



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

**DÉBORA TAVARES**

**AVALIAÇÃO DO PODER ADSORTIVO DA PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia tuna*  
*Mill*) PARA USO EM REMOÇÃO DE CONTAMINANTES  
HIDROGENOCARBONADOS EM CORPOS D'ÁGUA**

**SUMÉ-PB**

**2016**

**DÉBORA TAVARES**

**AVALIAÇÃO DO PODER ADSORTIVO DA PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia tuna*  
*Mill*) PARA USO EM REMOÇÃO DE CONTAMINANTES  
HIDROGENOCARBONADOS EM CORPOS D'ÁGUA**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ao curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

**Orientadora: Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima**

**SUMÉ-PB**

**2016**

T231a Tavares, Débora.

Avaliação do poder adsorptivo da palma forrageira (*Opuntia tuna* Mill) para uso em remoção de contaminantes hidrocarbonados em corpos d'água. / Débora Tavares. Sumé - PB: [s.n], 2016.

44 f.

Orientadora: Professora Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

1. Adsorção em Tratamento de efluentes. 2. Óleo Lubrificante Contaminado. 3. Tratamento da água. 4. Palma forrageira (*Opuntia tuna* Mill). 5. Operações unitárias. 6. Secagem de biomassa. I. Título.

CDU: 66.081.312(043.1)

**DÉBORA TAVARES**

**AVALIAÇÃO DO PODER ADSORTIVO DA PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia tuna*  
*Mill*) PARA USO EM REMOÇÃO DE CONTAMINANTES  
HIDROGENOCARBONADOS EM CORPOS D'ÁGUA**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ao curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

**BANCA EXAMINADORA**



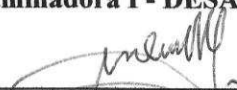
---

**Profª. Drª. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima**  
**Orientadora - UAEB/CDSA/UFCEG**



---

**Profª. Drª. Lígia Maria Ribeiro Lima**  
**Examinadora I - DESA/CCT/UEPB**



---

**Profº. Dr. Paulo da Costa Medeiros**  
**Examinador II - UATEC/CDSA/UFCEG**

Aprovado em: 20 de Junho de 2016.

**À minha família e aos meus amigos.  
Viver é uma fascinante aventura e é com  
eles que quero compartilhar os mais  
atrevidos e sedutores momentos.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço pela minha vida e por todas as bênçãos recebidas. Ele é a força que me guia.

Aos meus pais, Adalberto e Maria José, que me ensinaram que a vida deve ser vivida com responsabilidade, sem deixar de lado a dose de aventura e as novas descobertas a cada dia. Os laços que nos unem são da fibra mais forte que pode existir: o amor.

A Tia Lene, que tem por mim um amor de mãe. Sinto-me refugiada com ela, que tem sempre um sorriso, uma palavra de conforto e a melhor comida do mundo.

Aos meus irmãos Carlos Alberto e Antônio que, mesmo com tanta “brabeza”, conseguem ser amáveis. A minhas irmãs, Danielle e Deise, parceiras para todas as horas, e que me ajudaram muito todos esses anos em que estive longe de casa.

À minha cunhada Elaine e ao meu sobrinho José Carlos, que me distraíram bastante em momentos em que estava aperreada com os afazeres do curso.

À minha família Biotec 2011.1, Anderson, Bartira, Carla, Daniel, Edgleiga, Éryka, Fagner, Izabela, Jéssica Fernandes, João Socorro, Lorrany, Luana, Magali, Jéssika, Ozires, Renato, Joanny, Rosilândia, Sendy, Thalita, Vanessa Farias, Vanessa Oliveira, William. Com eles vivi momentos muito intensos durante esses cinco anos, extremas alegrias e também decepções. Tudo isto nos uniu apesar das diferentes personalidades. De estudos a farras, todos os momentos foram bem aproveitados.

A Anderson Steyner, pela paciência que tem comigo, e por todas as ajudas ao longo desses anos de graduação.

A Jéssica Fernandes, que foi como uma irmã, dividimos muitas preocupações, e muitas vezes estávamos felizes por coisas tão simples. Às egípcias arretadas Luana, Rosilândia e Izabela, enquanto morei sozinha elas foram minhas companhias e a nossa amizade já era fato a ser consumado. A Thalita, pelos muitos cafés e por todas as vezes que me ajudou.

Aos meus amigos, praticamente três mosquiteiros, Anderson, Fagner e Renato, parceiros para o “crime”. Entendem-me e conhecem-me como ninguém, foram muitos desabafos durante esses cinco anos e tenho certeza que essa amizade tem bases consolidadas.

A Anchieta Barros e a Neide Lucena, por terem me acolhido na chegada em Sumé, sou imensamente grata.

A Daniele Joyce e Alice Pinheiro, dividimos apartamento, sonhos e problemas. Certamente me farão muita falta. E a Dayse Freitas, por ser a presença radiante da nossa casa.

A todos os professores do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, por todos os conhecimentos repassados ao longo destes cinco anos. Em especial a minhas orientadoras de monitoria Joelma Sales, Fabiana Pimentel, Normanda Lino e Glauciane Coelho.

A Profa. Dra. Líbia Conrado, pela oportunidade de estágio, excelente supervisão e a atenção que dedicou para que pudesse fixar os conhecimentos adquiridos durante o estágio, lembrando sempre “Tudo pelo bem geral da Ciência”.

À equipe de adsorção da UFCG, Câmpus Sumé: Alysson, Fagner, Jayane, Joanny e Thalita, uma equipe unida em torno de um mesmo objetivo. À equipe de adsorção da UEPB, em nome da professora Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima, que nos recebeu de braços abertos e repassou experiências e conhecimentos.

À professora Dra. Vera Lúcia Meira de Moraes Silva da UEPB, pela ajuda na aplicação da modelagem de adsorção.

Ao professor Dr. Ranoel Gonçalves, pela disponibilização das palmas para os estudos de adsorção e à professora Dra. Adriana Vital, coordenadora do Laboratório de Solos – LASOL, pela disponibilização do espaço para realização dos experimentos.

E, por último, tenho o imenso prazer de agradecer à minha orientadora, Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima. Pelas orientações durante o PIBIC, o estágio e o Trabalho de Conclusão de Curso. E por todas as oportunidades de conhecimento proporcionadas durante este processo.

*“Há uma força motriz, mais poderosa que  
o vapor, a eletricidade e a energia  
atômica: a vontade.”*

*Albert Einstein*



## RESUMO

Compostos orgânicos tais como óleos lubrificantes, são poluentes de difícil degradação e liberados constantemente em efluentes como resultado de diversas atividades industriais. A adsorção é uma das operações unitárias que tem apresentado eficiência na remoção deste tipo de contaminante dos efluentes. A busca por adsorventes de menor custo tem apresentado as biomassas vegetais como opções eficientes, econômicas e sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência adsortiva da biomassa palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*), obtida a partir de dois processos de secagem convectiva (secagem em secador de leito fixo e secagem natural), quando utilizada para remoção de óleo lubrificante usado ou contaminado presente em águas de descarte de lava-jatos automotivos. Na metodologia utilizada, para a obtenção da biomassa na forma particulada, após cada etapa de secagem, a palma passa por cominuição à forma de pó para seleção granulométrica das partículas. Seguiu-se com o estudo da cinética de adsorção, em que foram avaliados os tempos de 5 a 60 minutos (com intervalos de 5 min.) e o equilíbrio, cujas concentrações de contaminante variaram de 5 a 60% (com taxa de variação de 5%). Como resultado observou-se que a cinética de adsorção foi rápida, com a eficiência adsortiva sendo maior nos primeiros minutos do experimento para a palma obtida por meio dos dois processos de secagem. O equilíbrio foi alcançado, com valores de adsorção baixos e próximos entre si. A isoterma de Langmuir ajustou-se melhor aos dados de adsorção da palma seca ao natural. O maior valor de adsorção de contaminante obtido a partir da palma seca a 70°C foi 4,164 g.g<sup>-1</sup>. Para a palma seca ao natural a maior quantidade foi de 3,865 g.g<sup>-1</sup> no equilíbrio. Portanto, os dois processos de secagem podem ser utilizados para obtenção de palma forrageira para uso como adsorvente. A palma caracteriza-se como uma importante alternativa para remoção de contaminantes de efluentes com baixas concentrações de óleo lubrificante contaminado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adsorção em Tratamento de efluentes. Óleo Lubrificante Contaminado. Tratamento da água. Palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*). Operações unitárias. Secagem de biomassa.

## ABSTRACT

Organic compounds such as lubricating oils are pollutants difficult to degrade and steadily released in wastewater as a result of various industrial activities. Adsorption is one of the unit operations that has shown efficiency in removing this type of contaminant effluents. The search for adsorbents lower cost is presented as plant biomass as efficient, economic and sustainable options. The objective of this study was to evaluate adsorptive efficiency of cactus pear forage biomass (*Opuntia tuna Mill*), obtained from two convective drying processes (drying in fixed bed dryer and natural drying), when used for removal of contaminated lubricating oil, present in sewage water of automotive car washes. In the methodology used, to obtain the biomass in particulate form, after drying, cactus pear forage was submitted to comminution to powder form for particle size selection. This was followed by studying the adsorption kinetics, which evaluated times of 5 to 60 minutes (at 5 min intervals) and equilibrium, whose contaminant concentrations ranged from 5 to 60% (range rate 5%). As a result it was observed that adsorption kinetics is fast with adsorptive efficiency is higher in first minutes of experiment to cactus pear forage obtained by two drying processes. The equilibrium was achieved, with adsorption values low and close to each other. Langmuir isotherm adjusted better to adsorption data of cactus pear forage natural dry. The major contaminant adsorption amount obtained from cactus pear forage dried at 70 °C was 4,164 g.g<sup>-1</sup>. For dry natural cactus pear forage the greatest amount was 3,865 g.g<sup>-1</sup> at equilibrium. Therefore, both drying methods may be used for obtaining cactus pear forage for use as an adsorbent. Cactus pear forage is characterized as an important alternative for removal of contaminants of effluents with low concentrations contaminated lubricating oil.

**KEYWORDS:** Adsorption in effluents treatment. Contaminated Lubricating Oil. Water treatment. Cactus pear forage (*Opuntia tuna Mill*). Unit operations. Drying of biomass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantio de Palma <i>Opuntia tuna</i> Mill. ....	26
Figura 2 - Fluxograma das etapas gerais da metodologia utilizada.....	27
Figura 3 - Palma ( <i>Opuntia tuna</i> Mill) cortada em cubos, dispostos em cesta metálica para posterior secagem em secador de leito fixo.....	28
Figura 4 - Secador de leito fixo. ....	29
Figura 5 - Palma cortada disposta em bandejas para etapa de secagem exposta a céu aberto. ....	30
Figura 6 - Frascos Erlenmeyer contendo a mistura água, óleo e biomassa em agitação a 130 rpm e temperatura constante para obtenção das isotermas de equilíbrio. ....	32
Figura 7 - Ajuste da curva experimental da secagem, para a equação de Page. Razão da umidade em função do tempo para a secagem a 70°C em secador de leito fixo.....	33
Figura 8 - Cinética de adsorção da palma orelha de elefante mexicana ( <i>Opuntia tuna</i> ) seca em secador de leito fixo a 70°C. Quantidade de óleo adsorvida $q$ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) em função do tempo (min). ....	35
Figura 9 - Cinética de adsorção da palma orelha de elefante mexicana ( <i>Opuntia tuna</i> ) seca ao natural. Quantidade de óleo adsorvida $q$ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) em função do tempo (min).....	35
Figura 10 - Isoterma de adsorção para biomassa de palma ( <i>Opuntia tuna</i> ) seca a 70°C ajustada ao modelo de Langmuir.....	36
Figura 11 - Isoterma de adsorção para biomassa de palma ( <i>Opuntia tuna</i> ) seca ao natural, ajustada ao modelo de Langmuir.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de ajuste do modelo matemático aplicado. Valores do coeficiente de correlação (R <sup>2</sup> ) obtidos pelo ajuste do modelo matemático aos dados da cinética de secagem da palma <i>Opuntia tuna</i> . .....	34
--	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAM	Metabolismo Ácido das Crassuláceas
CDSA	Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Oxigênio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
g	Gramas
h	Hora
m	Metro
mg	Miligrama
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
OLUC	Óleo Lubrificante Contaminado
PB	Paraíba
pH	Potencial Hidrogeniônico
rpm	Rotação Por Minuto
s	Segundo
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
3.1 ATIVIDADE INDUSTRIAL E IMPACTO AMBIENTAL .....	17
3.2 ÓLEO LUBRIFICANTE.....	18
<b>3.2.1 Óleo lubrificante contaminado (OLUC).....</b>	<b>19</b>
3.3 SECAGEM.....	20
3.4 ADSORÇÃO .....	22
<b>3.4.1 Isoterma de Langmuir .....</b>	<b>24</b>
3.5 BIOMASSA ADSORVENTE.....	25
<b>3.5.1 Palma orelha de elefante mexicana (<i>Opuntia tuna Mill</i>) .....</b>	<b>25</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 MATERIAIS .....	27
4.2 METODOLOGIA.....	27
<b>4.2.1 Obtenção da biomassa de palma forrageira na forma seca.....</b>	<b>28</b>
4.2.1.1 <i>Secagem convectiva em secador de leito fixo.....</i>	28
4.2.1.2 <i>Secagem convectiva ao natural.....</i>	30
<b>4.2.2 Obtenção da biomassa de palma forrageira na forma particulada .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.3 Cinética de Adsorção.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.4 Estudo do Equilíbrio .....</b>	<b>31</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
5.1 SECAGEM CONVECTIVA EM SECADOR DE LEITO FIXO .....	33
5.2 SECAGEM CONVECTIVA AO NATURAL .....	34
5.3 CINÉTICA DE ADSORÇÃO .....	34
5.4 EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO.....	36
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao acelerado desenvolvimento econômico e intensa atividade industrial e comercial, o meio ambiente vem sendo constantemente agredido, principalmente pela poluição das águas por hidrocarbonetos derivados do petróleo (PEREIRA; FREIRE, 2005; TIBURTIUS; ZAMORA, 2004).

As adições dessas substâncias às águas as tornam impróprias para os diferentes usos a que se destinam. Alguns dos hidrocarbonetos que mais contribuem para a poluição dos corpos aquáticos são aqueles que constituem o óleo lubrificante descartado em lava-jatos automotivos (LIMA, 2014).

Diante deste cenário, os processos de adsorção surgem como uma importante alternativa para o pré-tratamento de efluentes provenientes destas indústrias, demonstrando eficiência nos processos de purificação e separação nas áreas petrolíferas da química fina e da biotecnologia (SOUZA *et al.*, 2011).

O processo de adsorção tem demonstrado ser um método eficiente e econômico no tratamento de efluentes com poluentes orgânicos, sendo necessária a pesquisa de materiais de baixo custo para ser utilizado industrialmente. O sucesso da adsorção como processo de separação depende da escolha do material adsorvente e da otimização das variáveis do processo (LIMA, 2010).

O fenômeno de adsorção consiste na adesão de um soluto na superfície de um sólido adsorvente, fundamentado na tensão superficial das soluções. Tal processo compreende a difusão do soluto através de uma película estagnada que envolve partículas do adsorvente, a difusão dentro dos poros do suporte sólido, seguido finalmente da etapa de purificação que pode ser de natureza física ou química (KILIKIAN, 2005).

Por muito tempo o carvão ativado tem sido um dos materiais mais utilizados como adsorvente devido à sua elevada capacidade de adsorção, entretanto, este possui um elevado custo industrial, resultando na necessidade de novas pesquisas para elaboração de métodos mais econômicos. Neste contexto, as biomassas adsorventes também denominadas biossorventes representam uma alternativa sustentável e de menor custo quando empregadas nos processos de adsorção (SANTOS; ALSINA; SILVA, 2007). São materiais orgânicos tais como resíduos agrícolas, sabugo de milho, serragem de madeira, mesocarpo de coco, bagaço de cana-de-açúcar e sisal, dentre outros (CARVALHO, 2014).

A aplicação de uma biomassa como adsorvente torna necessária a remoção parcial ou total da água, presente nos poros do sólido, obtendo valores de umidade baixos que possibilitem o fenômeno de adsorção (FIORENTIN, 2012). As moléculas de água ligadas à superfície podem prejudicar o processo adsorvente; portanto, estudar as condições sob as quais ocorre a secagem pode fornecer indícios sobre a aplicação do material como adsorvente (SCHEUFELE, 2014). A secagem assegura alguns benefícios, dentre eles o aumento da qualidade e estabilidade do produto, diminuindo a atividade biológica, bem como as mudanças físicas e químicas que podem vir a ocorrer durante o armazenamento do material aumentando, assim, o período de vida útil do produto (ARAL; BESE, 2016; FIORENTIN, 2012).

A biomassa avaliada como adsorvente neste trabalho foi a palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*), que apresenta grande diversidade de usos e aplicações, revelando sua versatilidade que, apesar de ser cultivada no semiárido para alimentação animal, não tem sua potencialidade explorada plenamente. Em consequência, vêm sendo desperdiçadas excelentes oportunidades para melhoria dos índices sociais e econômicos desse espaço geográfico, mediante a geração de postos de trabalho, renda, oferta de alimentos e preservação ambiental (GALDINO *et al.*, 2010).

Por ser de fácil obtenção na região, além de resistente aos períodos de estiagem, a utilização da palma torna-se atrativa para aplicação na descontaminação de águas. Por isso, o estudo da biomassa de palma como adsorvente de substâncias orgânicas presentes em águas de descarte é de extrema importância para as comunidades do cariri paraibano, no que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico e humano da região, por contribuir para a diminuição dos impactos ambientais causados por este tipo de contaminação, bem como para fortalecer a agricultura local, fazendo uso de uma cultura tipicamente do semiárido (LIMA, 2014). O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência adsorvente da biomassa palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*) obtida a partir de dois processos distintos de secagem convectiva (secagem em secador de leito fixo e secagem natural) quando utilizada para remoção de óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) presente em águas de descarte de lava-jatos.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência adsortiva da biomassa palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*) obtida a partir de dois processos de secagem convectiva (secagem em secador de leito fixo e secagem natural) quando utilizada para remoção de óleo lubrificante usado ou contaminado presente em águas de descarte de lava-jatos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a secagem de palma (*Opuntia tuna Mill*) a partir de secagem convectiva em secador de leito fixo a 70°C e secagem convectiva natural, para análise da influência da temperatura na capacidade adsortiva da biomassa palma.
- Obter as curvas cinéticas para a caracterização da dinâmica de adsorção entre o adsorvente e a mistura água/óleo lubrificante contaminado.
- Estudar o poder adsortivo da palma quando colocada em contato com a mistura água/óleo lubrificante contaminado por meio das isotermas obtidas pela análise de equilíbrio.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 ATIVIDADE INDUSTRIAL E IMPACTO AMBIENTAL

Toda atividade que represente desenvolvimento tecnológico deve vir atrelada a uma preocupação com os impactos ambientais que poderão ser gerados. A elaboração de projetos com propostas ambientais consistentes, econômicas e eficientes poderão atuar diretamente na mitigação dos problemas causados por essas atividades. Entretanto, no cenário atual é possível observar que o equilíbrio entre atividade industrial e tratamento dos resíduos gerados ainda não foi atingido. Como resultado, o meio ambiente sofre os impactos destas atividades (SOUSA; COSTA, 2012).

A indústria do petróleo apresenta-se como uma das mais importantes geradoras de energia e de poluição ambiental. O petróleo é composto por complexas misturas de hidrocarbonetos, de diversos pesos moleculares e estruturas que variam de um gás leve (metano) até um sólido pesado. É constituído principalmente por átomos de hidrogênio e carbono, que são os elementos prevalentes, podendo incluir até 98% de alguns óleos crus e 100% de muitos produtos refinados (ALEIXO; TACHIBANA; CASAGRANDE, 2007).

O petróleo é separado em frações através de um processo de destilação, em que o ponto de ebulição do hidrocarboneto está relacionado ao seu número de átomos de carbono. A composição de cada fração é complexa e varia de acordo com as características do petróleo e da própria refinaria. Óleos e lubrificantes são hidrocarbonetos que compõem a fração mais pesada da destilação, são similares às frações médias em composição e relativamente mais viscosos e insolúveis em águas. Quanto ao número de átomos de carbono, estes compostos possuem mais de 14, e alguns podem ter mais de 30 (SILVA; BAHIA; CARVALHO, 2011).

Os combustíveis e óleos para motor, a exemplo dos óleos lubrificantes, caso não sejam adequadamente manuseados, podem ocasionar a contaminação de grandes áreas. O conceito de área contaminada compreende uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural (CETESB, 2016).

Quando se trata de poluição de corpos hídricos, observa-se que o crescente avanço da tecnologia industrial tem resultado na geração de águas residuárias perigosas que, se forem lançadas no sistema público de esgotos sem pré-tratamento adequado, afetam sua integridade

estrutural por conterem poluentes corrosivos, inflamáveis e explosivos (SOUZA; LIMA; SILVA, 2006).

Alguns dos hidrocarbonetos que mais contribuem para a poluição de corpos aquíferos são aqueles que constituem o óleo lubrificante descartado em lava-jatos automotivos.

### 3.2 ÓLEO LUBRIFICANTE

A função de um óleo lubrificante é diminuir o contato entre duas superfícies sólidas por meio da interposição de uma substância fluida, reduzindo o atrito fluido. Quando aplicado às máquinas, forma uma película impermeável entre as peças, promove redução do aquecimento e previne que aquelas em movimento provoquem atrito ou se desgastem (LIMA, 2009).

Segundo Azevedo (2005), os óleos lubrificantes automotivos podem também controlar a formação de depósitos, proteger contra corrosão, limpar componentes e manter a temperatura de operação correta entre as partes mecânicas de um motor que se movem relativamente entre si.

A lubrificação pode ser então definida como a redução da fricção e do desgaste que possibilita o movimento de duas superfícies de apoio devido à presença de um lubrificante, melhorando a suavidade do movimento de uma superfície em relação à outra (SIRENA, 2015).

Existe uma ampla variedade de óleos lubrificantes, para diversas aplicações; portanto, estes podem apresentar vasta composição, contendo moléculas de variados tamanhos, formatos e composição química bem conhecida como nitrogênio, enxofre e metais (AZEVEDO, 2005). São materiais moles e deformáveis que apresentam ligações secundárias fracas (LIMA, 2009). Em geral, os óleos lubrificantes são compostos pela mistura de diferentes frações de óleos básicos, que lhes atribui a viscosidade desejada, e pela adição de aditivos, que são compostos químicos orgânicos ou inorgânicos, cuja função é acrescentar e/ou reforçar determinadas características ou, ainda, eliminar propriedades indesejadas (MOREIRA, 2007).

Os principais aditivos empregados em lubrificantes são detergentes, dispersantes, agentes antidesgaste, inibidor de oxidação e corrosão, abaixador do ponto de fluidez, melhoradores de índices de viscosidade e anti-espumantes. Estes aditivos podem conter em sua composição sulfonatos, fenóxidos, cálcio, magnésio e bário, além de dialquil ditiofosfato de zinco ou uma composição unicamente de natureza orgânica, podendo apresentar

tetraetileno pentamina do ácido poli-isobutenil succínico, polímeros à base de metacrilato e copolímeros diversos (GUIMARÃES, 2006).

Os óleos podem ser categorizados seguindo basicamente dois tipos de classificação: a proposta por engenheiros, relacionando-se à sua composição, desempenho e propriedades físico-químicas (densidade, viscosidade), voltadas para as áreas de produção e refino. E aquela proposta por geólogos, que enfatizam a composição, sendo voltada para a origem, o grau de evolução térmica e os processos de alteração a que o petróleo foi submetido. Dentre as classificações de caráter geológico, uma das mais usadas é a proposta por Tissot e Welte, formulada em 1978, que divide os óleos em seis tipos: parafínicos, parafínico-naftênicos, naftênicos, aromáticos intermediários, aromático-asfálticos e aromático-naftênicos. Os óleos também são comumente chamados de leves ou pesados quando suas densidades são respectivamente, menores ou maiores do que a de água (GEOLOGIA..., 2014).

Os óleos básicos que constituem os lubrificantes podem ser de origem mineral ou sintética. Os óleos minerais são produzidos diretamente a partir do refino do petróleo, são mais baratos, mais versáteis, e mais facilmente inseridos no processo de rerrefino, por isso, geralmente são os mais empregados em lubrificação (GERENCIAMENTO..., 2007). Já os óleos sintéticos são produzidos em plantas de fábricas, permitindo que sejam obtidas características específicas mais adequadas, tais como resistência à oxidação/envelhecimento e poder lubrificante (MOREIRA, 2007).

### **3.2.1 Óleo lubrificante contaminado (OLUC)**

Segundo o Artigo 2º, inciso IX da resolução nº 362, de 23 de junho de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), óleo lubrificante usado ou contaminado é o óleo que em virtude das condições de uso, ou por motivo de contaminação, tenha se tornado inadequado à sua finalidade original. É considerado resíduo perigoso, devido à sua toxicidade, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR – 10004 (Classificação: Resíduo sólido).

O óleo lubrificante contaminado apresenta caráter viscoso e coloração preta e, embora tenha suas propriedades afetadas, não perde a sua capacidade lubrificante. Dentre os compostos responsáveis pela contaminação do óleo lubrificante estão água, produtos voláteis, partículas sólidas, compostos solúveis e compostos insolúveis (MYAMURA; LIMA, 2011).

Durante o seu uso o óleo lubrificante pode ainda sofrer reações químicas que resultam no óleo lubrificante contaminado (MYAMURA; LIMA, 2011), tais como:

- Oxidação da superfície metálica
- Oxidação de hidrocarbonetos e formação de ácidos
- Polimerização de hidrocarbonetos e formação de filmes resinosos
- Hidrólise de aditivos
- Oxidação dos aditivos
- Interação dos componentes

Quando não desempenha mais o seu devido papel, o óleo lubrificante deverá ser substituído e destinado ao processo de reciclagem, no qual serão empregados tratamentos adequados que permitam a reutilização do mesmo, por exemplo, o processo de rerrefino (GUERRA *et al.*, 2012).

Entretanto, nem sempre o óleo é descartado de maneira adequada e pode contaminar corpos aquáticos, aquíferos e/ou atingir o solo. Por não ser biodegradável, o OLUC passa dezenas de anos para ser degradado no ambiente podendo gerar problemas ambientais gravíssimos. Quando há vazamento que atinge o solo, este o inutiliza, tanto para agricultura quanto para edificação, causa danos à vegetação e microrganismos, destruindo o húmus e levando a um desequilíbrio do ecossistema. Caso seja descartado em corpos aquáticos, apenas 1 litro de OLUC pode atingir 1000 m<sup>2</sup> de superfície aquosa e contaminar um milhão de litros de água, comprometendo sua oxigenação. No esgoto, o óleo lubrificante poderá comprometer o funcionamento das estações de tratamento, chegando a alguns casos a interromper o funcionamento destas (GERENCIAMENTO..., 2007).

Devido a esta preocupação, atualmente o processo de adsorção vem sendo utilizado na tentativa de remover estes contaminantes orgânicos dos corpos d'água.

### 3.3 SECAGEM

A secagem é uma operação unitária que envolve a transferência de um líquido, que está em um sólido molhado, para uma fase gasosa insaturada, por meio de um mecanismo de vaporização térmica, constituindo um processo de transferência simultânea de calor e de massa (FOUST *et al.*, 2012).

Existem quatro fenômenos de transporte predominantes envolvidos na secagem: transferência interna e externa de calor e a transferência de massa interna e externa, a partir dos quais é possível descrever o processo de secagem (SIMAL *et al.*, 2004).

O processo de secagem pode ser realizado por métodos naturais e artificiais. A secagem natural consiste na exposição do produto úmido ao sol e ao vento, sem o controle das variáveis temperatura, velocidade do ar, umidade relativa e pressão. A secagem considerada artificial está relacionada ao controle das variáveis do processo e requer o uso de um equipamento de secagem adequado, a exemplo dos secadores (DOMENICO; CONRAD, 2015).

O método de secagem natural pode ser realizado geralmente em locais de clima seco, como a região do Mediterrâneo, a Noruega, o Canadá, a Califórnia (EUA) e o Nordeste Brasileiro. A movimentação do ar é feita pela ação do vento e a energia para evaporação de umidade provém do potencial de secagem do ar e da incidência direta da energia solar. A operação de secagem natural tem a vantagem de ser mais econômica; porém, é uma operação lenta e depende diretamente das condições climáticas. A depender das características do material a ser seco, o processo de secagem pode se estender por um longo período de tempo, o que dificulta a obtenção de dados para obter a cinética de secagem (DOMENICO; CONRAD, 2015; PITOMBO, 2005; SILVA, 2008).

A secagem artificial é uma operação que requer investimentos e possui um maior custo; no entanto, apresenta algumas vantagens quando comparada à secagem natural, como independência das condições climáticas, possibilidade de se estabelecer um programa de operação mais fácil e menor risco de deterioração do produto em função do tempo de secagem ser menor (MARTINS *et al.*, 2014).

O estudo da secagem de materiais abrange a determinação das curvas de secagem, bem como o conhecimento do comportamento higroscópico dos materiais. É essencial que ao final do processo de secagem, os produtos obtidos pelo processamento de materiais biológicos apresentem baixos teores de umidade, impossibilitando o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis (ANDREOLA, 2013). A importância da utilização dos processos de secagem baseia-se nos seguintes fatos: a facilidade para a conservação do produto, a proteção contra degradação enzimática e oxidativa, a redução do peso do produto, a economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano (LEITE *et al.*, 2016). É necessário, porém, avaliar as condições de secagem para que o processo não danifique a estrutura do material e não o torne inadequado para o uso desejado.

O comportamento dos sólidos em um processo de secagem está relacionado ao tipo de estrutura que apresentam, podendo ser classificados em duas categorias principais: sólidos granulares ou cristalinos e amorfos. Sólidos cristalinos caracterizam-se por manter a água em

estruturas pouco profundas, em poros superficiais bem abertos, diferentemente dos sólidos amorfos, fibrosos ou gelatinosos, nos quais a água constitui parte integral da estrutura molecular do material, estando fisicamente adsorvida ou retida em capilares (FOUST *et al.*, 2012; KILIKIAN, 2005).

Para compreensão dos processos de secagem podem-se empregar métodos teóricos, empíricos e semi-empíricos, a fim de descrever matematicamente o processo de secagem. Os métodos empíricos baseiam-se na utilização dos dados experimentais, concedendo informações apenas sobre as condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto. Entretanto, são importantes na elaboração de projetos (LEITE *et al.*, 2016). Os modelos semi-empíricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa (FIORENTIN, 2012), a exemplo do modelo de Page formulado em 1949, que é bastante utilizado para a representação da secagem de produtos agrícolas (PESSOA *et al.*, 2011). Os métodos teóricos, além de considerarem as condições externas sobre as quais acontece a secagem, permitem compreender os mecanismos internos da transferência de energia, massa e seus efeitos. Por exemplo, para a maioria dos produtos de origem agrícola, os mecanismos possíveis de transporte de umidade são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (MARTINAZZO *et al.*, 2007).

### 3.4 ADSORÇÃO

A atração entre espécies químicas, sejam elas gases ou líquidos, para a superfície de sólidos é a base para inúmeros processos de separação. Estes processos exploram um sólido com uma área superficial extremamente elevada e beneficia-se da afinidade de componentes específicos em um fluido para a superfície de um sólido. Este é conhecido como adsorvente e o componente atraído para a superfície é denominado adsorbato, interagindo no processo de adsorção (FELDER; ROUSSEAU 2005; RUTHVEN 1984). Geralmente estes sólidos apresentam partículas porosas e, quanto maior sua superfície externa, mais favorável a adsorção (RUTHVEN, 1984).

O fenômeno de adsorção, portanto, trata-se de um processo de transporte de massa, que envolve a transferência de um constituinte de um fluido para a superfície de uma fase sólida. Para completar a separação, o constituinte adsorvido deve então ser removido do sólido (FOUST *et al.*, 2012).

No estudo do processo de adsorção, vários fatores devem ser avaliados. A natureza físico-química do adsorvente pode influenciar de forma bastante significativa a capacidade de adsorção e também a velocidade em que ocorrerá a adsorção. As características do adsorbato também são imprescindíveis para determinar o comportamento do processo de adsorção, pois geralmente quanto menos uma substância é solúvel na solução, melhor ela é adsorvida. O tamanho da molécula também é importante visto que a velocidade é dependente do transporte intraparticular. A polaridade do adsorbato também influencia, já que um soluto polar terá mais afinidade pelo solvente ou adsorvente (DOMINGUES, 2005).

A importância granulométrica consiste no fato de que partículas com diâmetros inferiores contribuem para que a mistura apresente maior superfície de contato entre o adsorvente e o adsorbato (MARIN, 2015). Uma vez que os componentes adsorvidos concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for a superfície externa por unidade de massa sólida, melhor será a adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A adsorção pode ser de natureza física ou química. A adsorção física também conhecida como fisissorção, ocorre quando as interações entre as moléculas do meio e do sólido são fracas, com ligações do tipo intermoleculares, baseadas em forças de Van der Waals e/ou interações eletrostáticas, como as de dipolo, resultando em multicamadas adsorvidas. A adsorção química, quimissorção, ou adsorção ativa, ocorre quando há uma interação química entre a molécula do meio e a do sólido e, neste caso as forças de ligação são de natureza covalente ou até iônica, resultando apenas em uma camada monomolecular (GUELFÍ; SCHEER, 2007; KILIKIAN, 2005).

A cinética de adsorção descreve a velocidade de remoção do soluto, sendo dependente das características físicas e químicas do adsorbato, adsorvente e sistema experimental. A velocidade em que ocorrerá a adsorção é influenciada pela agitação, temperatura e pH da molécula e envolve etapas que podem ocorrer em velocidades diferentes. Estas etapas estão associadas à difusão do soluto nas partículas do adsorvente. As etapas são as seguintes: difusão das moléculas do adsorbato da solução para a superfície externa dos adsorventes (camada limite); adsorção das moléculas do adsorbato na superfície externa da partícula através de interações moleculares; difusão das moléculas do adsorbato da superfície externa para o interior da partícula (difusão efetiva) e adsorção no interior da partícula (LUZ, 2009).

O sistema experimental adsorbato-adsorvente é dito em equilíbrio quando, sob condições definidas, não houver variação na concentração da fase fluida e nem na concentração do adsorbato. O equilíbrio de fases pode ser representado por isotermas (curvas à temperatura constante que relacionam os dados entre a concentração do adsorbato e a massa



do adsorvente) ou por equações (CURBELO, 2002). É a partir do equilíbrio que determina-se a quantidade máxima de soluto que o adsorvente é capaz de adsorver. Por este motivo, para a obtenção das isotermas de adsorção devem-se utilizar concentrações fixas do adsorvente e variar apenas as concentrações do adsorbato (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Dentre os modelos mais utilizados, destaca-se a Isoterma de Langmuir, que explica a adsorção sobre uma superfície uniforme e não porosa.

### 3.4.1 Isoterma de Langmuir

Em geral uma isoterma de adsorção é uma curva a temperatura e pH constantes, utilizada para descrever o fenômeno que rege a retenção de uma substância aos poros de uma superfície sólida. A isoterma de Langmuir desenvolvida originalmente para descrever a adsorção de uma fase gasosa sobre carvão ativado vem sendo tradicionalmente utilizada para avaliar o desempenho de diversos biossorventes (FOO; HAMEED, 2010).

Em sua formulação, este modelo empírico admite que a adsorção ocorre em monocamada, existindo um número finito de sítios, os quais apresentam energias equivalentes, enquanto as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras e cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida (FOO; HAMEED, 2009; NASCIMENTO, 2014).

A Equação 1 descreve o modelo da isoterma de Langmuir, conforme descrito por Dada *et al.*, 2012:

$$q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

Parâmetros de adsorção de Langmuir, determinados por meio da transformação da equação de Langmuir para a forma linear, estão representados na Equação 2.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_0 K_L C_e} \quad (2)$$

Em que:

$C_e$  = concentração de equilíbrio do adsorbato ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

$q_e$  = quantidade de contaminante adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio ( $\text{g.g}^{-1}$ )

$Q_0$  = capacidade de cobertura máxima em monocamada ( $\text{g.g}^{-1}$ )

$K_L$  = constante da isoterma de Langmuir ( $L \cdot g^{-1}$ )

### 3.5 BIOMASSA ADSORVENTE

O termo biomassa está relacionado a toda matéria de origem vegetal, seja ela da floresta nativa ou plantada, às culturas agrícolas e seus resíduos. Quando utilizada para fins adsorptivos é denominada biomassa adsorvente, enquadrando-se também ao termo biossorvente, caracterizado como toda a biomassa com atividade metabólica ativa ou inativa de origem biológica. A preparação de um biossorvente é feita por meio de tratamentos físicos a baixo custo tais como lavagem, secagem, trituração e peneiramento (FONTES, 2014).

Atualmente vêm sendo utilizadas as mais variadas espécies de biomassas vegetais nas pesquisas de descontaminação de águas por substâncias orgânicas. No caso do semiárido nordestino, há uma grande variedade de espécies de vegetação que podem ser estudadas para aplicação como adsorventes, dentre estas a palma forrageira, nos seus diferentes gêneros.

#### 3.5.1 Palma orelha de elefante mexicana (*Opuntia tuna* Mill)

Introduzida no Brasil durante o período de colonização para a produção de corantes, a palma (*Opuntia*) é uma cultura originária do México, amplamente cultivada em todo o mundo (SANTOS *et al.*, 2011).

As palmas do gênero *Opuntia* apresentam uma série de características anatômicas e morfofisiológicas que lhes conferem boa adaptabilidade e boas condições de cultivo na Região Nordeste do Brasil, sendo as maiores áreas de cultivo encontradas nos estados de Alagoas, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Sergipe (LEITE, 2014).

No estado da Paraíba o cultivo da palma forrageira pode ser realizado em todo o território, exceto na zona costeira da mesorregião do Litoral Paraibano e no brejo de altitude em torno do município de Areia, no Agreste Paraibano. É utilizada principalmente para a produção de forragens e para alimentação do gado. Seu cultivo não exige condições dispendiosas, mas não dispensa tratos culturais básicos, tais como fertilização, controle de plantas daninhas, doenças e pragas, como a cochonilha de escama (*Pinnaspis aspidistrae*) e a cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae*) (BEZERRA *et al.*, 2014).

O sucesso agroecológico da palma forrageira em regiões que sofrem estiagens periódicas pode ser explicado pelo fato de ser uma planta xerófila detentora do processo fotossintético Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM). Para as CAM, o fechamento dos

estômatos ocorre durante o dia e abertura à noite, com a fixação de CO<sub>2</sub>, o que resulta em economia hídrica devido às temperaturas mais baixas e a umidade ser mais alta (DONATO *et al.*, 2013; NOBEL, 2001).

A composição química pode variar de acordo com a espécie, idade, época do ano e tratos culturais. A palma é rica em carboidratos não fibrosos e cinzas, embora apresente baixos teores de proteína bruta e fibra em detergente neutro. Contém, em média, 90 % de água, exibindo variação no teor de umidade, conforme a época do ano, entre 76% em plena estiagem até 95% no período de chuva (LIMA, 2013).

Apesar de ser principalmente utilizada como forragem para alimentação animal, a palma apresenta uma série de potencialidades que, em sua maioria, não são plenamente exploradas. Dentre as possibilidades de utilização da palma estão alimentação humana, como fonte de energia, na medicina, na indústria de cosméticos, na proteção e conservação do solo, corantes, mucilagem e ornamentação (NUNES, 2011).

O uso de variedades resistentes à cochonilha do carmim tem recebido atenção especial, uma vez que esta praga vem causando problemas com dimensões catastróficas para o plantio da palma forrageira. Dentre os clones selecionados resistentes à cochonilha do carmim destaca-se o clone Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia tuna Mill.*), ilustrada na Figura 1 (QUEIROZ, 2014).

Figura 1 - Plantio de Palma *Opuntia tuna Mill.*



Fonte: Próprio autor, 2016.

Seu cultivo vem sendo incentivado por meio de divulgação, pesquisa e inovação, no intuito de inserir esta cultura como uma proposta de política pública sustentável (INSA, 2013).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

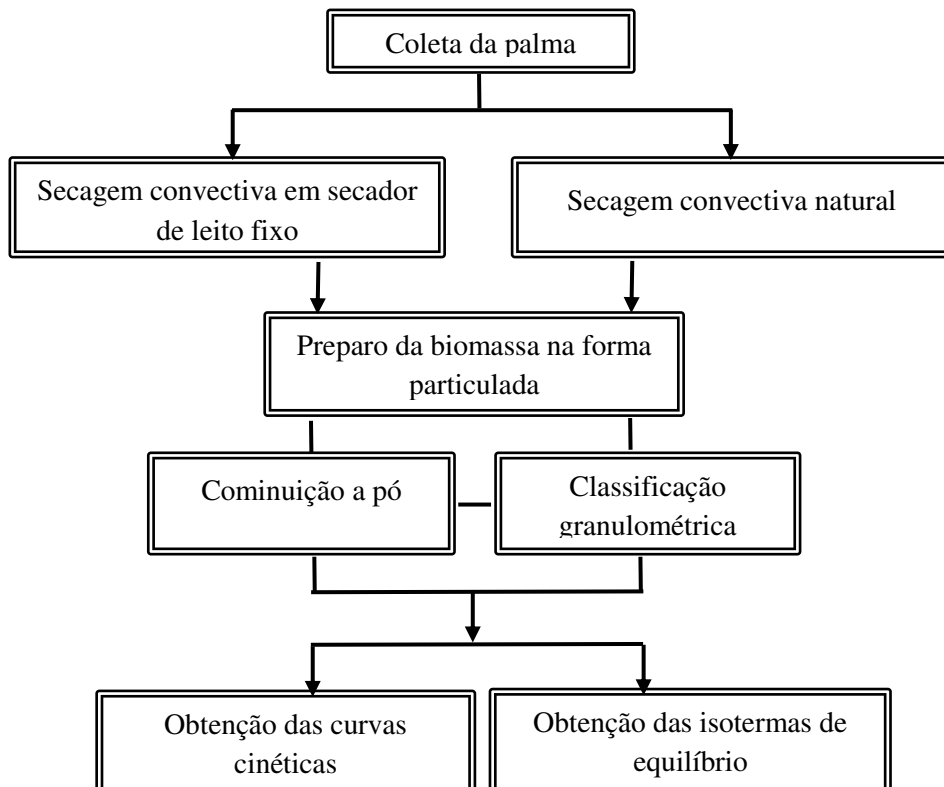
O contaminante orgânico utilizado foi o óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC), resíduo gerado da atividade de oficinas e lava-jatos presentes no município de Sumé-PB. Como adsorvente foi utilizada a palma forrageira (*Opuntia Tuna Mill*) na forma particulada.

### 4.2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Câmpus de Sumé – PB e no Laboratório de Processos Químicos da UFCG, Câmpus de Campina Grande – PB.

Na Figura 2, o fluxograma apresenta de forma geral, todas as etapas da metodologia desenvolvida neste trabalho, desde a coleta da palma, sua destinação aos processos de secagem, a obtenção da biomassa na forma particulada e o estudo da cinética e do equilíbrio.

Figura 2 - Fluxograma das etapas gerais da metodologia utilizada.



#### 4.2.1 Obtenção da biomassa de palma forrageira na forma seca

A palma forrageira (*Opuntia tuna*) foi coletada de um plantio da Universidade Federal de Campina Grande, Câmpus de Sumé. Foi submetida a dois processos distintos de secagem convectiva: secagem convectiva em secador de leito fixo, na qual o comportamento da secagem foi estudado a diversas temperaturas e, a partir disto, determinou-se a temperatura de 70 °C para condução da secagem utilizada na obtenção da biomassa de palma forrageira para os experimentos de adsorção, e a secagem convectiva ao natural.

##### 4.2.1.1 Secagem convectiva em secador de leito fixo

Inicialmente foi realizada uma etapa de sanitização da palma para retirada de sujeiras, lavando em água corrente, seguida de imersão em solução de água clorada com 10 mg.L<sup>-1</sup> de cloro livre, durante 10 minutos. Após a etapa de sanitização, a palma foi cortada em formatos aproximados de cubos, como mostra a Figura 3.

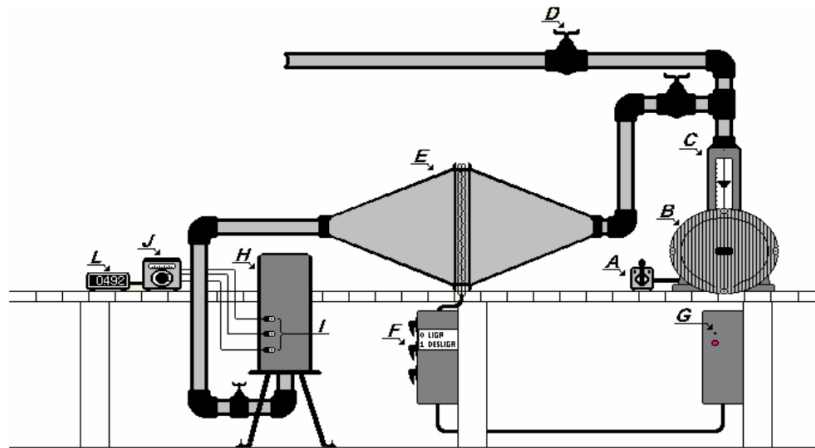
Figura 3 - Palma (*Opuntia tuna* Mill) cortada em cubos, dispostos em cesta metálica para posterior secagem em secador de leito fixo.



Fonte: Próprio autor, 2016.

A umidade inicial foi determinada por perda de peso, em triplicata, em estufa a 105°C após um tempo de 24 h. A secagem foi conduzida em secador de leito fixo, representado na Figura 4, à temperatura de 70°C, utilizando uma vazão de ar de 1,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Figura 4 - Secador de leito fixo.



(A) Chave do ventilador; (B) Ventilador radial; (C) Medidor de vazão; (D) Válvula reguladora; (E) Aquecedor elétrico; (F) Chave das resistências; (G) Chave do sistema de controle; (H) Câmara de secagem; (I) Termopares; (J) Controlador de temperatura; (L) Milivoltímetro digital (LEITE *et al.*, 2016).

A umidade a cada intervalo de tempo foi obtida a partir da Equação 3.

$$U(\text{b.s}) = \frac{M_{\text{úmida}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \quad (3)$$

Em que:

$U(\text{b.s})$  é o teor de umidade (água) da amostra em base seca;

$M_{\text{úmida}} - M_{\text{seca}}$  é a massa de água presente na amostra em (g);

$M_{\text{seca}}$  é a massa seca obtida em estufa 105°C por 24h, (g).

A razão de umidade adimensional (RU) foi determinada a partir da equação (4).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (4)$$

Em que:

$U$  – teor de água do produto, decimal b.s.;

$U_i$  – teor de água inicial do produto, decimal b.s.;

$U_e$  – teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

As curvas de secagem foram ajustadas aos dados experimentais utilizando-se o modelo de Page, amplamente utilizado em estudo de processos de secagem (MARTINAZZO *et al.*, 2007), conforme equação 5.

$$RU = \exp(-k.t^n) \quad (5)$$

Em que:

RU – Razão de umidade do produto adimensional

t – tempo de secagem, minutos

k – coeficiente de secagem,  $s^{-1}$

n – constante do modelo

Para o ajuste do modelo de Page aos dados experimentais de secagem, realizou-se análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando o *software* STATISTICA<sup>®</sup>. O grau de ajuste do modelo aos dados experimentais foi avaliado em função da magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ). A representação gráfica das curvas da cinética de secagem foi obtida utilizando o *software* ORIGIN<sup>®</sup>.

#### 4.2.1.2 Secagem convectiva ao natural

A palma foi cortada em formato aproximado de cubos para facilitar a etapa de secagem. Posteriormente foi distribuída em bandejas, conforme ilustrado na Figura 5. Todo o material foi deixado exposto ao ar para que fosse seco, permanecendo durante duas semanas a céu aberto.

Figura 5 - Palma cortada disposta em bandejas para etapa de secagem exposta a céu aberto.



Fonte: Próprio autor, 2016.

#### **4.2.2 Obtenção da biomassa de palma forrageira na forma particulada**

Após a secagem, a palma passou por cominuição à forma de pó, utilizando-se liquidificador. Com o auxílio de peneiras metálicas, foi feita a seleção granulométrica de modo que ao final o material tenha apresentado partículas com diâmetro entre 1 e 2 mm.

#### **4.2.3 Cinética de Adsorção**

Para o estudo da cinética preparou-se uma dispersão OLUC/água a fim de sintetizar o efluente, para isto foram utilizados 12 frascos Erlenmeyer, contendo 40 mL de água e 12 mL do óleo lubrificante contaminado. Sob agitação a 130 rpm, foram acrescentados 1,2 g do biossorvente. Os tempos avaliados foram de 5 a 60 minutos, com intervalos de 5 minutos, não havendo variação na concentração do contaminante. Após cada tempo de agitação, as amostras foram submetidas à filtração utilizando uma peneira, de forma que a palma particulada ficasse retida no meio filtrante, enquanto a fase líquida escoava. Com o auxílio de uma proveta, foi realizada análise volumétrica da amostra ao final do tempo de contato entre o adsorvente e o adsorbato, para que fosse possível determinar o volume de óleo adsorvido. Ao final dos experimentos, a massa do adsorvente foi aferida.

A representação gráfica das curvas da cinética de adsorção foi obtida utilizando o *software* ORIGIN<sup>®</sup>.

#### **4.2.4 Estudo do Equilíbrio**

Para determinar a capacidade adsortiva da palma forrageira na forma particulada, foram utilizados 12 frascos Erlenmeyer contendo água contaminada com óleo lubrificante, com concentrações variando de 5 a 60%, com variação de 5%, e quantidade fixa de palma para cada frasco Erlenmeyer de 1,2 g, mantidos à agitação de 130 rpm, durante 60 minutos, em temperatura ambiente, de acordo com o que está representado na Figura 6. Em seguida, a amostra foi filtrada para verificação da concentração final da amostra contaminada. Ao final dos experimentos, a massa do adsorvente foi aferida.



Figura 6 - Frascos Erlenmeyer contendo a mistura água, óleo e biomassa em agitação a 130 rpm e temperatura constante para obtenção das isotermas de equilíbrio.



Fonte: Próprio autor, 2016.

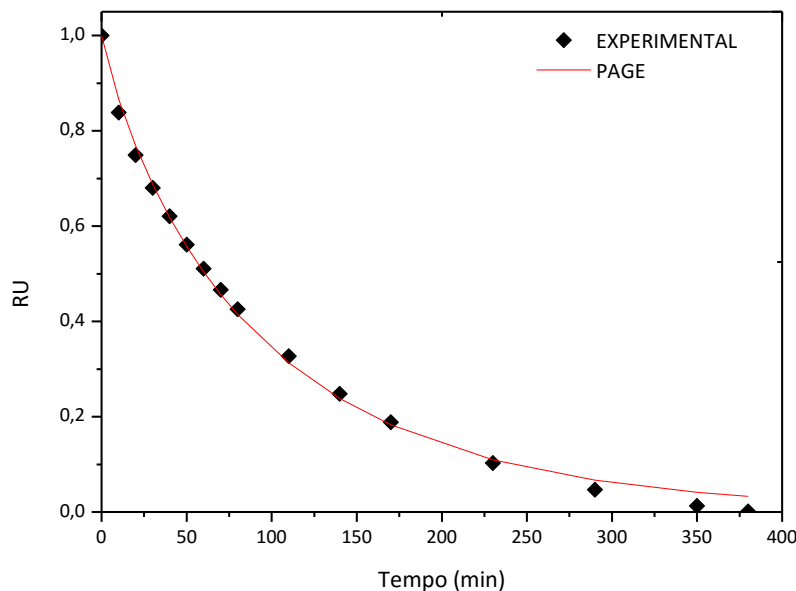
Os dados obtidos do equilíbrio foram ajustados utilizando ao modelo da isoterma de Langmuir, conforme anteriormente apresentado na Equação 1 (item 3.4.1 da Fundamentação Teórica). Para aplicação da modelagem matemática, utilizou-se o *software* ORIGIN<sup>®</sup>.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 SECAGEM CONVECTIVA EM SECADOR DE LEITO FIXO

O ajuste dos dados experimentais da secagem ao modelo de Page está representado na Figura 7, na qual é possível visualizar que o modelo de Page proporcionou um bom ajuste dos dados experimentais.

Figura 7 - Ajuste da curva experimental da secagem, para a equação de Page. Razão da umidade em função do tempo para a secagem a 70°C em secador de leito fixo.



A umidade de equilíbrio foi atingida após 380 minutos de secagem. Analisando a Figura 7, é possível também observar que a secagem da palma orelha de elefante mexicana ocorre no período de taxa decrescente, indicando que a difusão é o mecanismo físico mais provável a governar o movimento da umidade, por meio da estrutura da amostra, fato também observado por Santos *et al.* (2016), na secagem do fruto da palma. Na Tabela 1 estão apresentados os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e os parâmetros calculados pelo ajuste do modelo matemático aos dados da cinética de secagem da palma orelha de elefante mexicana. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , apresentou valor superior a 0,99, comprovando que o modelo se adequou bem aos dados da cinética de secagem. Na literatura reporta-se que valores superiores a 0,98 já proporcionam condições satisfatórias de ajuste, para secagem de produtos agrícolas (RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010).

Tabela 1 - Parâmetros de ajuste do modelo matemático aplicado. Valores do coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) obtidos pelo ajuste do modelo matemático aos dados da cinética de secagem da palma *Opuntia tuna*.

<b>Modelo matemático</b>	<b>Temperatura</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Page</b>	70°C	0,0193	0,8730	99,66

A secagem convectiva de palma Orelha de elefante mexicana a 70° C demonstrou ser um processo eficiente, visto que a biomassa na forma seca pode ser obtida em pouco mais de 6h de secagem. Apresenta-se como um processo alternativo para obtenção de biomassa a ser utilizada como potencial adsorvente.

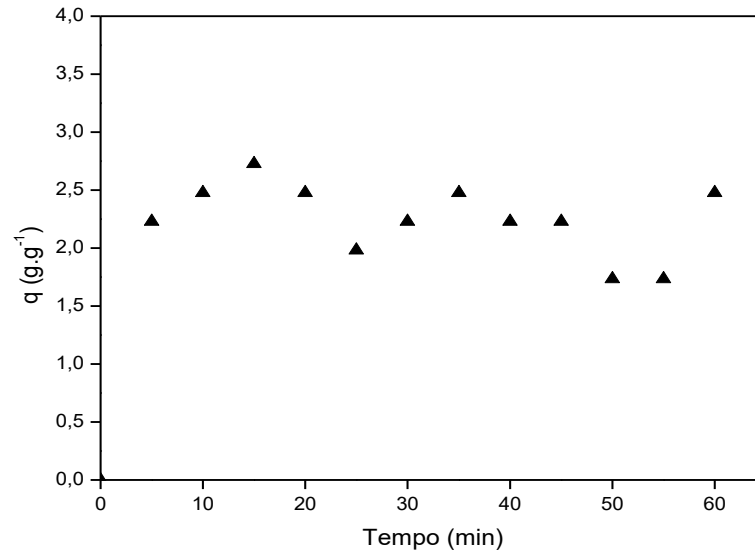
## 5.2 SECAGEM CONVECTIVA AO NATURAL

Por se estender por um longo período de tempo, não foi possível obter dados para cinética de secagem convectiva ao natural da palma Orelha de elefante mexicana. Esta dificuldade foi citada por Domenico; Conrad (2015), que optou por estudar a modelagem e simulação do processo de secagem de produtos agrícolas. Entretanto, a secagem ao natural exige baixos custos de investimento e execução, o que torna-se uma vantagem preponderante para os processos de adsorção. A escolha de um processo ou outro depende das especificações do projeto e pode ser melhor avaliado a partir dos dados de adsorção de cada biomassa, curvas cinéticas de adsorção e dados do equilíbrio.

## 5.3 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

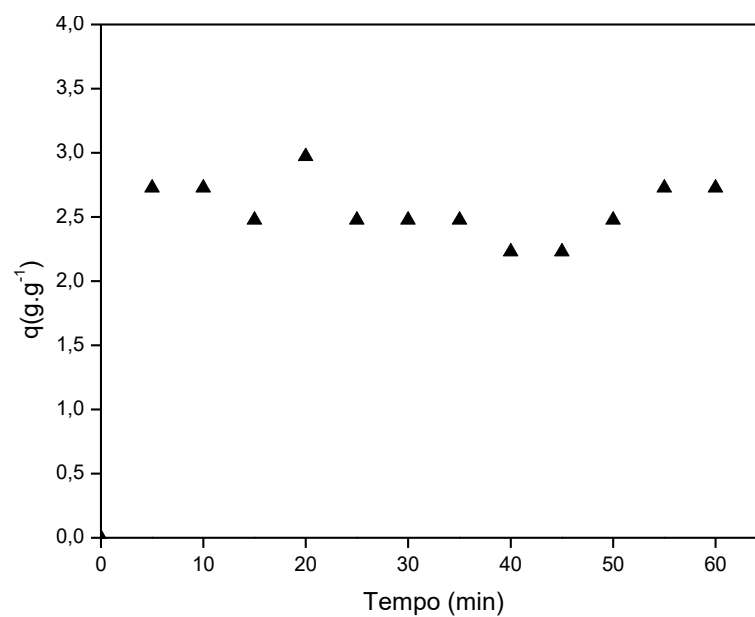
A partir dos dados coletados nos experimentos, foi construída a curva referente à quantidade de óleo adsorvida pela biomassa em relação ao tempo de contato e agitação (curva cinética de adsorção) para a palma seca em secador de leito fixo a 70°C e a curva cinética de adsorção para a palma seca ao natural, apresentadas nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Cinética de adsorção da palma orelha de elefante mexicana (*Opuntia tuna*) seca em secador de leito fixo a 70°C. Quantidade de óleo adsorvida  $q$  ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) em função do tempo (min).



Analisando a Figura 8 é possível observar que, nos instantes iniciais, já houve adsorção do contaminante, indicando que a cinética de adsorção para a palma (*Opuntia tuna*) seca em secador de leito fixo a 70°C foi rápida. No geral, as quantidades de óleo adsorvidas foram baixas e próximas entre si. A maior quantidade adsorvida foi observada para o tempo de 15 min (cerca de 2,7  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

Figura 9 - Cinética de adsorção da palma orelha de elefante mexicana (*Opuntia tuna*) seca ao natural. Quantidade de óleo adsorvida  $q$  ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) em função do tempo (min).



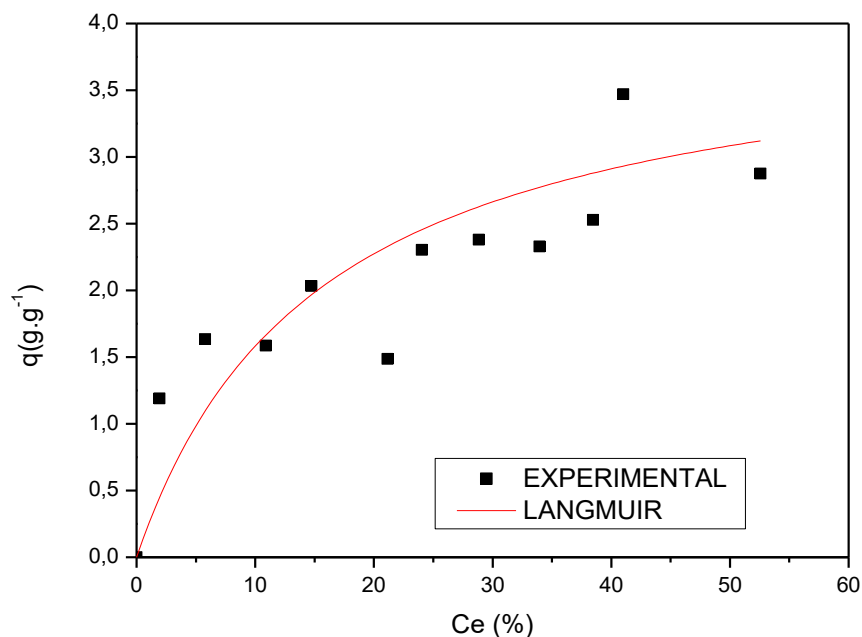
A partir da observação da Figura 9, pode-se dizer que a cinética de adsorção para a biomassa de palma seca ao natural também ocorreu de forma rápida, visto que, nos primeiros minutos já ocorreu adsorção do contaminante. O comportamento foi semelhante à cinética da palma seca em secador de leito fixo a 70°C, entretanto as quantidades foram relativamente maiores, sendo alcançada a maior quantidade de adsorção do contaminante durante o tempo de 20 min (aproximadamente 3 g.g<sup>-1</sup>).

As oscilações nos valores de adsorção do contaminante em função do tempo podem ter ocorrido devido à adsorção de água pela biomassa palma, provocando um deslocamento do adsorbato, estando de acordo com o que foi abordado por Costa (2014).

#### 5.4 EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO

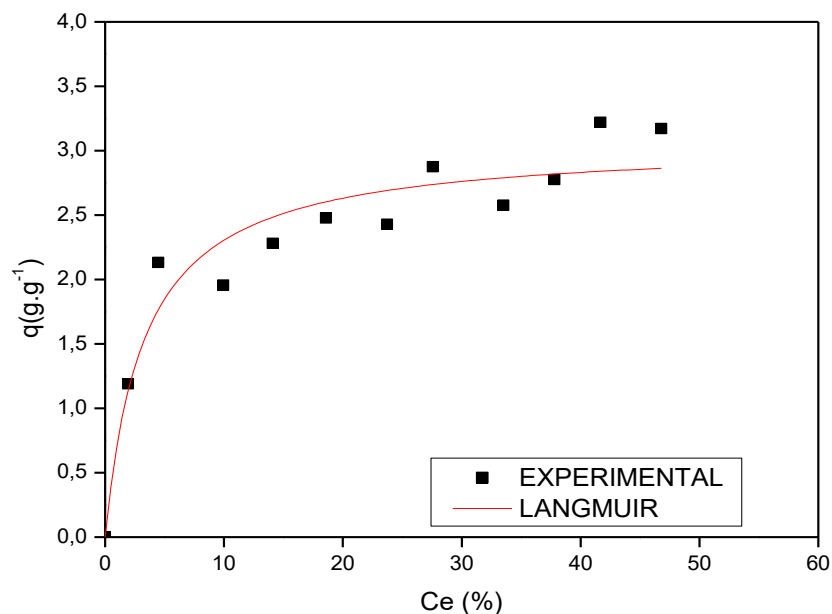
Os dados experimentais referentes ao estudo do equilíbrio em adsorção da água contaminada por OLUC em contato com a palma (*Opuntia tuna*) foram utilizados para obtenção das isothermas de adsorção, aplicando-se o modelo Langmuir. Nas Figuras 10 e 11 estão apresentados os dados: volume do óleo adsorvido na biomassa *versus* volume de óleo não adsorvido para a biomassa palma, obtido na secagem convectiva a 70°C, e para a biomassa palma obtida da secagem convectiva ao natural respectivamente.

Figura 10 - Isotherma de adsorção para biomassa de palma (*Opuntia tuna*) seca a 70°C ajustada ao modelo de Langmuir.



Como pode-se observar na Figura 10, o equilíbrio de adsorção foi alcançado, com valores baixos de adsorção do OLUC e próximos entre si. O modelo de Langmuir não forneceu ajuste satisfatório dos dados de adsorção, fato confirmado pelo baixo valor de seu coeficiente de determinação  $R^2 = 0,693$ . Logo, o modelo descreve 69,3% da variação dos dados. Este coeficiente indica o quanto o modelo foi capaz de explicar os dados analisados, sendo uma medida da qualidade de ajuste destes dados.

Figura 11 - Isoterma de adsorção para biomassa de palma (*Opuntia tuna*) seca ao natural, ajustada ao modelo de Langmuir.



A isoterma de equilíbrio para a biomassa de palma seca ao natural, apresentada na Figura 11, expressa que, para a menor concentração de contaminante, o modelo permite um bom ajuste, porém, para as demais concentrações não é observado o mesmo comportamento. No geral, o modelo de Langmuir admitiu condições de ajuste satisfatório dos dados, visto que o seu valor de coeficiente de determinação  $R^2$  foi igual a 0,915, indicando que a palma seca ao natural apresenta um comportamento de adsorção semelhante ao descrito pelo modelo. As quantidades adsorvidas em  $\text{g.g}^{-1}$  no geral foram baixas e os valores próximos entre si.

O maior valor de adsorção de contaminante obtido a partir da palma seca a  $70^\circ\text{C}$  foi,  $(4,164 \text{ g.g}^{-1})$ . Para a palma seca ao natural a maior quantidade foi de  $(3,865 \text{ g.g}^{-1})$ , valores maiores que os encontrados por Foletto *et al.* (2009), para remoção de óleo na forma comercial por diversas biomassas: casca de arroz  $(1,83 \text{ g.g}^{-1})$ , cinzas de casca de arroz  $(3,57 \text{ g.g}^{-1})$ , sabugo de milho  $(2,86 \text{ g.g}^{-1})$ , carvão em pó  $(1,55 \text{ g.g}^{-1})$ , casca de amendoim  $(2,32 \text{ g.g}^{-1})$ , salvinia sp.  $(3,07 \text{ g.g}^{-1})$  e Turfa  $(2,41 \text{ g.g}^{-1})$ .

Analisando as isotermas de adsorção é possível observar que a isoterma de Langmuir ajustou-se melhor aos dados de adsorção utilizando a palma obtida da secagem ao natural. A diferença observada entre o comportamento das isotermas para a biomassa seca em secador de leito fixo a 70 °C e a seca ao natural, pode ter ocorrido em decorrência das diferenças no processo de secagem a que foram submetidas. Os diferentes fatores como, por exemplo, tempo, temperatura e a presença ou não do agente clorante na etapa de sanitização podem ter fornecido a formação de diferentes sítios ativos de adsorção. No entanto, as quantidades de contaminante adsorvidas foram semelhantes, indicando que ambos os processos de secagem empregados podem ser utilizados para obtenção de biomassa de palma forrageira para uso como adsorvente de contaminantes orgânicos, como o óleo lubrificante contaminado.

Tendo-se por base a análise das isotermas, é possível inferir que a biomassa palma forrageira *Opuntia tuna* apresenta eficiência para a remoção de óleo lubrificante contaminado, a baixas concentrações, eficiência observada por Albuquerque *et al.* (2014), para a vermiculita *in natura* utilizada para adsorção de óleo lubrificante na forma comercial.

Entretanto, como relatado por Myamura (2011), após o uso, o óleo lubrificante se contamina e pode sofrer reações químicas que resultam em um novo composto e, neste sentido, não foram encontrados na literatura outros trabalhos que tenham estudado a remoção de óleo lubrificante contaminado, utilizando como biomassa a palma.

## 6 CONCLUSÕES

1. A partir da análise das curvas cinéticas de adsorção e estudo do equilíbrio é possível afirmar que ambos os processos de secagem possibilitam a utilização da palma como adsorvente.
2. As biomassas secas, em secador de leito fixo a 70°C e ao natural, apresentaram desempenhos de adsorção semelhantes, porém comportamentos diferentes, o que pode ter ocorrido em função do processo de secagem a que foi submetido.
3. A cinética de adsorção foi rápida para os dois processos estudados. A maior quantidade de adsorção do contaminante foi observada com a biomassa palma obtida da secagem ao natural, durante o tempo de 20 min (aproximadamente 3 g.g<sup>-1</sup>).
4. O equilíbrio de adsorção foi alcançado, com valores baixos de remoção do contaminante para a biomassa obtida a partir dos dois processos de secagem. O maior valor de adsorção de contaminante obtido a partir da palma seca a 70°C foi, (4,164 g.g<sup>-1</sup>). Para a palma seca ao natural a maior quantidade foi de (3,865 g.g<sup>-1</sup>).
5. A palma caracteriza-se como uma alternativa eficiente, econômica e sustentável para remoção de efluentes com baixas concentrações de óleo lubrificante contaminado.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar análise físico-química da biomassa palma forrageira (*Opuntia tuna*) após cada processo de secagem, para verificação de possível variação da composição lignocelulósica.
2. Investigar o comportamento de variáveis que influenciam o processo de adsorção, tais como pH, diâmetro da partícula e concentração do adsorvente, aplicando um planejamento experimental, para que se conheça a influência de novos fatores no processo adsorptivo.
3. Avaliar o comportamento do adsorvente a partir de processos de adsorção em leito diferencial e leito fixo.
4. Realizar análise do óleo lubrificante contaminado, pois mesmo que a remoção em  $\text{g.g}^{-1}$  não apresente altos valores, é possível que a palma adsorva metais e outros compostos do óleo lubrificante contaminado.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. S.; SILVA, V. C.; SOUSA, B. V.; Tratamento de emulsões óleo água utilizando vermiculita in natura e expandida. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ADSORÇÃO. Anais... Guarujá 2014.
- ALEIXO, L. A. G.; TACHIBANA, T. I; CASAGRANDE, D. Poluição por óleo: formas de introdução de petróleo e derivados no ambiente, **Integração**, Abr./Mai./Jun., Ano XII, n. 49, 159-166, 2007.
- ANDREOLA, K. **Secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) assistida por micro-ondas**. 2013. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2013. Florianópolis, 2014.
- ARAL, S.; BESE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus spp.*): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacit. **Food Chemistry**, p. 577–584. 2016
- AZEVEDO, J. B.; CARVALHO, L. H.; FONSECA, V. M. Efeito da degradação em motor automotivo nas propriedades termogravimétricas de óleos lubrificantes minerais e sintéticos. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. Anais... Salvador: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2005. Disponível em: <www.portalabpg.org.br >. Acesso: Agosto de 2015.
- BEZERRA, B. G.; ARAÚJO J. S.; PEREIRA, D. D. Zoneamento agroclimático da palma forrageira (*Opuntia sp.*) para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v 18, n.7, p. 755-761, 2014.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 362, de 23 de junho de 2005. Dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: Março de 2015.
- CARVALHO, E. S. **Reuso do Mesocarpo de coco na remoção de contaminantes derivados de petróleo presentes em corpos d’água, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial**. Universidade Estadual da Paraíba: Campina Grande, 2014.
- CETESB. O que são áreas contaminadas. Disponível em: <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: Maio de 2016
- COSTA, K. J. B. **Utilização do mandacaru (*Cereus jamacaru*) como biomassa adsorvente de gasolina presente em corpos d’água**. Monografia (Graduação em Química Industrial). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.
- CURBELO, F. D. S. **Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Tecnologia Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.
- DADA, A. O.; OLALEKAN, A. P.; OLATUNYA, A. M.; DADA, O. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn<sup>+</sup> unto phosphoric acid modified rice husk, **Journal of Applied Chemistry**, v.3 o. 38-45, issue 1 2012.

DOMENICO, C. M. B; CONRAD, T. M. Simulação de processos de secagem através dos modelos matemáticos Exponencial e de Page. **Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 11, n. 20, p.134-146, 2015.

DOMINGUES, V. M. F. **Utilização de um produto natural (cortiça) como adsorvente de pesticidas piretróides em águas**. 2005. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2005.

DONATO, P. E. R; PIRES, A. J. V.; DONATO, S. L. R.; BONOMO, P; SILVA, J. A.; FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. **Elementary Principles of chemical process**. 3 ed. Wiley. 2005.

FIORINTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D de.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. da M. MODENES, A. N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 1. p. 22-33, 2012.

FOLETTI, E. L.; DA ROS, S.; CARLESSO, F.; JAHN, S. L. Uso de biomassa como adsorbente para a contenção de derramamento de óleo. **ACTA AMBIENTAL CATARINENSE**, v.6 n.1. p. 57-64, 2009

FONTES, H. G. **Utilização de resíduos culturais como bioadsorventes no tratamento de efluentes – Estudo de casos**. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. Campina Grande, 2014.

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

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das operações unitárias. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 670 p.

GALDINO, P. O.; GALDINO, P. O.; FERNANDES, T. K. da S.; OLIVEIRA, M. R. T.; ROCHA, A. P. T. Caracterização sensorial de iogurte enriquecido com polpa da palma forrageira (*Napolea cochenillifera*), **Revista Verde**, v.5, n.5, 53 - 60 (Numero Especial), dezembro de 2010.

GEOLOGIA DO PETRÓLEO, PGT - Petroleum Geoscience Technology. Disponível em: [www.pgt.com.br](http://www.pgt.com.br). Acesso em: mar de 2016.

GERENCIAMENTO de óleos lubrificantes usados ou contaminados, APROMAC – Disponível em: <[www.sindilub.org.br](http://www.sindilub.org.br)>. Acesso em: mar de 2016.

GUELFY, L.; SCHEER A P. **Estudo de Adsorção Para Purificação e Separação de Misturas na Indústria Petrolífera**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GUERRA, T. G. dos A.; Souto, C. M.; BARBOSA, J. N.; GONÇALVES W. P.; BARBOSA, E. A. Aspectos legais e ambientais do descarte inadequado de óleos lubrificantes automotivos usados ou contaminados. In: XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RESPONSABILIDADE SOCIAL: AS CONTRIBUIÇÕES DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Anais... Bento Gonçalves, RS, Brasil, 2012.

GUIMARÃES, J. **Rerrefino de óleos lubrificantes de motores de combustão interna pelo processo de ultrafiltração e adsorção**. 2006. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – Insa investe mais de 500 mil na revitalização da cultura da palma forrageira. Boletim, 2013. Disponível em: <<http://www.insa.gov.br/wp-content/uploads/2013/04/BOLETIM-Informativo2-Retificado1>>. Acesso em: maio de 2016.

- KILIKIAN, B. V. Introdução à cromatografia. In: PESSOA JÚNIOR, A.; KILIKIAN, B. V. (Org.). **Purificação de produtos biotecnológicos**. Barueri: Manole, 2005. 166-175p.
- LEITE, D. D. F.; PEREIRA, E. M.; ALBUQUERQUE, A. P.; MENDES, F. de A.; ALEXANDRE, H. V. Avaliação da cinética de secagem da carambola em secador convectivo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 2, p. 01-04, 2016.
- LEITE, M. L. M. V.; SILVA, D. S.; ANDRADE, A. P.; PEREIRA, W. E.; RAMOS, J. P. F. Caracterização da produção de palma forrageira no Cariri paraibano. **Revista Caatinga**, v. 27, n.2, p. 192-200, 2014.
- LIMA, L. M. R. **Caracterização do poder adsortivo da biomassa palma forrageira (*Opuntia ficus*) para uso em remoção de contaminantes hidrogenocarbonados em águas de descarte**, Projeto submetido e aprovado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC, Processo Seletivo PIBIC/CNPQ/UFCG/2014.
- LIMA, L. M. R. **Estudo da ampliação de escala na adsorção de contaminantes orgânicos presentes em efluentes aquosos mediante leito fixo de biomassa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), UFCG, 2010.
- LIMA, L. M. R. **Estudo da degradação térmica oxidativa de graxas lubrificantes**. 2009.123f. Tese (Doutorado em Química) Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2009.
- LIMA, N. C. **Avaliação de unidades demonstrativas de palma forrageira (*Napoleoa e Opuntia*) no estado de Pernambuco**. 2013. 75 f. Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia), Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, 2013.
- LUZ, A. D. **Aplicação de processos adsortivos na remoção de compostos btx presentes em efluentes petroquímicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- MARIN, P.; BORBA, C. E.; MÓDENES, A. N.; OLIVEIRA, S.P. D.; PASSAIA, N.; FIGUEIREDO, L. S. Avaliação do efeito da temperatura, pH e granulometria do adsorvente na adsorção do Corante Azul Reativo 5G. **ENGEVISTA**, v. 17, n.1, p. 59-68, Março 2015. Disponível em: <<http://www.uff.br/engevista/seer/index.php/engevista/article/view>>. Acesso em : Agosto de 2015.
- MARTINAZZO, A. P.; CORREA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. de C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.301–306, 2007.
- MARTINS, G. M. V.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, A. E.; NOBRE, R. S. Cinética de Secagem em camada fina da polpa de cladódios de palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) em estufa com circulação forçada de ar. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Anais... Florianópolis, 2014.
- MOREIRA, A. S. **Biossorção utilizando alga marinha (*Sargassum* sp.) aplicada em meio orgânico**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2007.
- MYAMURA, J. H. M. O.; LIMA, L. K. R. **Perspectiva técnica e econômica do processo de ultrafiltração por membranas e adsorção aplicado ao rerrefino de óleos lubrificantes usados e contaminados**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, - USP, São Paulo, 2011.

- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **ADSORÇÃO: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa universitária, 2014. 256p.
- NOBEL, P. S. *Biologia Ambiental* In: BARBERA, G.; INGLESE, P. (Eds.). **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. SEBRA/ PB. 2001. p. 36-48.
- NUNES, C. S. Usos e aplicações da palma forrageira como uma grande fonte de economia para o semiárido paraibano. **Revista Verde Mossoró**, v.6, n.1, p. 58-66, 2011.
- PEREIRA, W. S.; FREIRE, R. S. Ferro zero: uma nova abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. **Quim. Nova**. São Paulo. Vol. 28, Nº. 1, p. 130-136, 2005.
- PESSOA, T.; GALDINO, P. L.; GURJÃO, G. C.; GURJÃO, F. F.; MATA, M. E. R. M. C. Secagem convectiva de grãos de sorgo em camada fina fina por secador de leito fixo. **Revista Verde**. Mossoró. v.6, n.1, p. 247 - 255 de 2011.
- PITOMBO, R. N. de M. Secagem. In: PESSOA JÚNIOR, A.; KILIKIAN, B. V. (Org.). **Purificação de produtos biotecnológicos**. Barueri: Manole, 2005. 349-369p.
- QUEIROZ, M. G. **Desempenho produtivo e parâmetros agrometeorológicos da palma forrageira da palma forrageira, clone orelha de elefante mexicana, no semiárido brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P; Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process**. New York: John Wiley & Sons, 1984.433p.
- SANTOS, A. E.; Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. v. 11, n. 1, p. 01-06, 2016
- SANTOS, E. G.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, F. L. H.; Desempenho de biomassas na adsorção de hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos. **Quim. Nova**. Campina Grande. Vol. 30, Nº 2, p. 327-331, 2007.
- SANTOS, M. V. F.; CUNHA, M. V.; LIRA, M. de A.; DUBEUX JR, J. C. B.; FREIRE, J. de L.; PINTO, M. do S. de C.; SANTOS, D. C.; SOUZA, T. C.; SILVA. M. da C. Manejo da palma forrageira, **2º Congresso Brasileiro de Palma e outras Cactáceas**, Pernambuco, 2011.
- SCHEUFELE, F. B.; DIÓRIO, A.; MÓDENES, A. N.; ERGAMASCO, R.; PEREIRA, N. C. Avaliação da cinética e equilíbrio da secagem do bagaço de cana-de-açúcar para aplicação como adsorvente. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis, 2014.
- SILVA, A. F.;BAHIA, F. C.; CARVALHO, G. M. **Tratamento e Disposição de Resíduos sólidos industriais contaminados por derivados de Petróleo**. Monografia (Tecnologia em Processos Químicos da Faculdade de Pindamonhangaba – FAPI). Pindamonhangaba, 2011
- SILVA, J. de S. e.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores. In: SILVA, J. de S. e. (Org.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 107-138p.

SIMAL, S.; FEMENIA, A. F.; GARAU, M. C.; ROSSELLÓ, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 323–328. 2004.

SOUSA, A. R. de.; COSTA, O. S. da. **Tecnologia e meio ambiente**. Inhumas, 2012. Disponível em <<http://estudio01.proj.ufsm.br>>. Acesso em: jun de 2016.

SOUZA, R. S. LIMA, L. M. R.; SILVA, V. L. M. M. Adsorção de óleo diesel em sistema de leito diferencial com biomassa bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.6.2 p.123-126, 2011.

SOUZA, R. S.; LIMA, L. M. R.; SILVA, V. L. M DE M. Avaliação da capacidade adsorptiva do óleo diesel em sistema de leito diferencial com biomassa bagaço de cana-de-açúcar, **Revista Eletrônica de Materiais e Processos** / ISSN 1809-8797, 2006.

TIBURTIUS, E. R. L.; ZAMORA, P. P. Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Quim. Nova**. Curitiba. Vol. 27, Nº 3, p. 441-446, 2004.