraba com 100ml de água deionizada por 10 minutos. O suco e a polpa foram separados com papel filtrante para a extração do suco de beterraba. O suco de beterraba apresentou vários grupos funcionais (ácidos carboxílicos, ester, éter cetonas, aldeídos e álcool. Além disso o suco de beterraba permitiu a formação de um grande número de mesoporos. O corante tratado tinha uma concentração inicial de 0,2 g.L<sup>-1</sup>. O carvão ativado com a utilização de extrato de

beterraba ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ) apresentou melhor adsorção, com a concentração de corante de  $200 \text{ mg. L}^{-1}$ , apresentando melhor capacidade de adsorção ( $198,15 \text{ mg.g}^{-1}$ ), com um tempo de contato de 180 min e com temperatura de  $50^\circ\text{C}$ .

Chukwuemeka-Okorie *et al.* (2021) fizeram uso de biomassa de mandioca para elaborar carvão ativado, para remover corante amarelo tartrazina e amarelo crepúsculo. Para isso, foram utilizados 50 g de massa seca de mandioca, impregnadas com 50 ml de ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) na proporção 1:1, antes do processo de carbonização para remoção de impurezas e para permitir um melhor incremento na área superficial após a pirólise. A carbonização foi realizada em mufla, à  $550^\circ\text{C}$ , por 1 h, e o produto carbonizado foi lavado várias vezes, posteriormente, até atingir pH neutro. Após, o material foi seco em forno, à  $100^\circ\text{C}$ , por 4 h, e peneirado, até atingir 180-200 *mesh*, sendo transformado em carvão ativado. As melhores temperaturas para a remoção de tartrazina e de amarelo crepúsculo foram de  $40^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ , respectivamente. A maior capacidade de adsorção para a tartrazina e para o amarelo crepúsculo foram de  $29,4 \text{ mg. g}^{-1}$  e de  $22,2 \text{ mg. g}^{-1}$ , respectivamente, com a utilização de 0,1 g de adsorvente.

## 5 CONCLUSÃO

Levando-se em conta o que foi observado no presente trabalho, evidenciou-se importante e notória possibilidade de reprocessamento de resíduos da indústria de alimentos, visando o seu uso na geração de novos produtos adsorventes, para a remoção de poluentes de águas e de efluentes líquidos industriais.

Os principais trabalhos encontrados na literatura científica internacional recentes, entre os anos de 2015 a 2021, utilizaram resíduos de frutas (semente de graviola, casca de banana, casca e mesocarpo de coco, casca e bagaço de laranja, resíduos de abacaxi, caroços de pêssigo, resíduos de tomate e de maçã), de cereais e de tubérculos e oleaginosas (resíduos de casca de arroz, casca de abóbora, sabugo de milho, casca de soja, casca de batata, resíduos de casca de mandioca, casca de castanha-do-pará, casca de amendoim, bagaço de malte), para a remoção de poluentes, como íons de metais pesados (chumbo ( $Pb^{+2}$ ), cádmio ( $Cd^{+2}$ ), antimônio ( $Sb^{+5}$ )), corantes (azul de metileno, tartrazina, amarelo crepúsculo, vermelho congo, cristal violeta), disruptores endócrinos (Bisfenol-A, Sulfametoxazol), compostos nitrogenados (amônia ( $NH_3$ ) e nitrato ( $NO_3$ ), fosfato e compostos fenólicos. Os estudos demonstraram que resíduos de cascas e bagaço de laranja apresentaram maiores capacidades de adsorção de poluentes, como íons de metais pesados ( $Sb^{+5}$ ), além de eficiência de 100% na remoção de amônia ( $NH_4^{+1}$ ) e de nitrato ( $NO_3^{-1}$ ), enquanto os resíduos de abacaxi apresentaram maior eficiência na adsorção dos metais chumbo ( $Pb^{+2}$ ) e cádmio ( $Cd^{+2}$ ) e a casca de batata e o sabugo de milho apresentaram maiores capacidade de adsorção e eficiência na adsorção de Bisfenol-A, respectivamente.

Sendo assim, acredita-se que as pesquisas científicas nessa área devem ser impulsionadas, avançando para o desenvolvimento de características de aplicabilidade, conjuntamente com as viabilidades econômica e ambiental do emprego destes materiais, agregando valor e sustentabilidade ambiental aos processos industriais de descarte da indústria de alimentos.

## REFERÊNCIAS

- ADEMORIYO, Clement O.; ENYOH, Christian E. Batch Adsorption Studies of Sunset Yellow and Tartrazine Using Coconut and Groundnut Shells. **J Biomed Res Environ Sci**, v. 1, n. 5, p. 163-172, 2020.
- ALFREDO, Ana P. Adsorption of Methylene blue in potato peel using batch and fixed bed column systems. **Revista Virtual de Química**, v.7, n.6, p.1909-1920, 2015.
- AL KHUSAIBI, Thuraiya M. *et al.* Treatment of dairy wastewater using orange and banana peels. **Journal of chemical and Pharmaceutical Research**, v. 7, n. 4, p. 1385-1391, 2015.
- ANTUNES, Evelin C. E. da S. *et al.* Remoção de corante têxtil utilizando a casca de abacaxi como adsorvente natural. **Holos**, v. 3, ano 34, p. 81-97, 2018.
- ARAMPATZIDOU, Anastasia C.; DELIYANNI, Eleni A. Comparison of activation media and pyrolysis temperature for activated carbons development by pyrolysis of potato peels for effective adsorption of endocrine disruptor bisphenol -A. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 466, p. 101-112, 2016.
- AZEVEDO, Luiz Eduardo Chaves de. Adsorção de corantes básicos empregados na indústria têxtil por argila: cinética e perfil de equilíbrio. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- BUREVSKA, Katerina Atkovska *et al.* Biosorption of nickel ions from aqueous solutions by natural and modified peanut husks: Equilibrium and kinetics. **Water and Environment Journal**, v. 32, n. 2, p. 276-284, 2018.
- CHUKWUEMEKA-OKORIE, Helen O. *et al.* Adsorption of tartrazine and sunset yellow anionic dyes onto activated carbon derived from cassava sieve biomass. **Applied Water Science**, v. 11, n. 2, p. 1-8, 2021.
- COONEY, Emma L. *et al.* Ammonia removal from wastewaters using natural Australian zeolite. I. Characterization of the zeolite. **Separation Science and Technology**, v. 34, n. 12, p. 2307-2327, 1999.
- COSTA, C.A. **Sorção de íons cobre Níquel e zinco com o rejeito do beneficiamento de carvões e outros materiais alternativos.** 1998. 64f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- COSTA, Adriana E. **Adsorção e purificação de corantes naturais com sílica amorfa.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2005.
- CUSIOLI, Luís F. *et al.* Soybean hulls as a low-cost biosorbent for removal of methylene blue contaminant. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 39, n. 2, p. e13328, 2020.

DABROWSKI, A. Adsorption - from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 93, n. 1-3, p. 135-224, 2001.

DECHOW, Frederick J. **Separation and purification techniques in biotechnology**. Park Ridge: Noyes Publications, 1989.

DEY, S. *et al.* Characteristic and biosorption capacities of orange peels biosorbents for removal of ammonia and nitrate from contaminated water. **Cleaner Materials**, v. 1, p. 100001, 2021.

DURSUN, Arzu Y. A comparative study on determination of the equilibrium kinetic and thermodynamic parameters of biosorption of copper (II) and lead(II) ions onto pretreated *Aspergillus niger*. **Biochemical Engineering Journal**, v. 28, n. 2, p.187-195, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Perdas e Desperdício**. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-perdas-e-desperdicio-de-alimentos>>. Acesso em: 30 jun. 2021, 19:10:00

EVANGELISTA, Maria N. D. **Uso da floculação de tensoativo para remoção de corantes**: Avaliação da cinética e concentração. 2018. Monografia (Graduação) –Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.

FAUZIA, S. *et al.* Adsorption and reaction kinetics of tartrazine by using *Annona muricata* L seeds. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, v. 7, n. 1, p. 573-582, 2015.

FERNANDES, A.C.P. *et al.* **Adsorção de efluentes têxteis**: tratamento de efluentes da indústria têxtil por adsorção em materiais de baixo custo. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010. (Relatório de Projeto)

FERREIRA, P. P. L. *et al.* Adsorção de Cu<sup>2+</sup> e Cr<sup>3+</sup> em efluentes líquidos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (Adsorption of Cu<sup>2+</sup> and Cr<sup>3+</sup> in wastewater using bagasse flyash). **Cerâmica**, v. 61, p. 435-441, 2015.

FLORES, Araceli V. *et al.* Organoclorados, um problema de saúde pública. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, p. 111-124, 2004.

FOO, Keng Y.; HAMEED, Bassim H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

FRANCISKI, Mauro A. *et al.* Development of CO<sub>2</sub> activated biochar from solid wastes of a beer industry and its application for methylene blue adsorption. **Waste Management**, v. 78, p. 630-638, 2018.

GEANKOPLIS, Christie J.; HERSEL, A. Allen; LEPEK, Daniel H. **Transport processes and separation process principles**. Boston: Prentice hall, 2018.

GEORGIN, Jordana *et al.* Preparation of activated carbon from peanut shell by conventional pyrolysis and microwave irradiation-pyrolysis to remove organic dyes from aqueous solutions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 1, p. 266-275, 2016.

GOMES, Maron S. S. O.; NASCIMENTO, J. R.; SILVA, M. G. O. Mesocarpo de babaçu (*Orbinyasp*) como adsorvente do dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS), **Holos**, v. 7, p. 51-61, 2016.

GUTERRES, Fernanda *et al.* Adsorção de azul de metileno utilizando resíduos de angicoovermelho *in natura* e tratado quimicamente com NaOH. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp**, p. 130-143, 2018.

HARLAND, Clive E. **Ion exchange: theory and practice**. [S. l.]: Royal Society of Chemistry, 1994.

HASAN, Manar B.; AL-TAMEEMI, Israa M.; ABBAS, Mohammed N. Sustainable Material for Treating Water Polluted with Antimony. **Journal of Ecological Engineering**, v. 22, n. 2, p. 25-35, 2021.

HERALDI, Eddy *et al.* Biosorbent from tomato waste and apple juice for lead removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 1201-1208, 2018.

JAVADIAN, Hamedreza; VAHEDIANB, Parisa; TOOSIB, Mohammad R. Adsorption characteristics of Ni (II) from aqueous solutions and Industrial wastewater onto Polyaniline /HMS nanocomposite powder. **Applied Surface Science**, v. 284, p. 13-22, 2013.

JAWAD, Ali H. *et al.* Adsorption of methylene blue onto coconut (*Cocos nucifera*) leaf: optimization, isotherm and kinetic studies. **Desalination Water Treatment**, v. 57, n. 19, p. 8839-8853, 2016.

KURNIAWAN, T. A. *et al.* Comparisons of low-cost adsorbents for treating wastewaters laden with heavy metals. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 366, p. 409-426, 2006.

KURODA, E.K. *et al.* Caracterização e escolha do tipo de carvão ativado a ser empregado no tratamento de águas contendo microcistinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

KYSAS, G.; LAZARIDIS, N. K.; KOSTOGLU, M. Adsorption/desorption of a dye by a chitosan derivative: Experiments and phenomenological modeling. **Chemical Engineering Journal**. v. 248, p. 327-336, 2014.

LAGERGREN, S. Zurtheorie der sogenannten adsorption gel-stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. **Handlingar**, v. 24, n. 4, 1898.

LESMANA, S.O. *et al.* Studies on potential applications of biomass for the separation of heavy metals from water and wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 44, n. 1, p. 19-41, 2009.

MALVESTIO, A. C. **Estudo da adsorção de ácidos graxos voláteis através de troca iônica em ensaios em batelada e coluna de leito fixo**. 2010. 71f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARELLA, M.S.F.; DA SILVA, M.G.C. Processo de remoção de cádmio em zeólita. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, UNICAMP, São Paulo, 2005. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2005.

McCABE, W. L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Operations of Chemical Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1993. 1028 p.

McKAY, G.; EL GEUNDI, M.; NASSAR, M. M. Pore diffusion during the adsorption of dyes onto bagasse pith. **Process safety and environmental protection**, v. 74, n. 4, p. 277-288, 1996.

McQUARRIE, D. A.; SIMON, J. D. **Physical Chemistry: a molecular approach**. [S. l.]: University Science Book, 1997.

MORAES, Sandra L. *et al.* Cenário brasileiro da geração e uso da biomassa adensada. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 4, p. 1-16, abr. 2017.

MELO, K. R. B. *et al.* Obtenção de curvas de ruptura na adsorção de azul de metileno em carvão ativado do endocarpo do coco. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. UFScar, São Carlos, 2017. **Anais...** São Carlos: UFScar, 2017.

MEZZARI, Isabella A. *et al.* **Utilização de carvões adsorventes para o tratamento de efluentes contendo pesticidas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

MONARIN, M.S. **Estudo da adsorção e dessorção do corante têxtil Crimson Hexl empregando diferentes carvões ativados**. 2012. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade do Oeste do Paraná, Toledo, 2012.

MOPOUNG, Rerngnaporn; KENGKHETKIT, Nanthaya. Lead and cadmium removal efficiency from aqueous solution by NaOH treated pineapple waste. **International Journal of Applied Chemistry**, v. 12, n. 1, p. 23-35, 2016.

MOR, Suman; CHHODEN, Kalzang; RAVINDRA, Khaiwal. Application of agro-waste rice husk ash for the removal of phosphate from the wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 673-680, 2016.

NASCIMENTO, R.F. *et al.* **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Fortaleza: Editora UFC, 2014.

NG, W. K. *et al.* Nutritive value of palm kernel meal pretreated with enzyme or fermented with *Trichoderma koningii* (Oudemans) as a dietary ingredient for red hybrid tilapia (*Oreochromis sp.*). **Aquacult. Res.**, v. 33, p. 1199-1207, 2002.

OKOROCHA, N. J. *et al.* Utilization of Agro-Waste T in the Elimination of Dyes from Aqueous Solution: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies. **International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy**, v. 86, p. 11-23, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade.** 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org.br/dacatb.asp>>. Acesso em: 13 set. 2021, 14:35:00

PENAFIEL, M. E. *et al.* Corn cobs as a potentially low-cost biosorbent for sulfamethoxazole removal from aqueous solution. **Separation Science and Technology**, v. 55, n. 17, p. 3060-3071, 2020.

PEREIRA, Marcos G. *et al.* Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 508-514, 2010.

PINO, G.A.H. **Biossorção de metais pesados utilizando pó de casca de coco (cocos nucifera).** 2005. 113f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br>>. Acesso em: 30 out. 2021, 10:20:00.

PLAZINSKI, W.; RUDZINSKI, W.; PLAZINKA, A, Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. **Adv Colloid Interface Sci**, v. 152, p. 2-13, 2009.

RASHID, Jamshaid *et al.* Synthesis using natural functionalization of activated carbon from pumpkin peels for decolorization of aqueous methylene blue. **Science of the Total Environment**, v. 671, p. 369-376, 2019.

RIBEIRO, Geysa A. C. *et al.* **Remoção dos corantes têxteis violeta brihanteremazol e turquesa remazol por adsorção em casca de arroz.** 2012. 110f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012.

ROSA, Israel A.; DE MELLO RODRIGUES, Marina C.; DE FÁTIMA, Sabrina P. Remoção de azul de metileno em biocarvões de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar. **Sustentare**, v. 3, n. 1, p. 64-74, 2019.

ROSALES, Emilio *et al.* Challenges and recent advances as low cost: From batch assays to continuous-flow systems. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 176-192, 2017.

- ROYER, B. **Remoção de corantes têxteis utilizando casca de semente de Araucária Angustifolia como bioissorvente**. 2008. 68f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SANTOS, Sílvia C. R.; BOAVENTURA, Rui A. R. Adsorption modelling of textile dyes by sepiolite. **Applied Clay Science**, v. 42, p. 137-145, 2008.
- SCHETTINO JUNIOR, M. A. **Ativação química do carvão de casca de arroz utilizando NaOH**. 2004. 79f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- SCHIMMELL, D. **Adsorção dos corantes Azul 5g e Azul Turquese QG em carvão ativado comercial**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.
- SILVA, N.P. **Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacal**. 2015. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- ŠIMON, P. *et al.* Near-infrared reagents for fibre-optic ammonia sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 39, n. 1-3, p. 252-255, 1997.
- SING, K.; ROUQUEIROL, J. **Adsorption by powders and porous solids**. San Diego: Academic Press, 1999.
- SUN, G.; XIN JING, X. Sunflower Stalks as Adsorbents for Color Removal from Textile Wastewater. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 36, p. 808-812, 1997.
- TAN, L.; HAMEED, B.H. Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solutions. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 74, p. 25-48, 2017.
- TADINI, Carmen C. *et al.* **Operações unitárias na indústria de alimentos**. [S. l.]: LTC, 2016.
- TEIXEIRA, Viviane G.; COUTINHO, Fernanda; GOMES, Ailton S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 808-818, 2001.
- TEJADA-TOVAR, Candelaria; VILLABONA-ORTÍZ, Ángel; GONZALEZ-DELGADO, Ángel D. Adsorption of Azo-Anionic Dyes in a Solution Using Modified Coconut (Cocos nucifera) Mesocarp: Kinetic and Equilibrium Study. **Water**, v. 13, n. 10, p. 1382, 2021.
- TÓTH, Ajna *et al.* Interaction of phenol and dopamine with commercial MWCNTs. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 364, n. 2, p. 469-475, 2011.

VAGHETTI, J.C.P. **Utilização de biossorventes para remediação de efluentes aquosos contaminados com íons metálicos**, 2009. 99f. Tese (Doutorado em Química) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VASQUES, Andressa R. *et al.* **Caracterização e aplicação de adsorvente para a remoção de corantes de efluentes têxteis em batelada e colunas de leito fixo**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

VEGLIO, F.; BEOLCHINI, F.; PRISCIANDARO, M. Sorption of copper by olive mill residues. **Water Research**, v. 37, n. 20, p. 4895-4903, 2003.

WEBER, Walter J. **Physicochemical process for water quality control**. New York: Wiley-Interscience, 1972. p. 199-255.

WORCH, E. **Adsorption technology in water treatment: Fundamentals processes and modeling**. Berlim: Walter de Gruyter GmbH & Co., 2012.

ZIATI, Mounir *et al.* Removal of polyphenols from olive mill wastewater by adsorption on activated carbon prepared from peach stones. **Rev.Roum.Chim.**, v. 62, n. 11, p. 865-874, 2017.